

Schlussbericht zum 31.03.2012 – öffentlicher Teil

Galileo for **F**uture **A**utomotive **S**ystems

FAMOS

Teilvorhaben: Institut für Flugführung

Förderkennzeichen: 19S9007D



erstellt von der ITS Niedersachsen GmbH und dem FAMOS-Team:

VOLKSWAGEN

AKTIENGESELLSCHAFT
(Konsortialführer)



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Dokumenten-Information

Projekt:	FAMOS – Galileo for Future Automotive Systems – Phase 2		
Dokumententitel:	FAMOS Schlussbericht zum 31.03.2012 – öffentlicher Teil		
Dokument ID:	FAMOS_SB-pu		
Vertraulichkeit:	<input type="checkbox"/> CO Projektteam-intern <input type="checkbox"/> RE Team, Auftraggeber, Projektträger <input checked="" type="checkbox"/> PU öffentlich		
Version:	1.0	Datum:	18.09.2012
		Seitenanzahl:	43
Dateiname:	FAMOS_Schlussbericht_IFF.docx		

Autoren:

Firma / Institut	Autor	Kapitel
ITS NDS	Ronald Peters	Vorlage
IFF	Hans-Georg Büsing	alle

Freigaben:

Funktion	Name	Datum	Unterschrift
Qualitätsmanager			
Projektmanager	Hans-Georg Büsing	15.06.2012	
Projektträger	Jürgen Frenzel, TÜV-PT		

Inhalt

Dokumenten-Information	2
Änderungsverfolgung	3
Inhalt	4
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Übersicht	6
1.1 Zuwendungsempfänger	6
1.2 Dokumentenübersicht	6
2 Einführung und Einordnung	7
2.1 Aufgabenstellung	7
2.2 Voraussetzungen	13
2.3 Planung und Ablauf	14
2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	15
2.4.1 Literaturquellen Institut für Flugführung, TU Braunschweig	15
2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	18
3 Projektumsetzung	19
3.1 Ergebnisse	19
3.1.1 Anforderungsanalyse	19
3.1.2 Voruntersuchung zur Bewertung der Zielumgebung	22
3.1.3 Umsetzung der Ortungsfusion	29
3.1.4 Systemtests	34
3.1.5 Testergebnisse	37
3.1.6 Zusammenfassung	41
3.2 Nutzen und Verwertbarkeit	41
3.3 Abgrenzung von anderen Projekten	42
3.4 Veröffentlichungen	42
4 Anhang 1 – Referenzen	43
4.1 Abkürzungen	43
4.2 Bezugsdokumente	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Detaillierter Strukturplan der Arbeitspakete FAMOS	8
Abbildung 3-1: Geometrischer Zusammenhang der Modellrechnung	21
Abbildung 3-2: „On-lane propability“ eines Fahrzeuges in Fahrstreifenmitte	21
Abbildung 3-3: Zweidimensionale Evaluationsmatrix	22
Abbildung 3-4: Szenarien der Messfahrten	23
Abbildung 3-5: SGPS Positionierungsgenauigkeit	25
Abbildung 3-6: EGNOS Positionierungsgenauigkeit	25
Abbildung 3-7: Positionierungsgenauigkeit von GPS mit „Range Corrections“ (RTCM 2.3 Message Type 1) von SAPOS	26
Abbildung 3-8: Positionierungsgenauigkeit von GPS mit EGNOS (links) und SAPOS (rechts)	26
Abbildung 3-9: DGPS Positionierungsgenauigkeit von auf Codebasis (links) und mit Hilfe der Trägerphasenmessung ohne gelöste Mehrdeutigkeiten (rechts)	27
Abbildung 3-10: Positionierungsverhalten verschiedener Fahrzeugsensorkonfigurationen in einer Situation mit gerader Trajektorie	28
Abbildung 3-11: Positionierungsverhalten verschiedener Fahrzeugsensorkonfigurationen in einer Situation mit gekrümmter Trajektorie	29

Abbildung 3-12: Typische Systemarchitektur in ADTF	31
Abbildung 3-13: Systemarchitektur des Positionierungsmoduls.....	31
Abbildung 3-14: Betriebsmodi der Ortungsfusion.....	32
Abbildung 3-15: Hardware zur Datenverarbeitung	34
Abbildung 3-16: Szenario der Testfahrt	35
Abbildung 3-17: Versuchsaufbau im Passat des Instituts für Flugführung	36
Abbildung 3-18: Evaluationsschema.....	37
Abbildung 3-19: Trajektorien unter optimalen und gestörten Satellitensichtbarkeitsbedingungen	38
Abbildung 3-20: Trajektorie in einem Wohngebiet	39
Abbildung 3-21: Positionierungsfehlerverteilung des FAMOS-Ortungsmoduls im Autobahn-Szenario.....	40
Abbildung 3-22: Kursfehlerverteilung des FAMOS-Ortungsmoduls im Autobahn-Szenario.....	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Anforderungen der SDF an die Ortungsfusion	20
Tabelle 3-2: Verfügbarkeit von RTK Lösungen	27
Tabelle 3-3: Relevante Projekte	42
Tabelle 3-4: Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen	42

1 Übersicht

1.1 Zuwendungsempfänger

Zuwendungsempfänger	Institut für Flugführung
Förderkennzeichen	19S9007D
Projektlaufzeit	01.08.2009 – 31.03.2012
Berichtszeitraum	01.08.2009 – 31.03.2012 (Schlussbericht)

1.2 Dokumentenübersicht

Dieses Dokument enthält Schlussbericht zum 31.03.2012 – öffentlicher Teil für das F&E-Vorhaben „Galileo for Future Automotive Systems / FAMOS – Phase 2“, Teilvorhaben Institut für Flugführung.

Kapitel 2 gibt eine Einordnung in Aufgabenstellung, Voraussetzungen des Projektes, Planung und Ablauf, den wissenschaftlich-technischen Stand, an den bei Projektbeginn angeknüpft wurde, sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen. Eine eingehende Darstellung des Projektablaufs und der Erlangung der Ergebnisse bietet Kapitel 3. In den Anlagen sind der Erfolgskontrollbericht sowie das Berichtsblatt aufgeführt.

2 Einführung und Einordnung

2.1 Aufgabenstellung

Das Projekt „FAMOS - Galileo for Future Automotive Systems“ wurde mit dem Ziel ins Leben gerufen, den zukünftigen Straßenverkehr in den Bereichen Sicherheit, Reduzierung der Umweltbelastung (CO₂) und Effizienz (Stauvermeidung) durch Fahrerassistenzsysteme zu optimieren. FAMOS zeigt hierbei den Nutzen und Mehrwert insbesondere von ortungsbasierten Anwendungen.

Die in FAMOS zu entwickelnden Fahrerassistenzsysteme stellen hohe Anforderungen an die Eigenschaften des Positionierungsmoduls. Mit GPS und dem Zusatzdienst EGNOS werden einzelne Anforderungen bereits erfüllt. Eine weitere Verbesserung lässt sich durch die Nutzung eines feiner aufgelösten Korrekturdatennetzes erreichen.

Systeme zur Positionierung werden üblicherweise durch die vier Merkmale Genauigkeit, Integrität, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit beschrieben. Ziel von FAMOS ist es, in allen vier Bereichen deutliche Verbesserungen zu erzielen.

