



# SIMULIERTES GPS-SPACE-SEGMENT UND SENSORFUSION ZUR SPURGENAUEN POSITIONSBESTIMMUNG

Die Fusion von GPS-Signalen und Fahrdynamikdaten ermöglicht eine spurgenaue Positionsbestimmung. Da diese Sensorfusion sicherheitsrelevant sein kann, sollte die Funktion und Robustheit aller darauf beruhenden Systeme möglichst früh prüfbar sein. IPG Automotive hat ein sogenanntes „Space“-Segment mit virtuellen GPS-Satelliten für die Fahrdynamiksimulation CarMaker entwickelt. Integrierte Fehlermodelle bilden GPS- und Sensorschwächen nach, um realitätsnahe virtuelle Fahrversuche zu ermöglichen.

## AUTOREN



**DIPL.-ING. TOBIAS BUTZ**  
ist Applikationsingenieur  
Testsysteme & Engineering bei IPG  
Automotive GmbH in Karlsruhe.



**DIPL.-ING. UWE WURSTER**  
ist Leiter Testsysteme & Engineering  
bei IPG Automotive  
GmbH in Karlsruhe.



**PROF. DR.-ING. GERT F. TROMMER**  
ist Professor am Institut für  
Theoretische Elektrotechnik und  
Systemoptimierung des Karlsruhe  
Institut für Technologie (KIT).



**DIPL.-ING. MATTHIAS WANKERL**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter  
am Institut für Theoretische Elektro-  
technik und Systemoptimierung des  
Karlsruhe Institut für Technologie  
(KIT).

## MOTIVATION

Mit der wachsenden Zahl an Sensoren im Fahrzeug werden sich Sicherheit, Effizienz sowie Komfort weiter erhöhen. Vor allem durch Mehrfachnutzung von Sensorsignalen und durch Sensorfusion lassen sich neue, leistungsfähigere Assistenzsysteme [1] realisieren. Eine wichtige Rolle spielt dabei der GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung des Fahrzeugs. Wegen der begrenzten Auflösung und den möglichen Fehlerquellen genügt das GPS (Global Positioning System) nicht als alleinige Datenbasis, um Funktionen zu realisieren, die eine spurgenaue Positionsbestimmung des Fahrzeugs erfordern. Zudem kann die GPS-Ortung etwa durch Abschattung ausfallen. Werden jedoch GPS-Daten mit Fahrdynamikinformationen von Inertialsensoren (INS) kombiniert, so kann die Stärke des einen Sensors die Schwäche des anderen ausgleichen. Neben einer höheren Genauigkeit erreicht man so zusätzlich eine Redundanz.

Weiter entwickelte Fahrwerksregelsysteme, Fahrerassistenzsysteme sowie vorausschauende Betriebsstrategien können diese Informationsbasis nutzen. Sobald es dabei um sicherheitsrelevante Systeme geht, müssen sie sehr hohe Ansprüche an ihre Funktion und Robustheit erfüllen. Wegen der Komplexität vernetzter Systeme sowie der Sensorfusion liegt es im Interesse der Entwickler, die Fusionsarchitektur einer GPS- und INS-basierten Lösung frühzeitig zu testen, bevor die Hardware zur Verfügung steht. IPG Automotive löst diese Anforderung mit dem neuen Space-Segment-Modell, das einen Himmelsbereich mit GPS-Satelliten simuliert, die sich auf ihren Umlaufbahnen um die Erde bewegen. Wird die Fahrdynamiksimulation CarMaker um dieses Modell erweitert, ermöglicht dies virtuelle Fahrversuche von Funktionen/Systemen auf der Basis von GPS-INS-Sensorfusion. Durch umfangreiche Fehlermodelle lassen sich Testscenarien einschließlich realitätsnaher Fehlerzustände darstellen.

