

Galileo-Testzentren GATEs in Deutschland: Fit für Europas zukünftiges Satellitenavigationssystem Galileo

René Zweigel, Matthias Hoppe, Thomas Engelhardt, Frank-Josef Heßeler,
Oliver Funke, René Kleeßen und Dirk Abel

Zusammenfassung

Satellitenavigation hat sich mittlerweile zu einem essenziellen Faktor für alle Transportsysteme entwickelt. Da die Nutzung satellitenbasierter Navigationssysteme in unserer Gesellschaft stark verbreitet ist und zukünftig in sicherheitskritischen Bereichen Anwendung finden wird, rücken neben Genauigkeit vermehrt die Themen Verfügbarkeit und Integrität in den Vordergrund. Mit der Errichtung des europäischen Satellitenavigationssystems Galileo wird erstmalig ein zivil überwachtes System aufgebaut, das Vorteile hinsichtlich Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit gegenüber anderen Systemen bietet. Um bereits von Beginn an Galileo-basierte, ausgereifte Anwendungen anbieten zu können, existieren spezielle Galileo Test- und Entwicklungsumgebungen, sogenannte GATEs. In diesen Testgebieten können insbesondere Anwendungen und Produkte mit Navigationsbezug frühzeitig erprobt und validiert werden. Aufgrund der hohen wirtschaftlichen Bedeutung dieser Entwicklungen kann dadurch der kommerzielle Erfolg des Europäischen Satellitenavigationssystems Galileo sichergestellt werden. Im vorliegenden Beitrag werden die insgesamt fünf Galileo-Testzentren in Deutschland vorgestellt. Einen Schwerpunkt bilden hierbei die beiden Testzentren für den Straßen- und den Schienenverkehr, bei deren Aufbau die RWTH Aachen federführend beteiligt war. Für diese beiden GATEs wird jeweils ein RWTH-Forschungsvorhaben vorgestellt, das die Einbindung Galileo-basierter Anwendungen in Automatisierungsaufgaben und Sicherungsfunktionen beispielhaft aufzeigt.

Summary

Satellite navigation has become an essential factor for all transport systems by now. As satellite based navigation systems are widely used today and will be applied to security-critical fields in the future, current development focuses on availability and integrity issues. The European satellite navigation system Galileo is the first civil-controlled system. Its advantages compared to other systems lie in accuracy, availability and reliability. In order to offer fully developed Galileo-based applications from the start, there are specific Galileo test and development environments, so-called GATEs. At these test areas, applications and products particularly related to navigation can be tested and validated. Based on the high economic relevance of these developments, the commercial success of the European satellite navigation system Galileo can be ensured. This article introduces the five German Galileo test sites. A special focus lays on the test environment for road and the test environment for railroad systems, whose construc-

tion was led by RWTH Aachen University. For each of these two GATEs, an RWTH research project is presented exemplarily demonstrating the integration of Galileo-based applications in automation tasks as well as in safety functions.

Schlüsselwörter: Galileo, Satellitenavigation, Galileo-Testumgebungen, GATEs

1 Einleitung

Seit in den 90er Jahren die ersten Satellitensignale des amerikanischen GPS erstmals zivil genutzt werden konnten, haben sich neue und stetig wachsende Geschäftsfelder eröffnet. Die Satellitenavigation ist seitdem zu einem festen Bestandteil des gesellschaftlichen Lebens geworden und aus den Bereichen Land-, See- und Luftfahrt nicht mehr wegzudenken. Bisher wird in diesen Bereichen sowie in der vielfältigen privaten Nutzung fast ausschließlich auf GPS zurückgegriffen.

Da ein enormes globales Marktvolumen mit deutlichem Wachstumspotenzial bei satellitenbasierten Diensten besteht, ist die Entscheidung der Europäischen Union, ein eigenes Satellitenavigationssystem namens Galileo aufzubauen, leicht nachzuvollziehen. Gegenüber den militärisch-motivierten Systemen GPS (amerikanisch) und GLONASS (russisch) wird Galileo das erste zivile Satellitenavigationssystem sein. Es wird darüber hinaus Vorteile hinsichtlich Verfügbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit bieten. Bereits im Entwurf von Galileo wurde auf eine Interoperabilität mit GPS geachtet, sodass beide Systeme simultan genutzt werden können. Galileo wird z.B. in den Frequenzbändern E1 (1.575 MHz), E5a/E5b (1.192 MHz) und E6 (1.278 MHz) senden, wobei E1 und E5a im selben Frequenzbereich wie die GPS-Signale L1 und L5 liegen. Ein geeigneter Empfänger kann daher interoperabel gleichzeitig beide Satellitensysteme über diese Frequenzbänder empfangen. Dies führt insgesamt zu einer höheren Satellitenverfügbarkeit in urbanen Gebieten. Da Galileo mehrere zivile Frequenzen zur Verfügung stellt, kann dadurch die Lokalisierungsgenauigkeit für anspruchsvolle Anwendungen erhöht werden. Aufgrund des Einsatzes aktueller Technologien (Wasserstoff-Maser-Atomuhren, weiterentwickelte Signal-Modulation, etc.) ist mit einer höheren Genauigkeit zu rechnen.