Die Absolutgenauigkeit beschreibt die Abweichung zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Position. In FAMOS haben sich die Projektpartner darauf verständigt, dass eine Absolutgenauigkeit mit der Standardabweichung 1 m das Projektziel ist.

Als Systemintegrität bezeichnet man die Fähigkeit eines Systems, dem Nutzer zu melden, wenn das System den spezifizierten Performancelevel verletzt. Ursachen dafür können u.a. Ausfälle im Satellitensegment oder Uhrenprobleme im Satelliten sein.

Um eine hohe Akzeptanz der Endkunden zu erreichen, müssen die genutzten Dienste ihre Leistungen garantieren. GPS bietet derzeit keine garantierte Leistung. Die Leistungsparameter von GPS basieren auf Erfahrungswerten und können Schwankungen unterlegen sein. Die Dienste von Galileo sollen klar definierte Service Level bieten.

Die Verfügbarkeit eines Systems ist definiert über den Zeitraum, zu dem das System in der Lage ist die benötigte Genauigkeit, Integrität und Zuverlässigkeit zu erfüllen. Sie ist also direkt von den drei zuvor genannten Punkten abhängig. Alle FAMOS-Applikationen benötigen eine sehr hohe Verfügbarkeit der Ortungslösung, da die Applikationen im Falle der Nicht-Verfügbarkeit deaktiviert werden. Die Verfügbarkeit in FAMOS wird insbesondere durch die Fusion von GNSS-Rohdaten mit den Messungen der Fahrdynamiksensoren erreicht.

Die Aufgaben des Instituts für Flugführung der TU Braunschweig sind die Mitwirkung am Entwurf der Systemarchitektur, die Entwicklung einer Ortungsfusion, die Integration der Fusion in die Fahrzeugplattform sowie die Evaluation der Fusion.

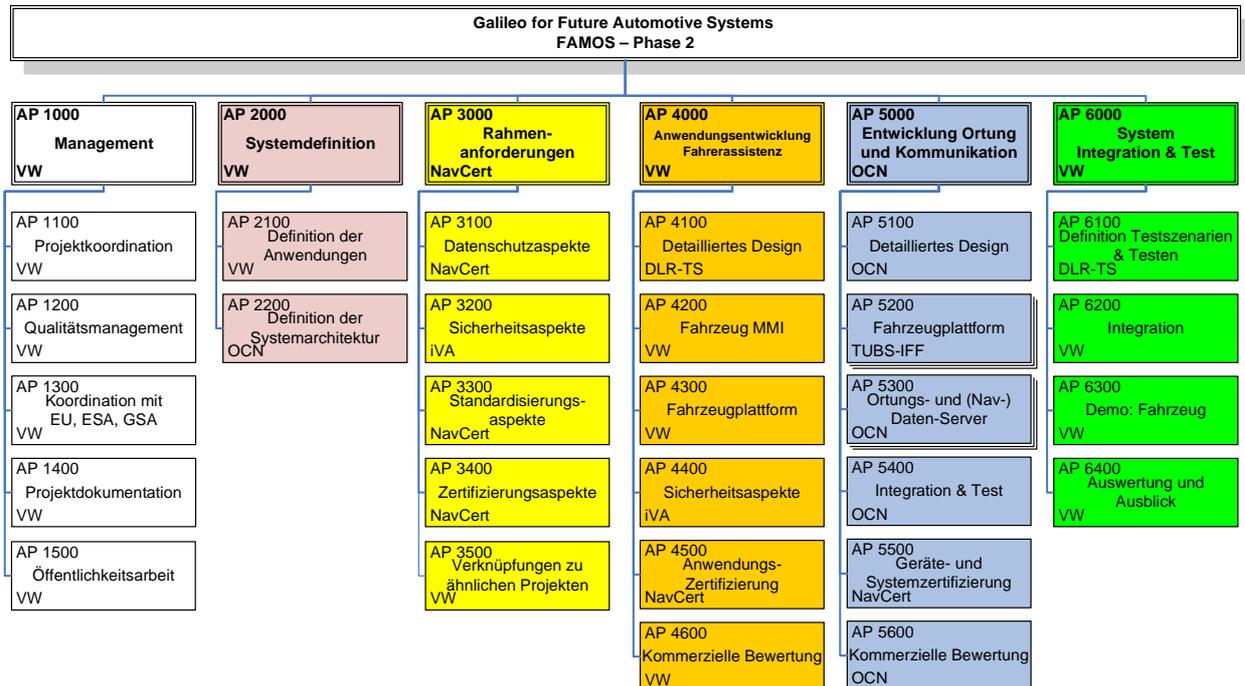


Abbildung 2-1: Detaillierter Strukturplan der Arbeitspakete FAMOS

Das Institut für Flugführung der TU Braunschweig wirkte im AP 2200 an der Systemarchitektur mit. Das IFF hat das AP 5200 zum Aufbau der Fahrzeugplattform, dabei insbesondere die Entwicklung der Ortungsfusion, geleitet und implementiert sowie die Integration und Test der Plattform ausgeführt, sowie an der Schnittstellendefinition des Ortungs- und (Nav-)Daten-Servers (AP 5300) mitgewirkt.

Die Anforderungen an die Ortungsfusion für Automotive-Anwendungen (spez. für die in FAMOS angestrebten Applikationen) impliziert die Entwicklung einer GNSS-Software auf Rohdatenbasis. Das IFF begleitet dann die Integration der GNSS-Software in das Gesamtsystem und während der Tests im AP 6000.



Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 2200
Titel: Definition der Systemarchitektur	
Ziel: Definition der Systemarchitektur für FAMOS	
Beschreibung: Die zentrale Komponente in der FAMOS-Systemarchitektur ist die Fahrzeugplattform. Sie ist in der Lage, mit dem Ortungs- und (Nav-)Daten-Server sowie ggf. mit einer lokalen Infrastruktur zu kommunizieren. Innerhalb der Fahrzeugplattform existiert ein Fahrzeugnetzwerk, über das die Subsysteme miteinander kommunizieren können und in Echtzeit Zugriff auf die Sensoren und Aktoren haben. Die angesprochenen Subsysteme sind das Fahrerassistenzsystem und das Ortungssystem. Beide Subsysteme bedienen sich der vorhandenen oder im Projekt entwickelten Sensoren. Für die direkte Einflussnahme auf das Fahrzeug steht eine Reihe von Aktoren zur Verfügung.	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">• Entwicklung einer Systemarchitektur für die Ortungsfusion als Input für das AP 5100• Definition von daraus resultierenden Schnittstellen	

Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 5100
Titel: Detailliertes Design	
Ziel: Detailliertes Design zur Entwicklung von Ortung und Kommunikation	
Beschreibung: Das AP 5100 definiert detailliert die Ortungs- und Kommunikationssysteme, welche in AP 2200 beschrieben und zur Umsetzung ausgewählt wurden. Dazu sollen zunächst die Anforderungen an die Ortungs- und Kommunikationssysteme zusammengetragen und bewertet werden. Aufbauend darauf werden Funktionalitäten und Eigenschaften definiert und in einem detaillierten Design umgesetzt. Darauf basierend erfolgt dann die Definition der System-Architektur, der einzelnen Komponenten, sowie der notwendigen Schnittstellen der Komponenten untereinander. Dies sind Schnittstellen zum Fahrzeug, zur Infrastruktur und zum Ortungs- und (Nav-)Daten-Server. Des Weiteren umfasst das Arbeitspaket die Spezifikation des notwendigen Ortungs- und (Nav-)Daten-Servers.	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">– Zusammenarbeit mit OCN beim Detaillierten Design– Schwerpunkt beim Design der Ortungssoftware– Abstimmung und Koordination der Schnittstelle zum GNSS-Empfänger sowie zu sonstigen Sensorsystemen	



Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 5200
Titel: Fahrzeugplattform	
Ziel: Entwicklung der Fahrzeugplattform	
Beschreibung: Die Entwicklung der Fahrzeugplattform gliedert sich in folgende Unterpunkte: <ul style="list-style-type: none">– GNSS-Empfänger– GNSS-Software– Management-Modul– Communication-Router (COM-Router)– Fahrzeugnetzwerk– Integration & Test der Fahrzeugplattform	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">– Entwicklung einer Ortungssoftware entsprechend dem Designdokument aus AP 5100– Verifikation der Software mit Hilfe hochwertiger GNSS-Empfänger– Anpassung der Software an die mit der Nutzung von <i>Low-cost</i>-Empfängern verbundenen Randbedingungen– Verifikation der Anpassungen mit Hilfe von <i>Low-cost</i>-Empfängern– Anpassung der Software an den Empfänger aus AP 5210– Verifikation der Anpassungen mit Hilfe von Testdaten aus AP 5210– Integration & Test der Fahrzeugplattform	



Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 5300
Titel: Ortungs- und (Nav-)Daten-Server	
Ziel: Die in AP 5300 zu entwickelnden Komponenten des Ortungs- und (Nav-)Daten-Servers dienen hauptsächlich dem Zweck, den Ortungsprozess zu unterstützen, also die Fahrzeugplattform mit entsprechenden Daten zu versorgen.	
Beschreibung: Die Entwicklung des Ortungs- und (Nav-)Daten-Servers gliedert sich in folgende Unterpunkte: <ul style="list-style-type: none">– Server-Architektur– A-GNSS– Management-Modul– Wireless-Communication-Router (COM-Router)– Schnittstelle Externe-Services– Integration & Test	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">– Definition und Entwicklung von A-GNSS– Beschaffung der Hardware für A-GNSS und Datenaquisition– Test der Hardware-Integration & Test von A-GNSS	

Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 6200
Titel: Integration	
Ziel: Integration aller Komponenten von FAMOS in den gemeinsamen Versuchsträger	
Beschreibung: Im Versuchsträger werden die Software der Fahrerassistenzsysteme aus AP 4000 und das Ortungs- und Kommunikationssystem aus AP 5000 zusammengeführt. Weiterhin wird die Anbindung der Fahrzeugplattform an den Ortungs- und (Nav-)Daten-Server aus AP 5300 hergestellt.	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">– Integration der Ortungssoftware und Tests in der Fahrzeugumgebung	



Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 6300
Titel: Demo: Fahrzeug	
Ziel: Demonstration der Fahrerassistenzfunktionen im öffentlichen Straßenverkehr.	
Beschreibung: Im Rahmen dieses Arbeitspunktes soll die Funktion der Fahrerassistenzfunktionen im öffentlichen Straßenverkehr vorgestellt werden.	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">– Unterstützung der Demonstration im Fahrzeug in Bezug auf die Ortungssoftware und A-GNSS	

Projekt: FAMOS Galileo for Future Automotive Systems	AP-NR.: 6400
Titel: Auswertung und Ausblick	
Ziel: Wertung der Testergebnisse und Ausblick für Markteinführung	
Beschreibung: Die Testergebnisse werden wertend zusammengefasst hinsichtlich der Anforderungen der Dienste, das Erreichen dieser Anforderungen und ggf. Bedingungen, unter denen die Anforderungen erfüllt wurden bzw. künftig erfüllt werden können. Der Aufwand für die Markteinführung wird abgeschätzt und ein Zeitplan dafür entworfen werden.	
Aufgaben TUBS-IFF: <ul style="list-style-type: none">– Unterstützung bei der Auswertung der Tests im Hinblick auf die Ortungskomponente	

2.2 Voraussetzungen

Beim Vorhaben „Galileo for Future Automotive Systems / FAMOS – Phase 2“ handelt es sich um ein Vorhaben, bei dem die Arbeitspakete des Instituts für Flugführung zu 100% von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die TÜV Rheinland Consulting GmbH gefördert wurden.

Die beteiligten Projektpartner waren:

- Volkswagen AG
- DLR Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung
- Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen
- IMST GmbH
- NavCert GmbH
- OECON GmbH
- Institut für Flugführung, TU Braunschweig
- Instituts für Psychologie, TU Braunschweig
- Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig

2.3 Planung und Ablauf

Die Projektlaufzeit gemäß dem Antrag ist eingehalten worden. Alle Arbeitspakete des Instituts für Flugführung sind in der verlängerten Laufzeit abgearbeitet worden. Im Folgenden ist der Zeitplan dargestellt.