## FUNKTION UND ERZEUGUNG DES SPACE-SEGMENT-MODELLS

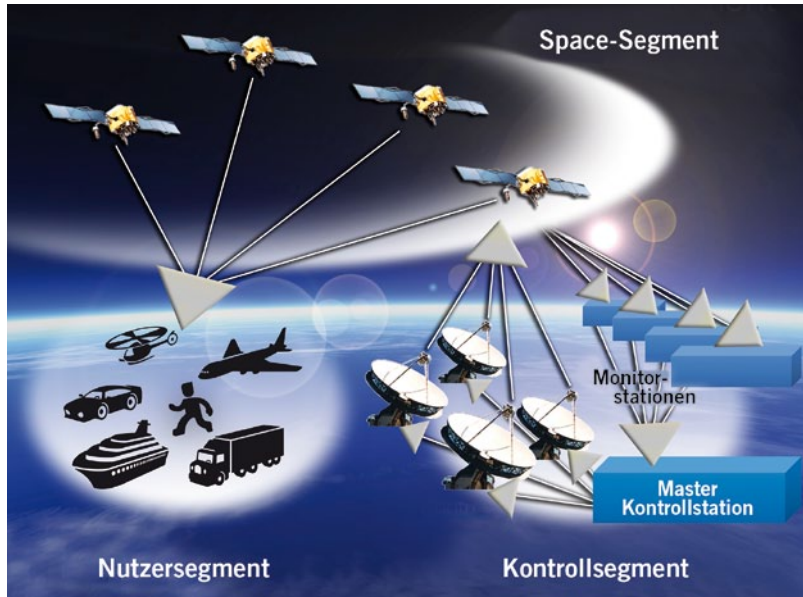
① zeigt die Bestandteile des GPS sowie das darin enthaltene Space Segment. Das Space-Segment-Modell übernimmt im virtuellen Fahrversuch dieselbe Funktion: Es stellt simulierte Navigationsdaten bereit. Das hier dargestellte Nutzersegment wird im Test vom simulierten GPS-Empfänger im virtuellen Fahrzeug repräsentiert. Das Control-Segment, das im realen GPS die Konstellation der Satelliten (Uhrzeiten, Bahndaten) überwacht, wird im Test durch das Einbinden aktueller Navigationsdaten dargestellt.

Während im physischen GPS Position und Uhrenfehler des Empfängers auf der Basis des Empfängerzeitpunkts des Satellitensignals sowie den Pseudoranges von mindestens vier Satelliten berechnet werden, sind die Positionsdaten des virtuellen Fahrzeugs bekannt. Daher sieht der Rechengang hier anders aus, ②. Zunächst muss die Position der Satelliten im Koordinatensystem des Sendezeitpunkts – das eigentliche Space-Segment-Modell. – berechnet werden.

Dieser Teil der Modellierung ist anspruchsvoll, weil sich die Position eines Satelliten im Koordinatensystem zum Sendezeitpunkt von seiner Position zum Empfangszeitpunkt unterscheidet. Wie groß diese Abweichung ist, hängt von der Laufzeit des Signals ab und diese wiederum ist abhängig von der Position des Satelliten. Folglich ist die Berechnung ein iteratives Verfahren in

sechs Einzelschritten, die teilweise wiederholt werden, bis sowohl die Satellitenposition zum Empfangszeitpunkt des Signals als auch die Signallaufzeit hinreichend genau ermittelt sind. Anschließend werden die für den virtuellen Fahrversuch benötigten Daten über die Satellitenpositionen und -geschwindigkeiten erzeugt, die an den simulierten GPS-Empfänger übergeben werden.

Da die Satellitenkonstellation des Modells orts- und zeitabhängig ist, muss beides vor dem Beginn einer virtuellen Testfahrt definiert werden. Dies geschieht in einer grafischen Benutzerschnittstelle (Graphic User Interface, GUI), ③. Dort wird auch der Elevationswinkel der Satelliten definiert, bis zu dem er für den GPS-Empfänger noch „sichtbar“ ist. Auch Abschattungen, durch hohe Gebäude oder Unterführungen, können in der GUI mit dem integrierten Abschattungsmodell aktiviert werden.