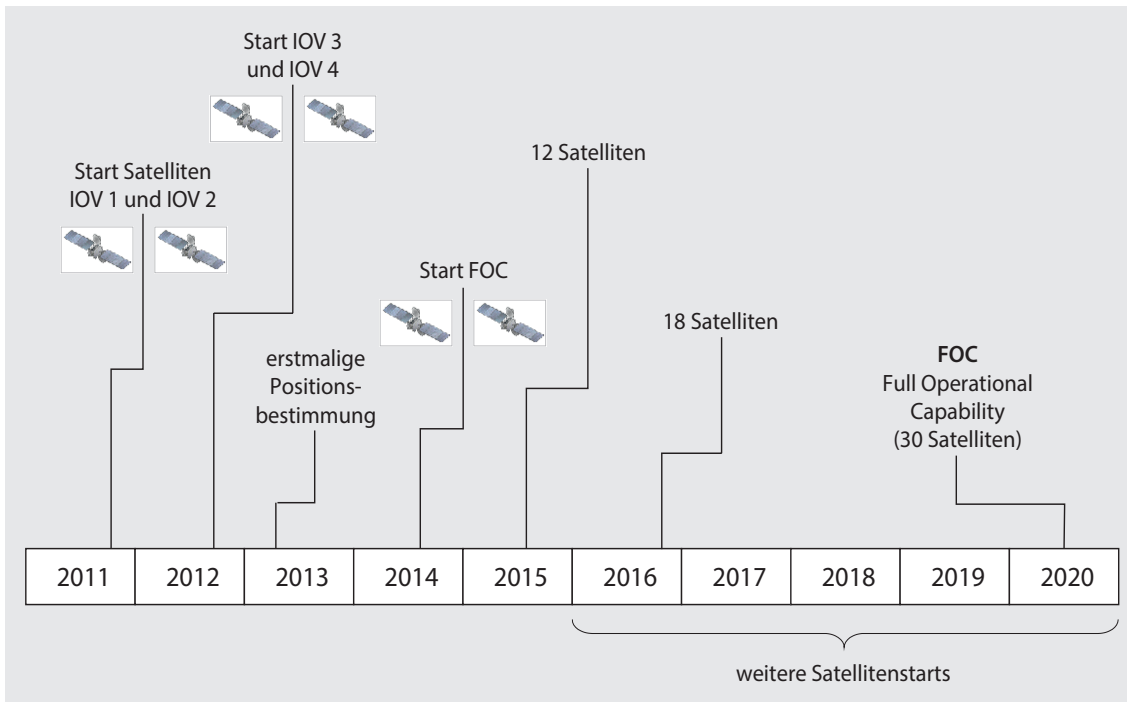


Abb. 1: Geplante Verfügbarkeiten des Europäischen Satellitennavigationssystems Galileo

Ende 2014 standen zunächst sechs Galileo-Satelliten zur Verfügung. Durch drei weitere Starts im Jahr 2015 mit russischen Sojus-Raketen vom europäischen Raumfahrtbahnhof in Kourou wurde die Anzahl verfügbarer Satelliten auf 12 erhöht (siehe Abb. 1). Die Planung der Satellitenstarts für das Jahr 2016 sieht einen Start im Mai mit dem Trägersystem Sojus und einen weiteren für November mit der Ariane 5 vor. Damit wird die Satellitenflotte bis Ende 2016 auf insgesamt 18 Satelliten ausgebaut sein.

Bis Ende 2016 sollen die ersten Dienste (Initial Services) von Galileo verkündet werden. Diese umfassen den offenen Dienst (Navigations- und Zeitdienst), den verschlüsselten PRS-Dienst (Public Regulated Service) sowie den Such- und Rettungsdienst (Search and Rescue Service, SAR). Zurzeit werden die Anforderungen für diese Dienste definiert. Die technische Überprüfung soll bis Mitte 2016 abgeschlossen sein.

Alle 22 bei der OHB System AG bestellten Satelliten sollen bis 2018 gestartet werden. Um die Satellitenkonstellation bis 2020 auf 30 Satelliten (FOC – Full Operational Capability) auffüllen zu können, erfolgte durch die Europäische Kommission und die Europäische Weltraumorganisation ESA (European Space Agency) eine weitere Ausschreibung im offenen Wettbewerb. Die Vergabe des Auftrags ist bis September 2016 geplant.

Außerdem beabsichtigt die Agentur für das europäische GNSS (GSA, Sitz in Prag), den Auftrag für den Betrieb von Galileo (Galileo Service Operator, GSOp) bis Ende 2016 zu vergeben. Der Betrieb wird zurzeit von Spaceopal (München) durchgeführt.

Erste Chiphersteller für z. B. Smartphones und automobilen Navigationsgeräte haben bereits angekündigt, Galileo in ihre Empfängertechnologie zu integrieren. Damit können in naher Zukunft neue Endgeräte mit Hilfe des neuen europäischen Satellitennavigationssystems navi-

gieren. Um insbesondere der deutschen Industrie und Forschung die Möglichkeit zu geben, sich technologisch auf die näher rückende Verfügbarkeit von Galileo vorzubereiten, wurden in Deutschland und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie insgesamt fünf Galileo Test- und Entwicklungsumgebungen (GATES) errichtet. Innerhalb dieser GATES können Galileo-konforme Signale empfangen werden, die von sogenannten Pseudoliten (Pseudo-Satelliten) abgestrahlt werden.

Die GATES ermöglichen die frühzeitige Entwicklung und Erprobung von Produkten und Anwendungen mit Galileo-Bezug und spielen damit eine Schlüsselrolle für den kommerziellen Erfolg des Europäischen Satellitennavigationssystems Galileo. Insbesondere Entwicklungen und Produkte mit Navigationsbezug auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme, Datendienste und sicherheitsrelevanten Automatisierungen können hier umfangreich validiert werden. Im GNSS Market Report 2015 der GSA (GSA 2015) wird der straßenverkehrsseitige Anteil der Gesamteinnahmen, die insgesamt für GNSS-Produkte prädiert werden, auf 38 % geschätzt. Lediglich die Location Based Services (LBS) – Dienste auf Smartphones, Tablets und ähnlichen mobilen Technikgeräten – besitzen einen größeren Anteil von 53,2 %. Für die schienengebundenen (0,2 %), maritimen (1,1 %) und aeronautischen Systeme (1,0 %) werden deutlich geringere Anteile abgeschätzt. Allerdings zeigt der Bericht gleichzeitig auf, dass in diesen Bereichen mit einer steigenden Tendenz zu rechnen ist. Insgesamt wird die große Rolle der GNSS-Navigation für die beginnende Verkehrsautomatisierung hervorgehoben.