ID	WBS Code	Aufgabe	Start	Ende	Dauer	2009				2010				2011	
						Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	M1	Projektstart (Kick-off)	11.08.2009	11.08.2009	0w	△ M1: Kick-off Meeting									
2	PM1	Zwischenstand (Progress Meeting #1)	02.11.2009	02.11.2009	0w	◇ PM#1									
3	PM2	Zwischenstand (Progress Meeting #2)	15.03.2010	15.03.2010	0w	◇ PM#2									
4	M2	Abschluß der Entwurfsphase (Design Review)	05.07.2010	05.07.2010	0w	△ M2: Design Review									
5	M3	Zwischenstand (Mid-term Review)	01.12.2010	01.12.2010	0w	△ M3: Mid-term Review									
6	PM3	Zwischenstand (Progress Meeting #3)	03.03.2011	03.03.2011	0w	◇ PM#3									
7	PM4	Zwischenstand (Progress Meeting #4)	04.07.2011	04.07.2011	0w	◇ PM#4									
8	M4	Demonstrationsstart (Demo Readiness Review)	01.11.2011	01.11.2011	0w	M4: Demonstrationsstart △									
9	M5	Abschluß (Final Review)	29.03.2012	29.03.2012	0w	M5: Abschluß (Final Review) △									
10	1000	Management	03.08.2009	30.03.2012	139w	▼									
11	1100	Projektkoordination	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
12	1200	Qualitätsmanagement	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
13	1300	Koordination mit EU, ESA, GSA	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
14	1400	Projektdokumentation	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
15	1500	Öffentlichkeitsarbeit	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
16	2000	Systemdefinition	03.08.2009	30.10.2009	13w	▼									
17	2100	Definition der Anwendungen	03.08.2009	30.10.2009	13w	▬									
18	2200	Definition der Systemarchitektur	03.08.2009	30.10.2009	13w	▬									
19	3000	Rahmenanforderungen	03.08.2009	30.03.2012	139w	▼									
20	3100	Datenschutzaspekte	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
21	3200	Sicherheitsaspekte	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
22	3300	Standardisierungsaspekte	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
23	3400	Zertifizierungsaspekte	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
24	3500	Verknüpfung zu ähnlichen Projekten	03.08.2009	30.03.2012	139w	▬									
25	4000	Anwendungsentwicklung Fahrerassistenz	02.11.2009	30.03.2012	126w	▼									
26	4100	Detailliertes Design	02.11.2009	30.06.2010	34,6w	▬									
27	4200	Fahrzeug MMI	01.07.2010	30.08.2011	60,8w	▬									
28	4300	Fahrzeug Plattform	01.07.2010	30.08.2011	60,8w	▬									
29	4400	Sicherheitsaspekte	02.11.2009	30.03.2012	126w	▬									
30	4500	Anwendungszertifizierung	02.11.2009	30.03.2012	126w	▬									
31	4600	Kommerzielle Bewertung	02.11.2009	30.03.2012	126w	▬									
32	5000	Entwicklung Ortung und Kommunikation	02.11.2009	30.03.2012	126w	▼									
33	5100	Detailliertes Design	02.11.2009	30.06.2010	34,6w	▬									
34	5200	Fahrzeugplattform	01.07.2010	30.08.2011	60,8w	▬									
35	5300	Ortungs- und (Nav-)Daten-Server	01.07.2010	30.08.2011	60,8w	▬									
36	5400	Integration & Test	02.05.2011	31.10.2011	26,2w	▬									
37	5500	Geräte- und Systemzertifizierung	02.11.2009	30.03.2012	126w	▬									
38	5600	Kommerzielle Bewertung	02.11.2009	30.03.2012	126w	▬									
39	6000	System Integration & Test	01.12.2010	30.03.2012	69,6w	▼									
40	6100	Definition Testszzenarien & Testen	01.12.2010	31.10.2011	47,8w	▬									
41	6200	Integration	01.09.2011	31.01.2012	21,8w	▬									
42	6300	Demo: Fahrzeug	01.11.2011	31.01.2012	13,2w	▬									
43	6400	Auswertung und Ausblick	01.02.2012	30.03.2012	8,6w	▬									

2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

2.4.1 Literaturquellen Institut für Flugführung, TU Braunschweig

- [1] S. ALBAN, D.M. AKOS, S.M. ROCK. „PERFORMANCE ANALYSIS AND ARCHITECTURES FOR INS-AIDED GPS TRACKING LOOPS“ INSTITUTE OF NAVIGATION – NTM, ANAHEIM, CA, 2003.
- [2] U. BESTMANN, M. STEEN, M. BECKER, A. SASSE, P. HECKER; COMPARISON OF STATE AND ERROR STATE INS COUPLING FILTER BASED ON REAL TEST DATA; PROCEEDINGS OF THE 20. INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, ION GNSS 2007; FORTH WORTH, TEXAS 2007
- [3] U. BESTMANN. ENTWURF EINES EXIBLEN SYSTEMKONZEPTS FÜR DIE ECHTZEITFÄHIGE KOPPLUNG VON TRÄGHEITS- UND SATELLITENORTUNGSSSENSOREN. DIPLOMARBEIT AM INSTITUT FÜR FLUGFÜHRUNG, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, 2004
- [4] R. G. BROWN, P. Y.C. HWANG “INTRODUCTION TO RANDOM SIGNALS AND APPLIED KALMAN FILTERING” VOLUME 2, JOHN WILEY & SONS INC, NEW YORK, 1983
- [5] JOHN W. BETZ; LT. BRYAN M. TITUS, INTERSYSTEM AND INTRASYSTEM INTERFACE WITH SIGNAL IMPERFECTIONS FEB.2004
- [6] BROWN, R. UND HWANG, P., INTRODUCTION TO RANDOM SIGNALS AND APPLIED KALMAN FILTERING, ZWEITE AUFLAGE, NEW YORK, 1992.
- [7] CHEN, ZHE; *Bayesian FILTERING: FROM Kalman FILTERS TO PARTICLE FILTERS, AND BEYOND*; NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING RESEARCH COUNCIL OF CANADA; REVIEW PAPER; NOT REFERENCED; ACCESSED ONLINE USERS.ISR.IST.UTL.PT/~JPG/TFC0607/CHEN_bayesian.PDF ON 14/02/2007
- [8] K.W. CHEUNG, H.C. SO, W.K. MA, Y.T. CHAN, LEAST SQUARES ALGORITHMS FOR TIME-OF-ARRIVAL-BASED MOBILE LOCATION, IEEE TRANS. SIGNAL PROCESS. 52 (APRIL 2004) 1121–1128.
- [9] CRASSIDIS, J. L. – *SIGMA POINT Kalman FILTERING FOR INTEGRATED GPS AND INERTIAL NAVIGATION*, AIAA PAPER 2005-6052; AIAA GUIDANCE, NAVIGATION, AND CONTROL CONFERENCE; SAN FRANCISCO, CA; AUG. 2005
- [10] DOUCET, A.; GODSILL S.; ANDRIEU: C. – *ON SEQUENTIAL MONTE CARLO SAMPLING METHODS FOR Bayesian FILTERING*. STATISTICS AND COMPUTING (2000) **10**, 197–208.
- [11] DOW, J.M., NEILAN, R.E., WEBER, R., GENDT, G., GALILEO AND THE IGS: TAKING ADVANTAGE OF MULTIPLE GNSS CONSTELLATIONS, ADVANCES IN SPACE RESEARCH (2007), DOI: 10.1016/J.ASR.2007.04.064
- [12] EUROCAE. ED-114: MINIMUM OPERATIONAL PERFORMANCE SPECIFICATION FOR GLOBAL NAVIGATION SATELLITE GROUND BASED AUGMENTATION SYSTEM GROUND EQUIPMENT TO SUPPORT CATEGORY I OPERATIONS, SEP. 2003
- [13] EUROPEAN SPACE AGENCY / EUROPEAN GNSS SUPERVISORY AUTHORITY (2008): GALILEO OPEN SERVICE, SIGNAL IN SPACE INTERFACE CONTROL DOCUMENT, OS SIS ICD, DRAFT 1, PP. 24-25, 2008
- [14] FARRELL, J. A., BARTH, M. (1999): THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM & INERTIAL NAVIGATION, MCGRAW-HILL COMPANIES, PP. 155-157, NEW YORK, 1999
- [15] R. FLETCHER, M.J.D. POWELL, A RAPIDLY CONVERGENT DESCENT METHOD FOR MINIMIZATION, COMPUT. J. 6 (1963) 163–168.
- [16] R. FLETCHER, PRACTICAL METHODS OF OPTIMIZATION, WILEY, CHICHESTER, 1987.
- [17] W.H. FOY, POSITION-LOCATION SOLUTIONS BY TAYLOR-SERIES ESTIMATION, IEEE TRANS. AEROSPACE ELECTRONIC SYSTEMS 12 (MARCH 1976) 187–194.
- [18] D. C. FRASER AND J. E. POTTER. “THE OPTIMUM LINEAR SMOOTHER AS A COMBINATION OF TWO OPTIMUM LINEAR FILTERS” IEEE TRANS. ON AUTO. CONTROL, AD-14: NO. 4, 387 1969
- [19] D. C. FRASER “A NEW TECHNIQUE FOR THE OPTIMAL SMOOTHING OF DATA” PH .D. DISSERTATION MIT, CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, 1967
- [20] B. FRIEDLANDER, A PASSIVE LOCALIZATION ALGORITHM AND ITS ACCURACY ANALYSIS, IEEE J. OCEAN. ENG. 12 (JANUARY 1987) 234–245.
- [21] FRYKMAN, PETER; *APPLIED PARTICLE FILTERS IN INTEGRATED AIRCRAFT NAVIGATION*; MASTER THESIS, LITH-ISY-EX-3406-2003; DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING LINKÖPING UNIVERSITY; LINKÖPING 2003
- [22] A. GELB “APPLIED OPTIMAL ESTIMATION” CAMBRIDGE, MASS.: MIT PRESS 1 1974