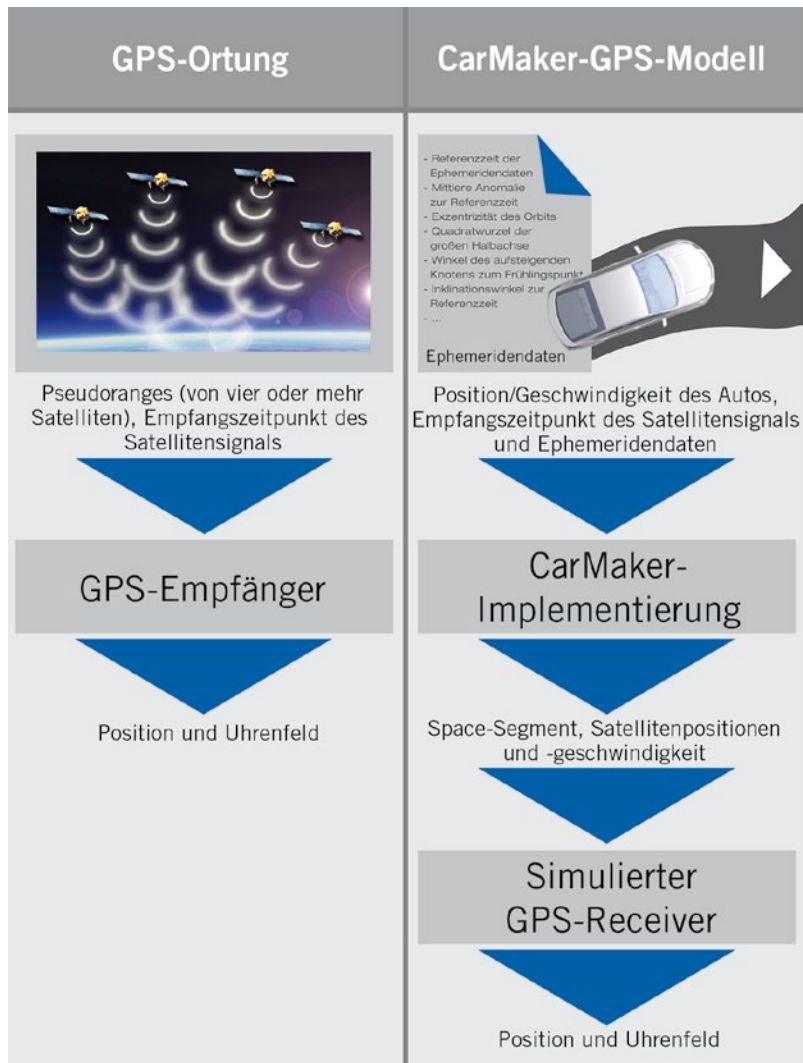
① Die Bestandteile des Global Positioning System

**NACHBILDUNG REALER FEHLER UND STÖREINFLÜSSE**

Um im virtuellen Fahrversuch valide Aussagen über eine Sensorfusionsarchitektur zu gewinnen, genügt es nicht, den Test unter Idealbedingungen zu absolvieren. Diese liegen im realen Fahrbetrieb ebenfalls nur zeitlich begrenzt vor. De facto wird eine Sensorfusion aus GPS und INS von relativ vielen Fehlerquellen und Störgrößen beeinflusst. Die Fehlertoleranz der zu testenden Funktion im Fahrzeug ist daher ein wichtiges Kriterium für die spätere Sicherheit und Zuverlässigkeit der Funktion. Für eine möglichst realistische Simulation sind daher im Space-Segment-Modell Fehlermodelle für die GPS-Sensorik und für die Inertialsensorik implementiert. Diese werden über die GUI bedient. ④ vermittelt beispielhaft einen Überblick über die möglichen GPS-Fehlerquellen.

Da sich einzelne Störgrößen und Fehler gezielt definieren und aktivieren lassen, können die Einflussgrößen sowohl einzeln als auch in Wechselwirkung analysiert werden. Damit ist bei auftretenden Funktionsstörungen die Möglichkeit zu einem „Drill-down“ bis zur eigentlichen Ursache gegeben. Dass diese Analysemöglichkeit unter gleich bleibenden äußeren Bedingungen erfolgt, macht den virtuellen Fahrversuch zu einem sehr leistungsfähigen Instrument.

Die Beschäftigung mit den einzelnen Fehlern und Störgrößen erklärt auch, warum sich GPS und INS gegenseitig gut ergänzen: Der GPS-Sensor ist relativ langsam, insge-