Die Testgebiete tragen dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller und Zulieferer zu erhöhen und somit auch den Forschungs- und Technologiestandort Deutschland weiter zu stärken. Deutschland hatte be-

reits eine Vorreiterrolle bei Gestaltung und Aufbau des Galileo-Systems eingenommen. Der Aufbau der deutschen Galileo-Testzentren fügt sich nahtlos in diese Rolle ein.

In den folgenden Kapiteln werden die deutschen GATEs näher vorgestellt, wobei ausführlicher auf die beiden, federführend durch die RWTH Aachen aufgebauten, Galileo-Testzentren für den Straßen- und Schienenverkehr (automotiveGATE und railGATE) eingegangen und jeweils kurz ein Galileo-basiertes Forschungsvorhaben vorgestellt wird.

2 Galileo-Testgebiete im Überblick

In Deutschland stehen insgesamt fünf Galileo Test- und Entwicklungsumgebungen zur Verfügung, die die relevanten Verkehrssysteme abdecken. Allen Testgebieten ist



Abb. 2: Geografische Verteilung der Galileo Test- und Entwicklungsumgebungen in Deutschland

gemein, dass die abgestrahlten Galileo-konformen Signale individuell an Nutzeranforderungen wie Nachrichteninhalte, Sendestärken und Galileo-Frequenzen angepasst werden können. Die geografische Verteilung der Testgebiete in Deutschland zeigt Abb. 2.

Im Jahr 2008 entstand das GATE in Berchtesgaden, ein öffentlich zugängliches Testgebiet, in dem bereits ausgereifte Technik auf öffentlichen Straßen mit realem Verkehr erprobt werden kann. 2010 kamen zwei weitere GATEs hinzu: Zum einen entstand das aviationGATE, das in den Forschungsflughafen Braunschweig integriert ist und frühzeitige Erprobungen satellitengestützter Anwendungen für die zivile Luftfahrt erlaubt, zum anderen wurde im selben Jahr das SEA GATE im Forschungshafen Rostock in Betrieb genommen. Das an der deutschen Ostseeküste gelegene Testgebiet ermöglicht Validierungen von Galileo-Anwendungen für den maritimen Bereich.

Seit 2014 ist es möglich, Galileo-bezogene Anwendungen für den automobilen Bereich im automotiveGATE und für den schienengebundenen Verkehr im railGATE

zu erproben. Beide GATEs befinden sich in der Nähe von Aachen und wurden unter Leitung der RWTH Aachen errichtet. Im Folgenden werden die verschiedenen GATEs kurz vorgestellt.

3 GATE (Berchtesgaden)

Das erste in Deutschland eingerichtete Galileo-Testgebiet ist das GATE in Berchtesgaden, das seit Sommer 2008 für Versuche genutzt werden kann. GATE besteht aus acht Sendestationen, die auf Berggipfeln am Alpenrand rund um den Berchtesgadener Talkessel platziert sind. Durch die Höhe der Berge relativ zum Tal werden Höhenunterschiede von bis zu 1.250 Metern zwischen Sendern und Empfängern erreicht. Dadurch können die Pseudoliten-Signale überall im Tal ideal empfangen werden.

Das Testgebiet ist maßgeschneidert für mobile Anwendungen mit Fokus auf Logistik, Fahrzeug- und Fußgänger navigation. Auch lassen sich natürliche Störeinflüsse, z.B. der Ionosphäre und der Troposphäre, simulieren. GATE verfügt über drei unterschiedliche Betriebsmodi. Im Base Mode senden die Pseudoliten ihre Position und die exakt synchronisierte Systemzeit, sodass der Empfänger seine Position bestimmen kann. Darüber hinaus vermeidet der Extended Base Mode Nah-Fern-Effekte, die auftreten, wenn sich ein Nutzer einer Antenne nähert. Durch eine genaue Abstimmung aller Sendestationen empfängt der Nutzer standortunabhängig jedes Signal mit der gleichen Leistungsstärke. Im Virtual Satellite Mode (VSM) werden realistische Satellitenüberflüge simuliert. Dazu werden Bahndaten virtueller Satelliten zeitlich passend mit entsprechender Frequenz und Phase gesendet. Die erzeugten Signale werden hierbei der Position des Empfängers angepasst. So empfängt der Nutzer ein Signal, das sich nicht von den späteren Open Service Satellitensignalen unterscheidet. Diese Funktion ist einzigartig in Deutschland und besonders für die Erprobung von Empfängertechnologien geeignet.

Mit GATE ist außerdem die Durchführung von Integritätstests möglich, durch die Verlässlichkeitsaussagen über die ermittelte Position auf Empfangsebene getroffen werden können. Diese Funktionalität ist ein besonderes Merkmal des Galileo-Systems und erforderlich für Entwicklungen von autonom agierenden Systemen. In Tab. 1 sind die Leistungsparameter des GATE aufgeführt.