- [23] GOSHEN-MESKIN, D., BAR-ITZHACK, I.Y. – *UNIFIED APPROACH TO INERTIAL NAVIGATION SYSTEM ERROR MODELING*, JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL AND DYNAMICS, VOL. 15, NO. 3, P. 648-653, MAY-JUNE 1992.
- [24] GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. – *GLOBAL POSITIONING SYSTEMS, INERTIAL NAVIGATION, AND INTEGRATION*, JOHN WILEY & SONS INC., NEW YORK, 2001.
- [25] GREWAL, M. S., WEILL, L. R., ANDREWS, A. P. (2007): *GLOBAL POSITIONING SYSTEMS, INERTIAL NAVIGATION, AND INTEGRATION (SECOND EDITION)*, WILEY-INTERCHIENCE, PP. 151-164, NEW JERSEY, 2007
- [26] GIREMUS, A.; DOUCET, A.; ESCHER, A. C.; TOURNERET: J.Y. – *NON LINEAR FILTERING APPROACHES FOR INS-GPS INTEGRATION*.
- [27] GIREMUS, AUDREY, DOUCET, ARNAUD, CALMETTES, VINCENT AND TOURNERET, JEAN.YVES; *A RAO-BLACKWELLIZED PARTICLE FILTER FOR INS/GPS INTEGRATION*; INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING; 17-21 MAY 2004; VOLUME: 3, 964-7
- [28] GUSTAFSSON, F., GUNNARSSON, F., BERGMANN, N., FORSELL, U., JANSSON, J., KARLSSON, R., NORDLUND, P.-J. – *PARTICLE FILTERS FOR POSITIONING, NAVIGATION AND TRACKING*; IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 50, NR. 2, 425-437, 2002T.
- [29] B. HOFMANN-WELLENHOF, H. LICHTENEGGER, J. COLLINS. *GPS – THEORY AND PRACTICE*. SPRINGER-VERLAG, WIEN, AUSTRIA, 2001. 5. AUFLAGE.
- [30] HAUG, A. J. – *A TUTORIAL ON BAYESIAN ESTIMATION AND TRACKING TECHNIQUES APPLICABLE TO NONLINEAR AND NON-GAUSSIAN PROCESSES*, THE MITRE.
- [31] HJORTSMARKER, NIKLAS; *EXPERIMENTAL SYSTEM FOR VALIDATING GPS/INS INTEGRATION ALGORITHMS*; MASTER THESIS, DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE AND ELECTRICAL ENGINEERING, DIVISION OF ROBOTICS AND AUTOMATION, LULEA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY; 2005
- [32] ICAO: INTERNATIONAL STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES “AERONAUTICAL TELECOMMUNICATIONS”, ANNEX 10 TO THE CONVENTION ON INTERNATIONAL CIVIL AVIATION VOLUME1, FIFTH EDITION – 1996
- [33] JULIER, S.J. UND UHLMANN, J.K., A NEW EXTENSION OF THE KALMAN FILTER TO NONLINEAR SYSTEMS, INT. SYMP. AEROSPACE/DEFENSE SENSING, SIMUL. AND CONTROLS, 1997.
- [34] JULIER, S. J., UHLMANN, J. K. – *REDUCED SIGMA POINT FILTERS FOR THE PROPAGATION OF MEANS AND COVARIANCES THROUGH NONLINEAR TRANSFORMATIONS*; PROCEEDINGS OF THE 2002 AMERICAN CONTROL CONFERENCE, VOL. 2, P. 887-892, 2002.
- [35] T. KAILATH “SUPPLEMENT TO: A SURVEY OF DATA SMOOTHING” AUTOMATICA 11, 109-111, 1975
- [36] R. E. KALMAN. A NEW APPROACH TO LINEAR FILTERING AND PREDICTION PROBLEMS. *JOURNAL OF BASIC ENGINEERING*, 82(1):35–45, 1960
- [37] KARLSSON, R., GUSTAFSSON, F., KARLSSON, T. – *PARTICLE FILTERING AND CRAMÉR-RAO LOWER BOUND FOR UNDERWATER NAVIGATION*, IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, VOL. 6, 65-8, 2003
- [38] KARLSSON, R.; SCHÖN, TH.; GUSTAFSSON, F.: *COMPLEXITY ANALYSIS OF THE MARGINALIZED PARTICLE FILTER*; IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 53, NO. 11, NOVEMBER 2005.
- [39] JAN KOUBA. „A GUIDE TO USING INTERNATIONAL GPS SERVICE (IGS) PRODUCTS”. MAY 2009. [HTTP://IGSCB.JPL.NASA.GOV/IGSCB/RESOURCE/PUBS/USINGIGSPRODUCTSVER21.PDF](http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/usingigsproductsver21.pdf)
- [40] LEE, Y. C., O’LAUGHLIN, D. G. – *A PERFORMANCE ANALYSIS OF A TIGHTLY COUPLED GPS/INERTIAL SYSTEM FOR TWO INTEGRITY MONITORING METHODS*, THE MITRE CORPORATION, CENTER FOR ADVANCED AVIATION SYSTEM DEVELOPMENT (CAASD), MCLEAN, VA 22102, PP. 1-14
- [41] W. MANSFELD. "SATELLITENORTUNG UND NAVIGATION – GRUNDLAGEN UND ANWENDUNG GLOBALER SATELLITENNAVIGATIONSSYSTEME", FRIEDR. VIEWEG & SOHN VERLAG, WIESBADEN, DEUTSCHLAND. 2. AUFLAGE MÄRZ 2001
- [42] D. MARQUARDT, ALGORITHM FOR LEAST-SQUARES ESTIMATION OF NONLINEAR PARAMETERS, SIAM J. APPL. MATH. 11 (1963) 431–441.
- [43] P. S. MAYBECK “STOCHASTIC MODELS, ESTIMATION, AND CONTROL” VOLUME 1, ACADEMIC PRESS, NEW YORK 1979
- [44] J.S. MEDITCH. "STOCHASTIC OPTIMAL LINEAR ESTIMATION AND CONTROL" NEW YORK, 1969
- [45] J.S. MEDITCH “A SURVEY OF DATA SMOOTHING” AUTOMATICA 9, 151-162, 1973