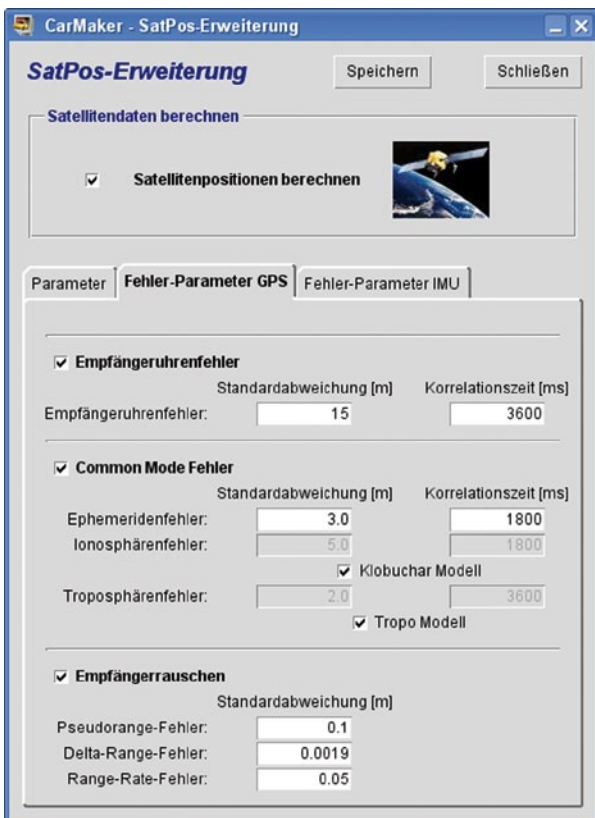


② Normale GPS-Ortung und Erzeugung des Space-Segment Modells im Vergleich





3 GUI zur Parametrierung der Daten für eine virtuelle Testfahrt



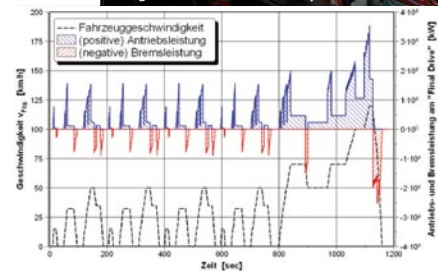
4 GUI zur Parametrierung beziehungsweise Aktivierung/Deaktivierung von GPS-Fehlerquellen



## Batterien sicher testen!

**Wir sind ihr Partner für:  
Hochdynamische Testsysteme zur  
Simulation von Lastprofilen, Bord-  
netzen und Antrieben von EV/HEV**

- Start/Stop-Tester bis 36V
- Modultester bis 150V
- Packtester bis 1000V
- Vollsinus-Netzurückspeisung
- Steuerung über Digatron Battery Manager<sup>®</sup> oder CAN
- Frei programmierbare oder Standard-Fahrzyklen



© TU Braunschweig

Digatron Industrie-Elektronik GmbH  
52068 Aachen · Tel.: 0241-168090  
www.digatron.com



samt aber langzeitgenau, während die Inertialsensorik Informationen über hoch dynamische Bewegungen liefert, wegen ihres Drift jedoch nur kurzzeitgenau ist. Mit der Sensorfusion wird daher ein dynamisches und langzeitgenaues Positionssignal gewonnen.

## MODELLIERTE GPS-FEHLER

Ein Überblick zeigt, welchen möglichen Einflüssen ein realer GPS-Sensor ausgesetzt ist: Neben dem Empfängeruhrenfehler sind dies Ungenauigkeiten in der Satellitenbahn sowie atmosphärische Einflüsse und das Empfängerrauschen. Ungenauigkeiten in der Umlaufbahn der Satelliten (Ephemeridenfehler) entstehen durch den Einfluss der Schwerkraft. Solche Abweichungen vom Sollkurs werden einerseits überwacht, andererseits auch korrigiert. Die exakten Bahndaten werden den Empfängern als Teil der Ephemeridendaten zur Verfügung gestellt. Daher ist dieser Fehlereinfluss relativ klein. Schwieriger zu kontrollieren sind Einflüsse der Ionosphäre (50 bis 1000 km Höhe) und der Troposphäre (bis zu 10 km Höhe). Hier liegt die Fehlerursache in Laufzeitverzögerungen und Strahlkrümmung, verursacht durch die freien Elektronen in der Ionosphäre beziehungsweise Luftdruck und Temperatur in der Troposphäre. Hinzu kommt ein zufälliger Fehler, der vom Messrauschen des GPS-Sensors verursacht wird. Im GUI lassen sich beide Fehlerarten, also zufällige und zeitlich korrelierte Fehler, getrennt und einzeln parametrieren.

## MODELLIERTE INERTIALSENSOREN-FEHLER

Auch die Inertialsensorik ist Fehlern und Störgrößen unterworfen. In einer Einheit aus Beschleunigungs- und Drehratensensoren (Inertial Measurement Unit, IMU) wirken sich Biasfehler, Skalenfaktorfehler sowie das Sensorrauschen aus. Auch diese Fehler werden in der GUI parametrieren. Mit Bias wird der Nullpunktfehler des Sensors sowie seine Scheindrehrate in  $^{\circ}/s$  oder  $^{\circ}/h$  beziehungsweise seine Scheinbeschleunigung in  $mg$  im ruhenden Zustand spezifiziert. Der Skalenfaktorfehler beziffert die ppm-Rate der Abweichung zwischen dem Anstieg des Sensorsignals und dem tatsächlichen Anstieg der Drehrate. Das Rauschen des Sensors

beeinflusst je nach Intensität die schnelle Erfassung von dynamischen Bewegungen, während sich die anderen Fehler eher langfristig auswirken.