Tab. 1: Leistungsparameter GATE (8 Pseudoliten)

Abgedeckte Fläche	ca. 65 km ²
Positionsgenauigkeit	E1 ≤ 10 m E5 ≤ 10 m
Frequenzen	E1, E5 und E6 (simultan)
Info	www.gate-testbed.com/de

Bei GATE handelt es sich um ein frei zugängliches Versuchsfeld, in dem die öffentliche Infrastruktur genutzt wird. Ebenso wie im SEA GATE sind hier Versuche unter Berücksichtigung des öffentlichen, zivilen Verkehrs möglich. Für die Erprobung von Prototypen und gegebenenfalls Vorprototypen sind räumlich abgeschlossene Areale von Vorteil, damit eine Gefährdung anderer ausgeschlossen werden kann. Solche abgeschlossenen Gebiete stellen aviationGATE, automotiveGATE und railGATE dar, die von interessierten Unternehmen über die entsprechenden Testgebietbetreiber angemietet werden können.

4 aviationGATE (Braunschweig)

Galileo ermöglicht zukünftig weitere Fortschritte in sicherheitskritischen Anwendungen für den zivilen Flugverkehr, so z.B. beim satellitengestützten Präzisionslandeanflug und bei Flugführungsverfahren. Das aviationGATE am Forschungsflughafen Braunschweig ist seit 2010 im Betrieb und erlaubt eine frühzeitige Entwicklung und Erprobung derartiger Technologien.

Aufgrund der enormen Ausdehnung des aviationGATE auf 5.500 Quadratkilometern mit 100 Kilometern Durchmesser ist ein Empfang Galileo-konformer Signale während eines kompletten Landeanflugs auf den Flughafen möglich. Dadurch können speziell für das Landen und Starten von Flugzeugen Satelliten-basierte Anwendungen entwickelt und validiert werden, die die hierbei notwendigen hohen Anforderungen an Genauigkeit und Ausfallsicherheit erfüllen.

Die flächendeckende Versorgung des aviationGATE mit Galileo-konformen Signalen wird durch acht Pseudoliten, die in zwei Ringen angeordnet sind, sowie einen neunten in zentraler Position erreicht. Der weitgezogene äußere Ring erlaubt dabei einem Flugzeug, das sich noch in Reishöhe befindet, den Empfang der Galileo-Signale. Der innere Ring liefert zusätzliche Signale und erhöht so die Ausfallsicherheit. Das ist insbesondere bei den sicherheitskritischen Phasen von Start und Landung von großer Bedeutung. Durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Verarbeitung der Galileo-Frequenzen E1 und E5, wird eine hochgenaue und sichere Lokalisierung erreicht (Tab. 2). Einzelne Signale können außerdem manuell verfälscht werden, sodass die Resilienz des Systems gegenüber Fehlern untersucht werden kann.

Tab. 2: Leistungsparameter aviationGATE (9 Pseudoliten)

Abgedeckte Fläche	ca. 5.500 km ²
Positionsgenauigkeit	Horizontal: 1,2 – 1,6 m Vertikal: 6,0 – 15 m
Frequenzen	E1, E5a, E5b
Info	www.aviation-GATE.de

Die Systemarchitektur des aviationGATE ist modular aufgebaut. So können weitere Frequenzen wie E6 oder auch nicht Galileo-artige Pseudoliten eingebunden werden. Somit stellt das aviationGATE eine flexible und offene Forschungsplattform für die zivile Luftfahrt dar.

5 SEA GATE (Rostock)

SEA GATE ist die maritime Galileo-Test- und Entwicklungsumgebung, die in das Areal des Forschungshafens Rostock integriert ist. Aufgrund seiner Lage, dem geringen Tidenhub und der hohen Frequentierung von täglich über 30 Ein- und Ausfahrten von Fähr- und Frachtschiffen, ist der Rostocker Hafen ein idealer Standort für das SEA GATE. Gerade hier ist wegen der engen Zufahrt und der geringen Fahrwassertiefe bei gleichzeitig hohem Schiffsaufkommen eine wetterunabhängige, präzise Navigation notwendig.

Das SEA GATE steht seit 2010 für Erprobungen und Validierungen zur Verfügung. Insgesamt decken neun Pseudoliten den Bereich der Hafeneinfahrt, den Seekanal und die Anlege- und Umschlagplätze ab. Darüber hinaus verfügt das SEA GATE über zwei Referenzstationen sowie ein Monitor- und Kontrollsegment. Bei Verwendung von Korrekturdaten der Referenzstationen sind Genauigkeiten bis in den Dezimeterbereich erzielbar (Tab. 3). Durch dieses maritime Testgebiet ist es Nutzern möglich, Galileo-basierte Szenarien auf den Gebieten hafensorientierter Navigation, intermodaler Umschlagprozesse und maritimer Rettungsverfahren ideal zu erproben.

Zusätzlich zu der Test- und Entwicklungsumgebung wird im Bereich des SEA GATE ein besonderer Dauerversuch durchgeführt. An Bord der Fähre »Mecklenburg-Vorpommern«, die im engen Zeitplan zwischen Deutschland und Schweden verkehrt, sind zwei Galileo-Empfänger installiert, die in Kombination mit der Software »Docking Assistant« das sicherheitskritische Anlegemanöver unterstützen. Durch Kombination von GPS-Signalen, Galileo-Pseudoliten-Signalen und den entsprechenden Korrekturdaten konnte hierbei die Verfügbarkeit hochgenauer Positionsdaten im Dezimeterbereich deutlich verbessert und somit die Sicherheit des Anlegemanövers inklusive 180°-Drehung der Fähre erhöht werden.