- [46] R. VAN DER MERWE. *SIGMA-POINT KALMAN FILTERS FOR PROBABILISTIC INFERENCE IN DYNAMIC STATE-SPACE MODELS*. PHD THESIS, OGI SCHOOL OF SCIENCE & ENGINEERING AT OREGON HEALTH & SCIENCE UNIVERSITY, 2004
- [47] VAN DER MERWE, R., WAN, E. A. – *SIGMA-POINT KALMAN FILTERS FOR PROBABILISTIC INFERENCE IN DYNAMIC STATE-SPACE MODELS*. IN WORKSHOP ON ADVANCES IN MACHINE LEARNING, MONTREAL, JUNE 2003.
- [48] VAN DER MERWE, R., WAN, E. A. – *SIGMA-POINT KALMAN FILTERS FOR INTEGRATED NAVIGATION*, PROCEEDINGS OF THE 60TH ANNUAL MEETING OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 641-654, DAYTON, OH, JUNE 7-9 2004
- [49] VAN DER MERWE, R., WAN, E. A. – *THE SQUARE-ROOT UNSCENTED Kalman FILTER FOR STATE AND PARAMETER-ESTIMATION*, IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING; VOL. 6, 3461-3464; MAY 2001
- [50] NORDLUND, P.-J., GUSTAFSSON, F. – *RECURSIVE ESTIMATION OF 3-DIMENSIONAL AIRCRAFT POSITION USING TERRAIN-AIDED POSITIONING*, LINKÖPING UNIVERSITY, DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING; LINKÖPING
- [51] H.C. SCHAU, A.Z. ROBINSON, PASSIVE SOURCE LOCATION EMPLOYING INTERSECTING SPHERICAL SURFACES FROM TIME-OF-ARRIVAL DIFFERENCES, IEEE TRANS. ACOUST. SPEECH SIGNAL PROCESS. 35 (AUGUST 1987) 1223–1225.
- [52] B.W. PARKINSON, J.J. SPILKER JR. "GLOBAL POSITIONING SYSTEM: THEORY AND APPLICATIONS" VOL. I & II, PROGRESS IN ASTRONAUTICS AND AERONAUTICS. AIAA, WASHINGTON DC, 1996.
- [53] JOHN G. PROAKIS, MASOUD SALEHI. "DIGITAL COMMUNICATIONS ", MCGRAW-HILL, NEW YORK. 5. AUFLAGE, 2007
- [54] M. G. PETOVELLO, O. MEZENTSEV, G. LACHAPPELLE, AND M. E. CANNON. HIGH SENSITIVITY GPS VELOCITY UPDATES FOR PERSONAL INDOOR NAVIGATION USING INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS. *PROCEEDINGS OF ION GPS/GNSS (SEPTEMBER 9-12 2003, PORTLAND OR)*, PAGES 2886–2896, 2003
- [55] H. E. RAUCH. "SOLUTIONS TO THE LINEAR SMOOTHING PROBLEM" IEEE TRANS. ON AUTO. CONTROL, AC-8: 371 1963
- [56] H. E. RAUCH, F. TUNG, AND C. T. STRIEBEL. „MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATES OF LINEAR DYNAMIC SYSTEMS“ AIAA J., 3: 1445 1965
- [57] RAY, J., MITIGATION OF GPS CODE AND CARRIER PHASE MULTIPATH EFFECTS USING A MULTI-ANTENNA SYSTEM. PHD THESIS. DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING, UNIVERSITY OF CALGARY.
- [58] RAY, J. K.: USE OF MULTIPLE ANTENNAS TO MITIGATE CARRIER PHASE MULTIPATH IN REFERENCE STATIONS, ION GPS 1999, NASHVILLE, TN
- [59] RISTIC, B., ARULAMPALAM, S. UND GORDON, N., BEYOND THE KALMAN FILTER, ARTECH HOUSE PUBLISHERS, 2004.
- [60] G. SCHÄNZER; HIGH PRECISION INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR VEHICLE GUIDANCE; 6. ST. PETERSBURG CONFERENCE ON INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS; ST. PETERSBURG 1999
- [61] ROSS, S. M. – INTRODUCTION TO PROBABILITY MODELS.
- [62] RISTIC, B.; ARULAMPALAM, S.; GORDON, N.: *BEYOND THE KALMAN FILTER – PARTICLE FILTERS FOR TRACKING APPLICATIONS*. BOSTON, LONDON: 2004.
- [63] SCHÖN, TH.; *ESTIMATION OF NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS - THEORY AND APPLICATIONS*; THESIS, DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING, LINKÖPINGS UNIVERSITY; LINKÖPING, SWEDEN, 2006
- [64] SCHÖN, TH.; GUSTAFSSON, F.; NORDLUND, P.-J.; *MARGINALIZED PARTICLE FILTERS FOR MIXED LINEAR/NONLINEAR STATE-SPACE MODELS*; IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 53, NO. 7, JULY 2005.
- [65] SCHÖN, TH.; KARLSSON, R.; GUSTAFSSON, F.: THE MARGINALIZED PARTICLE FILTER – ANALYSIS, APPLICATIONS, AND GENERALIZATIONS.
- [66] S. W. SHEPPERD. QUATERNION FROM ROTATION MATRIX. *JOURNAL OF GUIDANCE AND CONTROL*, 1(3):223–224, 1978
- [67] J.O. SMITH, J.S. ABEL, CLOSED-FORM LEAST SQUARES SOURCE LOCATION ESTIMATION FROM RANGE DIFFERENCE MEASUREMENTS, IEEE TRANS. ACOUST. SPEECH SIGNAL PROCESS. 35 (DECEMBER 1987) 1661–1669.
- [68] TORRIERI, D., STATISTICAL THEORY OF PASSIVE LOCATION SYSTEMS, IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS, 1984.

-
- [69] TODD WALTER, PER ENGE. „WEIGHTED RAIM FOR PRECISION APPROACH“. ION GPS 1995
- [70] WAN, E. A., VAN DER MERWE, R. – *THE UNSCENTED KALMAN FILTER FOR NONLINEAR ESTIMATION*, THE IEEE 2000 SYMPOSIUM ON ADAPTIVE SYSTEMS FOR SIGNAL PROCESSING, COMMUNICATIONS, AND CONTROL; 153-158; OCTOBER 2000
- [71] LEE, Y. C., O’LAUGHLIN, D. G. – A PERFORMANCE ANALYSIS OF A TIGHTLY COUPLED GPS/INERTIAL SYSTEM FOR TWO INTEGRITY MONITORING METHODS, THE MITRE CORPORATION, CENTER FOR ADVANCED AVIATION SYSTEM DEVELOPMENT (CAASD), MCLEAN, VA 22102, PP. 1-14
- [72] ZIEGLER, CHRISTIAN, ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG IM BEREICH DER HOCHGENAUEN POSITIONIERUNG MIT GNSS, ALLGEMEINE VERMESSUNGS NACHRICHTEN (AVN) 11-12/2002
- [73] AN OVERVIEW OF THE ALLAN VARIANCE METHOD OF IFOG NOISE ANALYSIS, IEEE STD.952-1997, PAGE 62-73
- [74] MICROMACHINED ANGULAR RATE SENSORS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 7, NO. 2, FEBRUARY 2007

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes wurde eng mit den beteiligten Partnern zusammengearbeitet. Darüber hinaus fand durch Teilnahme an Konferenzen ein umfassender Gedankenaustausch mit einer Vielzahl von führenden Branchenexperten statt.