Je nach Ausmaß der Fehler lassen sich die Sensoreinheiten in Qualitätsklassen unterteilen: In der Unterhaltungselektronik genügen oft kostengünstige IMUs, im Fahrzeug werden leistungsfähigere, präzisere IMUs benötigt. Die oberste Qualitätsklasse bildet die kostenintensive Inertialsensorik für militärische und Luftfahrtanwendungen. Für jeden Qualitätsbereich wurde ein exemplarischer Sensortyp mit charakteristischen Fehlern hinterlegt:

: Unterhaltungselektronik: MPU-6000 von InvenSense

: Automobil: MMQ50 von Systron Donner

: Luft- und Raumfahrt/Militär: SDI500 von Systron Donner.

Um dem Anwender größtmögliche Flexibilität zu geben, lassen sich im GUI auch die Fehlergrößen anderer IMUs nachbilden. Das ermöglicht den Test einzelner Sensorcluster hinsichtlich ihrer Eignung für eine bestimmte Fusionsarchitektur aus GPS und INS.

## ANWENDUNGSBEISPIELE

Es gibt zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für GPS/INS-basierte Integrations- und Fusionsalgorithmen mit spürgeauer Positionsbestimmung: etwa Spurhalte- und Abbiegeassistenten, Kollisionsschutzsysteme und viele mehr. Verbunden mit digitalem Kartenmaterial und einer Car-2-Car-Kommunikation vergrößert die Sensorfusion einerseits den Erfassungsbereich der Sensorik im Fahrzeug, andererseits kann die Position des eigenen Fahrzeugs umso präziser an andere Empfänger übermittelt werden.

Neben sicherheitskritischen Anwendungen gehört auch die Effizienzsteigerung zu den Anwendungsfeldern für die Sensorfusion mit GPS- und INS-Anteil. So profitiert eine vorausschauende Fahrstrategie, die in Abhängigkeit von Streckentopografie, Kreuzungen und Verkehrszeichen unnötige Lastwechsel zu vermeiden hilft, von einer spürgeauen Positionsbestimmung. Insbesondere Hybridfahrzeugen profitieren von einer solchen Fahrstrategie, um das Wechselspiel von Verbrennungs- und Elektromotor beziehungsweise Generator zu optimieren [2].

Das Spektrum für die GPS/INS-Sensorfusion reicht dabei über den Pkw-Bereich hinaus. Etwa die Entwicklung neuer Funktionen für Nutzfahrzeuge, wo die Kombination von GPS und INS vor allem dazu dient, die Produktivität von Arbeitsabläufen zu erhöhen. Ein konkretes Beispiel ist hier das Precision Farming als aktueller Trend in der Landwirtschaft.

## FAZIT

Bestand die Fahr dynamiksimulation CarMaker bisher aus den virtuellen Elementen Fahrzeug, Fahrer, Straße, Verkehr, digitale Karten sowie Umgebung/Bebauung, so kommt mit dem Space-Segment Modell noch ein GPS-Satellitensystem hinzu. Bei virtuellen Fahrversuchen mit dieser erweiterten Lösung lassen sich nicht nur die Funktion und Robustheit von Fusionsalgorithmen mit GPS-Anteil testen, zudem werden auch valide Aussagen über die Auswirkung dieser Funktion auf das Gesamtfahrzeug möglich. Damit sind lange vor der Serienreife umfassende Analysen und Bewertungen von Fusionsalgorithmen möglich. Neben der Bestätigung von Funktion und Robustheit ist vor allem auch die Möglichkeit zur detaillierten Fehleranalyse ein Beitrag zur frühzeitigen Absicherung der Systemreife.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Butz, T.: Implementierung eines Satelliten-Space-Segment Moduls in IPG CarMaker zur KFZ basierenden Integration. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institute of System Optimization, 2011
- [2] Schick, B.; Leonhard, V.; Lange, S.: Vorausschauendes Energiemanagement im virtuellen Fahrversuch. ATZ 04/2012, 114. Jahrgang
- [3] Katriniok, A.; Reiter, M.; Abel, D.: Kollisionsvermeidung mittels Galileo. Wiesbaden: ATZelektronik, Jahrgang 6, Nr. 1, 2011
- [4] Vietinghoff, A. von: Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2008
- [5] Schramm, D.; Hiller, M.; Bardini, R.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010



DOWNLOAD DES BEITRAGS  
[www.ATZonline.de](http://www.ATZonline.de)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
order your test issue now:  
[springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)