Tab. 3: Leistungsparameter SEA GATE (9 Pseudoliten)

Abgedeckte Fläche	ca. 20 km ²
Positionsgenauigkeit	Base-Mode: 4,0 m Assisted Mode: 0,5 m
Frequenzen	E1, E5a, E5b (Einfrequenzbetrieb)
Info	www.sea-gate.de

6 automotiveGATE (Aldenhoven)

Um satellitenbasierte Fragestellungen unter Einbeziehung des Galileo-Systems im Straßen- und Schienenverkehr behandeln zu können, wurden in der Nähe von Aachen die beiden Test- und Entwicklungsumgebungen automotiveGATE und railGATE errichtet. Beide GATES wurden am 22. Mai 2015 feierlich eröffnet.

6.1 Überblick über das automotiveGATE

Das automotiveGATE befindet sich auf dem Gelände des Aldenhoven Testing Centers (ATC) der RWTH Aachen in Aldenhoven-Siersdorf. Das Areal ist etwa dreißig Kilometer von Aachen entfernt und erlaubt die Erprobung

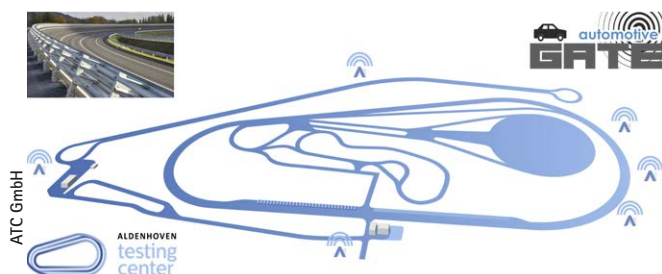


Abb. 3: Integration des automotiveGATE in das Aldenhoven Testing Center (ATC)

und Nutzung von Galileo-Signalen für eine Vielzahl von automobilen Anwendungen, bei denen die Echtzeitsteuerung und Sicherheitsaspekte im Vordergrund stehen. Hierzu zählen z.B. Fahrerassistenz, automatische Kollisionsvermeidung und autonomes Fahren. Auch Fragestellungen bezüglich eines geeigneten Umgangs mit Spoofing und Jamming und der Entwicklung entsprechender Gegenmaßnahmen wurden bereits behandelt. Dazu fand im September 2015 ein von der GSA veranstalteter Workshop (Workshop on RFI threats to GNSS) im automotiveGATE statt.

In Abb. 3 ist das ATC mit seinen verschiedenen Streckenelementen dargestellt. Zum Beispiel besitzt das Testzentrum eine Fahrdynamikfläche (210 m Durchmesser), einen Handlingparcours und einen Ovalrundkurs inklusive Steilkurven. Insgesamt wird das Testgelände mittels sechs Pseudoliten mit Galileo-konformen Signalen versorgt. Die Positionen der Pseudoliten-Antennen, die sich in circa 50 Meter Höhe befinden, sind schematisch in der Abbildung dargestellt. Die Pseudoliten sind rund um das Testareal angeordnet, sodass das gesamte Gebiet homogen mit Signalen abgedeckt wird.

Durch die Integration des automotiveGATE in das ATC besteht der Vorteil, dass sowohl langsame als auch hochdynamische Fahrmanöver möglich sind. So können beispielsweise Funktionen zum autonomen Einparken aber auch hochdynamische Brems- und Ausweichmanöver dargestellt und getestet werden.

6.2 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur des automotiveGATE ist identisch mit der des railGATE (Kap. 7) und ist in Anlehnung an das reale Galileo-System unterteilt in die Komponenten Sendesegment, Nutzersegment, Referenzstation und Monitor- und Kontrollstation (MKS).

Das Sendesegment besteht aus den Pseudoliten, deren Signalgenerator die Galileo-konformen Signale erzeugt. Anschließend werden diese Signale über GNSS-Sendeanennen in gepulster Form abgestrahlt. Auf der Anlage besteht die Möglichkeit, Tests im Einfrequenzbetrieb auf den Galileo-Frequenzbändern E1, E5a und E5b durchzuführen (Tab. 4). Die Sendeanlage bietet außerdem die Option, die Sendeleistung anzupassen.

Das Nutzersegment stellt die Summe aller Galileo-Empfänger dar, die zu einem bestimmten Zeitpunkt im Testgebiet aktiv sind. Die Referenzstation empfängt die Galileo-Signale der Pseudoliten und zusätzlich die orbitalen Signale von GPS- und Galileo-Satelliten, die sie dann an die Monitor- und Kontrollstation (MKS) sendet. Die orbitalen GPS- und Galileo-Signale können je nach Betriebsmodus separat hinzu- oder abgeschaltet werden.

Die MKS steuert und überwacht das gesamte System, konfiguriert die Pseudoliten und die Referenzstation und synchronisiert das System auf eine gemeinsame Zeitbasis. Das automotiveGATE erlaubt verschiedene Betriebsarten, die sich hinsichtlich der verwendeten Navigationssignale unterscheiden: Im Pseudolite-Only-Mode finden lediglich Pseudoliten-Signale Verwendung. Im Mixed Mode werden Pseudoliten-Signale zusammen mit GPS- und/oder Galileo-Satellitensignalen zur Positionslösung herangezogen. In beiden Modi kann die Hinzunahme von Augmentierungsdaten aktiviert oder deaktiviert werden: Im sogenannten Base Mode berechnet der Empfänger seine Position ohne Verwendung von Korrekturinformation mit einer Updaterate von bis zu 20 Hertz. Im Assisted Mode kann mit Hilfe von Messungen der Referenzstation und durch differenzielle Verfahren die Positionslösung verbessert werden. Sofern zusätzlich GPS-Signale verwendet werden, ist die Berücksichtigung von EGNOS-Informationen möglich. Aufgrund des im Vergleich zum Base Mode gesteigerten Rechenaufwands sind im Assisted Mode lediglich Updateraten von bis zu 2 Hertz möglich.

Tab. 4: Leistungsparameter automotiveGATE (6 Pseudoliten)

Abgedeckte Fläche	ca. 2 km ²
Positionsgenauigkeit	Base-Mode: 1,4 m Assisted Mode: 0,5 m
Frequenzen	E1, E5a, E5b (Einfrequenzbetrieb)
Info	www.automotivegate.de www.atc-aldenhoven.de

6.3 GNSS-basierte Kollisionsvermeidung

Aktuelles Forschungsthema in der Automobilindustrie ist das autonome Fahren. Ein momentaner Zwischenschritt ist der Übergang von passiven zu aktiven Sicherheitssystemen, wie z. B. Kollisionsvermeidungssysteme (Collision Avoidance System, CAS). Die Aufgabe eines solchen CAS



Abb. 4: CAS-Ausweichversuch im ATC

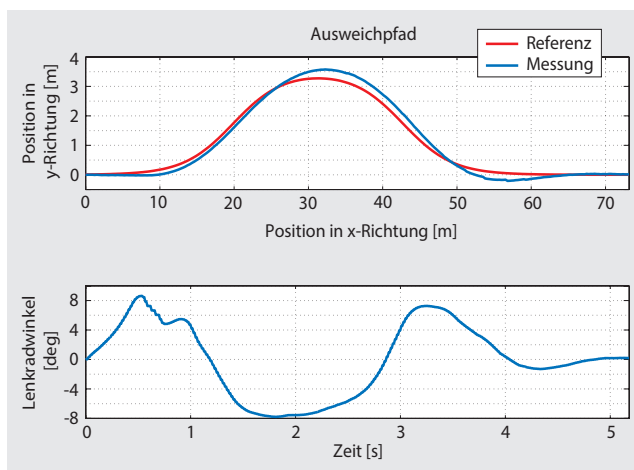


Abb. 5: Ausweichmanöver – Ergebnisse

ist es, autonom eine Notbremsung oder ein Ausweichmanöver durchzuführen, wenn unmittelbar eine Kollision droht. Ein solches Manöver darf durch das System allerdings erst dann selbstständig ausgeführt werden, wenn eine Reaktion des Fahrers in der restlichen ihm zur Verfügung stehenden Zeit nicht mehr zur Unfallvermeidung ausreicht.

Ein CAS lässt sich generell in die drei Komponenten Sensorfusion, Umfeld- & Kollisionserkennung und Pfadplanung & Pfadregelung unterteilen.

Bei der Sensorfusion werden Satellitennavigationsdaten mit fahrzeugeigenen Messgrößen verknüpft, um so Position, Geschwindigkeit und Ausrichtung des eigenen Fahrzeugs möglichst genau zu ermitteln. Diese Daten stellen die Basis für eine zuverlässige Ausführung des Ausweichmanövers dar.

Die Aufgabe der Umfeld- und Kollisionserkennung ist das Erfassen potenzieller Hindernisse. Diese Informatio-

nen lassen sich über Umfeldsensoren wie Kamera-/Radarsensoren oder durch Kombination eines GNSS-Systems mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation erhalten. Im Gegensatz zur eingeschränkten Reichweite von Kamera- und Radarsensoren erlaubt die Nutzung von GNSS-Systemen eine deutliche Vergrößerung der Detektionsreichweite. Außerdem erfolgt die Lokalisierung über GNSS nahezu witterungsunabhängig.

Bei der Pfadplanung wird ein geeigneter Ausweichpfad berechnet, sobald eine Kollision unmittelbar bevorsteht. Das Fahrzeug folgt anschließend geregelt dem berechneten Ausweichpfad. Zu diesem Zweck werden GNSS-basierte Daten der aktuellen Fahrzeugposition als Vergleichsgröße in die Pfadregelung integriert (Alrifaae 2013).

Abb. 4 zeigt ein im automotiveGATE durchgeführtes Ausweichmanöver (Katriniok 2014). Als Hindernis wird hierbei eine mit Luft gefüllte Attrappe verwendet. Das bewegte Fahrzeug bestimmt seine eigene Position über Satellitennavigation und kann mit diesen Informationen der berechneten Ausweichroute geregelt folgen. Da die Attrappe keinen Empfänger besitzt, wird der Abstand zum Hindernis über Radar bestimmt.

Die entsprechenden Messergebnisse zum dargestellten Ausweichmanöver sind in Abb. 5 zu sehen. Das Fahrzeug führt einen doppelten Spurwechsel aus, um die drohende Kollision zu vermeiden. Es erfolgt ein Ausweichen mit einer maximalen Abweichung von 0,33 Metern in Querrichtung vom geplanten Ausweichpfad.

7 railGATE (Wegberg-Wildenrath)

Speziell zur Entwicklung von Bahnanwendungen wurde das railGATE errichtet und zusammen mit dem automotiveGATE am 22. Mai 2015 eröffnet. Es verfügt insgesamt über acht Pseudoliten.

7.1 Überblick über das railGATE

Das railGATE ist in die Infrastruktur des Prüf- und Validierungszentrums Wegberg-Wildenrath (PCW) der Siemens AG integriert und befindet sich 60 Kilometer von Aachen entfernt. Die Abb. 6 zeigt im Überblick die Anordnung der Gleisringe sowie die Positionierung der Pseudoliten-Masten im PCW. Insgesamt stehen zwei Teststringe und verschiedene Testgleise zur Verfügung, auf denen diverse Fahr-situationen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erprobt werden können. Auf diesem Gelände werden vom ICE bis zur Straßenbahn verschiedenste Zugtechnologien getestet. Der ovale, äußere Ring des PCWs hat eine Streckenlänge von circa 6 Kilometern, der innere Ring ist etwa 2,5 Kilometer lang. Im Zentrum befindet sich ein Rangierbereich mit mehreren Rangiergleisen.

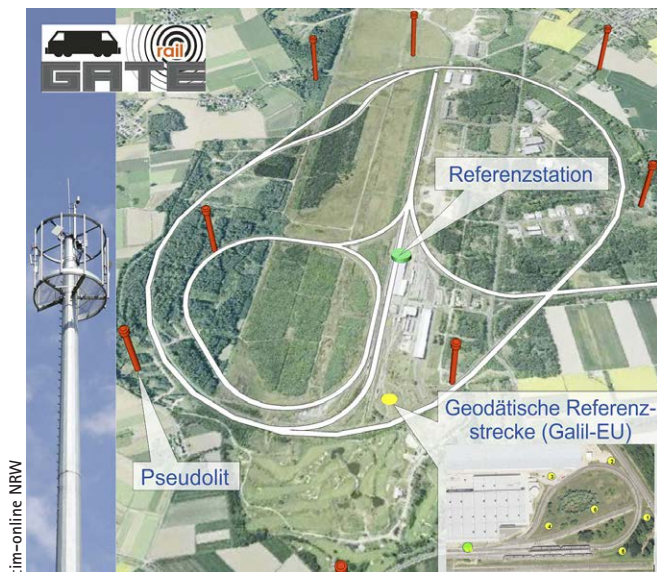


Abb. 6: Integration des railGATE in das Prüf- und Validierungscenter Wegberg-Wildenrath (PCW) von Siemens

Eine rund 550 Meter lange Schienenschleife ermöglicht außerdem hochpräzise, geodätische Referenzmessungen. Auf sechs referenzierten Observationspfeilern können Laserscanner und Tachymeter angebracht werden und so wird ein präzises, geodätisches Netzwerk erzeugt. Auf dieser Referenzstrecke, die im Projekt Galil-EU entstanden ist, werden Genauigkeiten im Sub-Millimeterbereich erreicht und erlauben eine störfreie Validierung, Klassifizierung oder auch Kalibrierung neu entwickelter Empfängertechnologien (Pölöskey 2014).

Der Vorteil des railGATE als abgeschlossenes Testgebiet ist, dass Forschungsvorhaben ohne die sonst üblichen, strengen leit- und sicherungstechnischen Einschränkungen des Bahnbetriebs und ohne sonstigen regulären Zugverkehr durchgeführt werden können. Somit ist mit dem railGATE innerhalb des PCW eine Umgebung verfügbar, in der innovative Galileo-basierte Anwendungen und neuartige Galileo-Empfänger für den Schienenverkehr entwickelt werden können. Empfängertechnologien für den Bahnbereich können auf diese Weise in reproduzierbaren Situationen getestet, validiert und auf eine mögliche Zulassung vorbereitet werden. Die Leistungsparameter des railGATE sind in Tab. 5 aufgeführt.

Tab. 5: Leistungsparameter railGATE (8 Pseudoliten)

Abgedeckte Fläche	30 Streckenkilometer
Positionsgenauigkeit	Base-Mode: 1,3 m Assisted Mode: 0,3 m
Frequenzen	E1, E5a, E5b (Einfrequenzbetrieb)
Info	www.railgate.de

7.2 Projekt SiPoS-Rail

Das Thema des sicheren Zugbetriebs wird im Projekt SiPoS-Rail aufgegriffen. Im Projekt soll eine permanente, gleisgenaue Lokalisierung des Zuges als Grundvoraussetzung für sicherheitskritische Anwendungen sichergestellt werden (Rütters 2012). Der methodische Ansatz im



Abb. 7: SiPoS-Versuchsträger

Projekt sieht vor, dass Satellitennavigations-signale in ein Navigationsfilter einfließen und durch Sensorfusion mit Daten einer inertialen Messeinheit gestützt werden. Eine differenzielle Korrektur der Satellitensignale wird anhand elektronischer Meilensteine erreicht, die dem System der Balisen aus dem Schienenverkehr nachempfunden sind. Sobald der Zug einen solchen Meilenstein passiert, schaltet das System in einen erweiterten Operationsmodus und fungiert als bewegte Referenzstation. Da die Position des jeweiligen Meilensteins exakt bekannt ist, können differenzielle GNSS-Korrekturdaten berechnet werden und anschließend kann ein integriertes Fehlermodell aktualisiert werden. Im Rahmen des Vorhabens wurde anhand eines Demonstrators (Abb. 7) das beschriebene Ortungskonzept anschaulich umgesetzt (Breuer 2013).

Anhand von Testfahrten mit diesem Demonstrator im railGATE konnten die Fähigkeiten der entwickelten Lokalisierungseinheit experimentell nachgewiesen werden (Rütters 2015).

Die Abb. 8 zeigt die Ergebnisse einer Validierungsfahrt im Rahmen von SiPoS-Rail auf dem äußeren Ring des PCW (Breuer 2015). In der Abbildung ist die Positionslösung des Navigationsfilters in grüner Farbe gegenüber den Positionswerten des verwendeten Referenzsystems in blauer Farbe dargestellt. Das entwickelte Navigationsfilter verwendet für seine Zustandsgrößen initiale Startwerte, die bei Beginn der Messung manuell in die Mitte des Rings gelegt wurden. Die Einschwingphase ist deutlich zu erkennen. Nachdem das Filter auf die Position des Referenzsystems konvergiert, liegen die Fehler der Positionslösung in einer Größenordnung von 0,5 Metern. Damit konnte nachgewiesen werden, dass mit dem SiPoS-Ansatz eine gleisgenaue Lokalisierung von Zügen mög-

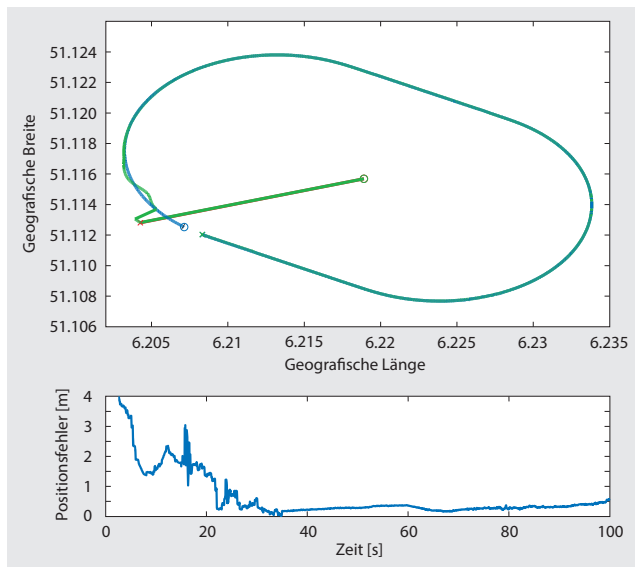


Abb. 8: Positionslösung des Navigationsfilters in WGS84-Koordinaten und Positionsfehler

lich ist. Die entwickelten Algorithmen und gewonnenen Erkenntnisse fließen zukünftig in weitere Forschungsprojekte ein und werden in den Punkten Robustheit und Genauigkeit weiter verbessert.

8 Fazit

Der Offene Dienst des europäischen Satellitensystems Galileo wird 2020 im vollen Umfang zur Verfügung stehen und sich stark auf die Märkte für satellitenbasierte Anwendungen und Produkte auswirken. Insgesamt besitzen diese Märkte auch für Deutschland eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Von Galileo profitieren insbesondere jene sicherheitskritischen Bereiche, für die eine garantierte Signalgenauigkeit, wie Galileo sie bieten wird, von entscheidender Bedeutung ist. Das betrifft durchgängig alle Verkehrsträger. Es ist wesentlich, sich bereits heute auf diese neuen Chancen durch das Galileo-System vorzubereiten und so den kommerziellen Erfolg des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo sicherzustellen.

Die deutschen Galileo-Testgebiete bieten einzigartige Möglichkeiten zur Entwicklung neuartiger Produkte mit Navigationsbezug und zur Erprobung von Innovationen. Entwickler profitieren bei Nutzung der GATES von sehr hoher Flexibilität, neuester Technik und professionellen Forschungsumgebungen.

Dank

Die hier aufgeführten Projekte und der Aufbau der Galileo-Testinfrastrukturen wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Grundlage für die Förderung ist ein Beschluss des Deutschen Bundestages.

Literatur

- Alrifae, B., Reiter, M., Maschuw, J.P., Christen, F., Eckstein, L., Abel, D.: Satellite- and Map-based Long Range Cooperative Adaptive Cruise Control System for Road Vehicles. In: Proc. AAC 2013, 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, S. 732–737, Tokyo, Japan, 2013.
- Breuer, M., Rütters, R., Abel, D.: The milestone based sipos-rail concept for a safe autonomous localisation of trains – an experimental proof of concept. In: ENC 2013, The European Navigation Conference, Navigation, Vienna (Austria), 2013.
- Breuer, M., Rütters, R., Hakenberg, M., Abel, D.: Autonomous positioning of rail vehicles using the GNSS bases sipos-rail approach. In: ENC 2015, The European Navigation Conference, Bordeaux (France), 2015.
- European Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA): GNSS Market Report, Issue 4, 2015.
- Katriniok, A.: Optimal Vehicle Dynamics Control and State Estimation for a Low-Cost GNSS-based Collision Avoidance System. Ph.D. thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2014.
- Pölöskey, M., Ludwig, O., Schuster, O., Baumker, M., Przybilla, H.-J., Neyers, Chr.: Galil-EU: An Approach for Testing Geo-informatics in a Large Field Demonstrator. CERGAL International Symposium on Certification of GNSS Systems and Services, Dresden, 2014.
- Rütters, R.: Autonome Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen unter Verwendung differentieller GNSS-Verfahren. PhD thesis, RWTH Aachen University, 2015.
- Rütters, R., Breuer, M., Zhang, J., Lüdicke, D., Abel, D.: Comparison of state estimation filters for safety relevant localization in rail applications, based on the milestone based sipos-rail approach. In: Proceedings of the ION GNSS, 2012.

Anschrift der Autoren

René Zweigel | r.zweigel@irt.rwth-aachen.de
 Matthias Hoppe | m.hoppe@irt.rwth-aachen.de
 Thomas Engelhardt | t.engelhardt@irt.rwth-aachen.de
 Dr. Frank-Josef Heßeler | f.hesseler@irt.rwth-aachen.de
 Prof. Dr. Dirk Abel | d.abel@irt.rwth-aachen.de
 RWTH Aachen University
 Institut für Regelungstechnik
 Steinbachstraße 54, 52074 Aachen

Dr. Oliver Funke | oliver.funke@dlr.de
 René Kleßen | rene.kleessen@dlr.de
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
 Königswinterer Straße 522–524, 53227 Bonn

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.