3 Projektumsetzung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse des Instituts für Flugführung des Projekts zusammengefasst. Die Strukturierung orientiert sich an dem chronologischen Ablauf des Projekts.

3.1 Ergebnisse

Die FAMOS-Applikationen nutzen eine Vorausschau basierend auf einem dynamischen Horizont aus der digitalen Karte. Eine fehlerbehaftete Absolutpositionierung des Ego-Fahrzeuges und der zugeordneten Kartenattribute führt unmittelbar zu einer zeitlich oder örtlich verzögerten Manöverdurchführung, zu Fehlinterpretationen innerhalb der aktuellen oder vorausliegenden Fahrsituation bis hin zu unverständlichen, unerwünschten und unangemessenen Systemreaktionen. Dies führt zu einer reduzierten Fahrerakzeptanz der Applikationen, womit der Beitrag der Applikationen zur Erreichung der FAMOS-Ziele vermindert wird.

Aus diesen Gründen ist stets die maximal verfügbare Ortungsgenauigkeit anzustreben. Die aktuelle Genauigkeit und Integrität der Ortungslösung ist den Applikationen begleitend zum Zustandsvektor stets zur Verfügung zu stellen. Mit diesen Informationen kann die Anwendung abhängig von der Qualität der Eingangsdaten die Funktionalität falls erforderlich degradieren oder die Funktion ganz deaktivieren.

3.1.1 Anforderungsanalyse

Im ersten Projektschritt war es erforderlich, die Anforderungen an die Ortungskomponente zu definieren. Die Ortungsfusion wurde im Rahmen des Arbeitspakets 5100 als separates Modul entworfen und erfüllt für die restlichen Komponenten der Sensordatenfusion die Rolle eines Sensors. Daher wurden gemeinsam mit den anderen beteiligten Partnern analog zu einem Sensor Anforderungen an die Ortungsfusion formuliert.

Kurzbezeichnung	Anforderung (Beschreibung)	Priorität (1=muss, 2=soll, 3=kann)
Allgemein	Die OF verwendet einen GNSS-Empfänger, fahrzeuginterne Dynamiksensoren und ggf. eine Karten-Datenbank, um jederzeit eine bestmögliche, ununterbrochen verfügbare und nach ihrer Integrität qualifizierte Schätzung der globalen Position des Ego-Fahrzeugs zu liefern.	1
Position	Die OF liefert die Ego-Position in WGS84-Koordinaten (Länge, Breite, Höhe).	1
Geschwindigkeit	Die OF liefert den Betrag der Ego-Geschwindigkeit.	1
Richtung	Die OF liefert die horizontale Kompassrichtung und den Elevationswinkel des Ego-Geschwindigkeitsvektors, sofern sich das Ego signifikant bewegt.	1

Kurzbezeichnung	Anforderung (Beschreibung)	Priorität (1=muss, 2=soll, 3=kann)
Qualifizierung	Die OF qualifiziert ihre Positionsausgabe mit einem statistischen Fehlermaß.	2
Zeitstempel	Die ausgegebene Ortungslösung erhält einen Zeitstempel mit mindestens 1 ms Genauigkeit.	1

Tabelle 3-1: Anforderungen der SDF an die Ortungsfusion

Nachdem in der frühen Projektphase primär eine qualitative Anforderungsdefinition erfolgte, evaluierte das Institut für Flugführung ein analytisches Modell, um Genauigkeitsanforderungen quantifizieren zu können. In dem Paper „On the Definition of Lane Accuracy for Vehicle Positioning Systems“, veröffentlicht im Rahmen des 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles 2010, wurde ein Ansatz zur Quantifizierung des Begriffs der „fahrstreifengenauen Ortung“ präsentiert. Dieser Ansatz basiert auf der Interaktion zwischen Positionierungs- und Kartengenauigkeit, da dieses Zusammenspiel insbesondere im Map Matching von zentralem Interesse ist.

Ziel des Quantifizierungsansatzes ist, die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der ein Fahrzeug innerhalb einer Fahrspur befindetet, in Abhängigkeit der Unsicherheit von Karte und Ortung. Diese Wahrscheinlichkeit P lässt sich formulieren als

$$P = \frac{1}{\sigma_{user}\sqrt{32\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{y-L_l}{\sqrt{2}\sigma_l}\right) \right) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y-L_r}{\sqrt{2}\sigma_r}\right) \right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m}{\sigma_{user}}\right)^2\right) \right] dy$$

Dabei sind σ_{user} und σ_l bzw. σ_r die Standardabweichungen der Positionen des Fahrzeugs respektive des linken und des rechten Fahrbahnrandes. L_l und L_r sind die Entfernungen des Fahrbahnrandes vom Koordinatenursprung. Die genaue Herleitung dieses Zusammenhangs ist in [BD-2] zu finden.

Am Beispiel einer Modellrechnung sollen die erforderlichen Genauigkeiten für Karte und Positionierung demonstriert werden. In Abbildung 3-1 ist der geometrische Zusammenhang dargestellt, der der Modellrechnung zu Grund liegt. Das Fahrzeug hat die Breite $2e$ und fährt auf einem Fahrstreifen der Breite l_w . Die effektive Fahrstreifenbreite kann also als $l_w - 2e$ beschrieben werden.

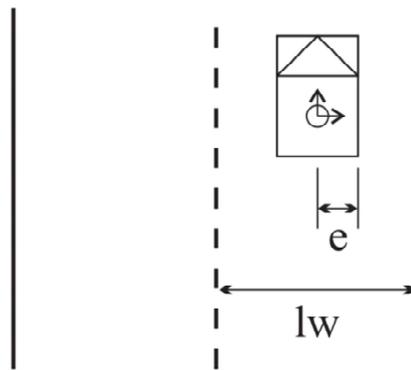


Abbildung 3-1: Geometrischer Zusammenhang der Modellrechnung

Unter der Annahme der Symmetrie gilt:

$$L_{l,r} = \mp \frac{1}{2} \cdot l_w \pm e$$

Für die Evaluation wurde eine Fahrstreifenbreite von 3,5 m angenommen, was der Größenordnung einer deutschen Autobahnspur entspricht. Die Fahrzeugbreite wird zu 1,5 m angenommen, so dass die effektive Fahrstreifenbreite 2 m beträgt. Für den Fall, dass sich das Fahrzeug in der Mitte des Fahrstreifens befindet, ergibt sich die Kurvenschar der Wahrscheinlichkeitsverteilungen gemäß Abbildung 3-2:

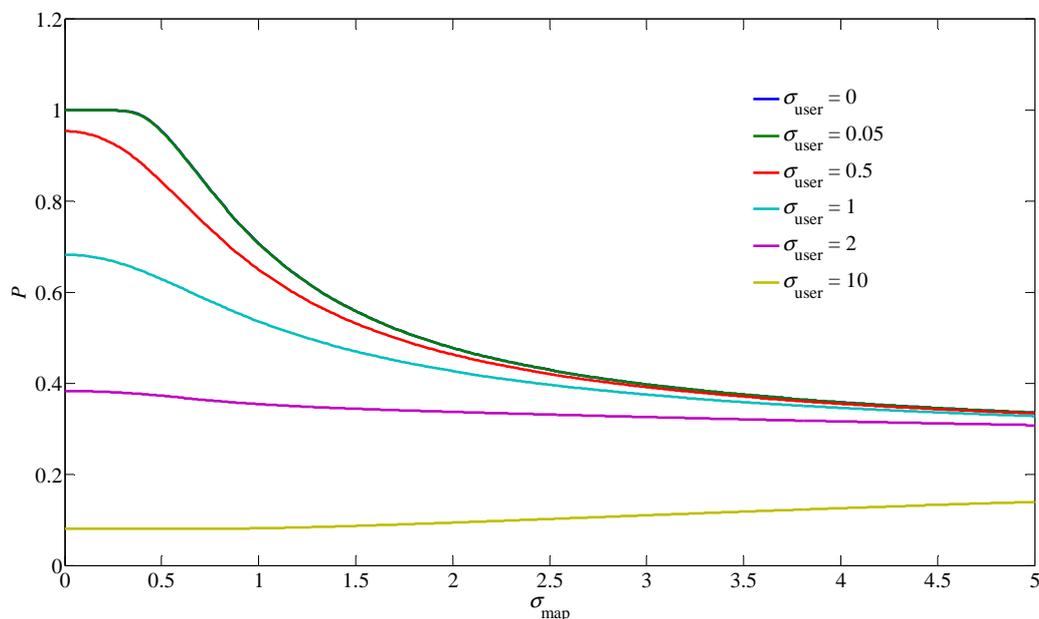


Abbildung 3-2: „On-lane propability“ eines Fahrzeuges in Fahrstreifenmitte

Aus der Abbildung lässt sich ablesen, dass sowohl die Karte als auch die Positionierung des Fahrzeuges eine Standardabweichung in der Größenordnung von 0,5 m erreichen müssen, damit mit einer Wahrscheinlichkeit größer 80% davon ausgegangen werden kann, dass sich das Fahrzeug vollständig in einem Fahrstreifen befindet.

3.1.2 Voruntersuchung zur Bewertung der Zielumgebung

Im nächsten Schritt wurde eine Methodik erarbeitet, mit der erörtert werden soll, wie die Anforderungen an die Ortung erfüllt werden können. Die Rolle des Instituts für Flugführung im FAMOS Projekt ist, in Echtzeit den Fahrzeugzustand mit einer bekannten Integrität zu berechnen. Grundsätzlich wurde festgelegt, dass das Zielsystem aus einer Datenfusion von Satellitensignalen und Fahrdynamiksensoren besteht, die derzeitigem Serienstandard entsprechen. Es hat sich bereits in der Vergangenheit gezeigt, dass diese Fahrdynamiksensoren zur Positionierung genutzt werden können. Auf Grund ihrer vergleichsweise hohen Datenrate sind diese Sensoren gut dafür geeignet, eine stetige, aber kurzzeitstabile Positionslösung zu bestimmen, die mit geringer frequenten, aber dafür langzeitstabilen GNSS-Messungen korrigiert wird.

Bevor mit dem Systemdesign begonnen werden kann, ist es sinnvoll, die Güte der zur Verfügung stehenden Sensoren in den jeweiligen Anwendungsszenarien zu evaluieren. Diese Evaluation wurde gemäß des Schaubildes in Abbildung 3-3 durchgeführt.

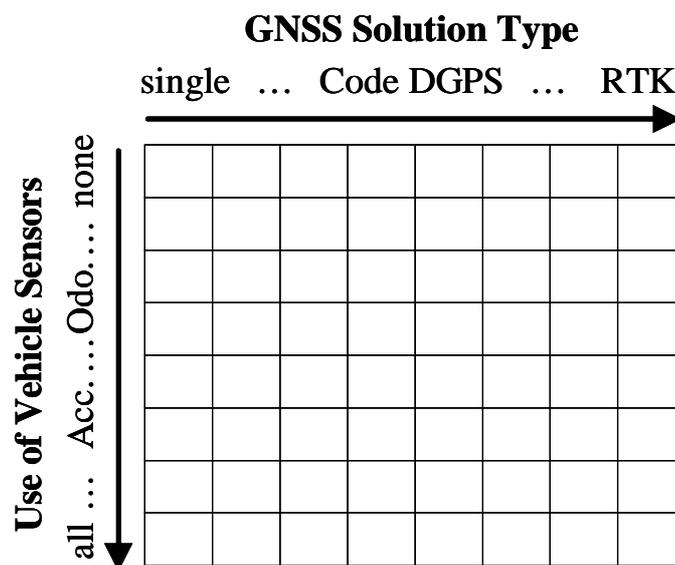


Abbildung 3-3: Zweidimensionale Evaluationsmatrix

Eine Dimension beschreibt die möglichen GNSS Algorithmen. Sowohl Standalone-Lösungen, als auch Ein- und Zweifrequenz-DGNSS Lösungen wurden evaluiert. Es liegt nahe, dass eine Zweifrequenz-RTK-Lösung mit gelösten Mehrdeutigkeiten die präziseste Ortung ermöglicht. Daher lautet die zu klärende Frage nicht, ob dieser aufwendige Ansatz durch einfachere übertroffen werden kann. Zentrales Interesse dieser Untersuchung ist, inwiefern ein Positionierungssystem vereinfacht werden kann und dabei immer noch die Ansprüche an die

Ortung erfüllt, da eine Minimierung des Rechenaufwands aus Sicht einer potentiellen Übertragung auf Steuergeräte angestrebt wird.

Die zweite Dimension beschreibt die Hinzunahme von Fahrdynamiksensoren mit den entsprechenden kinematischen Modellen. Jede Zeile in dieser Dimension beschreibt eine Konfiguration von Fahrzeugsensoren. Relevante Sensoren für die Zustandsschätzung sind Raddrehzahlsensoren, Drehratensensoren, Beschleunigungsmesser sowie der Lenkradwinkelsensor. Die Messungen von GNSS-Empfänger und Fahrdynamiksensoren wird mit Hilfe unterschiedlicher Kinematikmodelle fusioniert. Die Messungen der Sensoren stehen in einer bestimmten geometrischen Korrelation zur Fahrzeugbewegung.

Die in FAMOS zu entwickelnden Fahrerassistenzsysteme haben ihren primären Anwendungsfokus auf Landstraßen und Autobahnen. Um die Leistungsfähigkeit der Positionierung zu bewerten, wurden Messfahrten unter diesen Bedingungen und zusätzlich im Stadtverkehr durchgeführt. Die gefahrenen Strecken sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Die blaue Trajektorie beschreibt die Messfahrt in ländlicher Umgebung. Diese Strecke wurde so gewählt, das Straßen mit freier und behinderter Satellitensicht befahren wurden. Die gelbe Trajektorie zeigt das Autobahn-Szenario. Im urbanen Szenario wurden sowohl Haupt- als auch Nebenstraßen in Wohngebieten befahren. Da die Landstraßenfahrten das relevanteste Szenario darstellen, werden im Folgenden hauptsächlich die Ergebnisse präsentiert, da es das „worst case“ Szenario für die zu entwickelnden Applikationen darstellt.

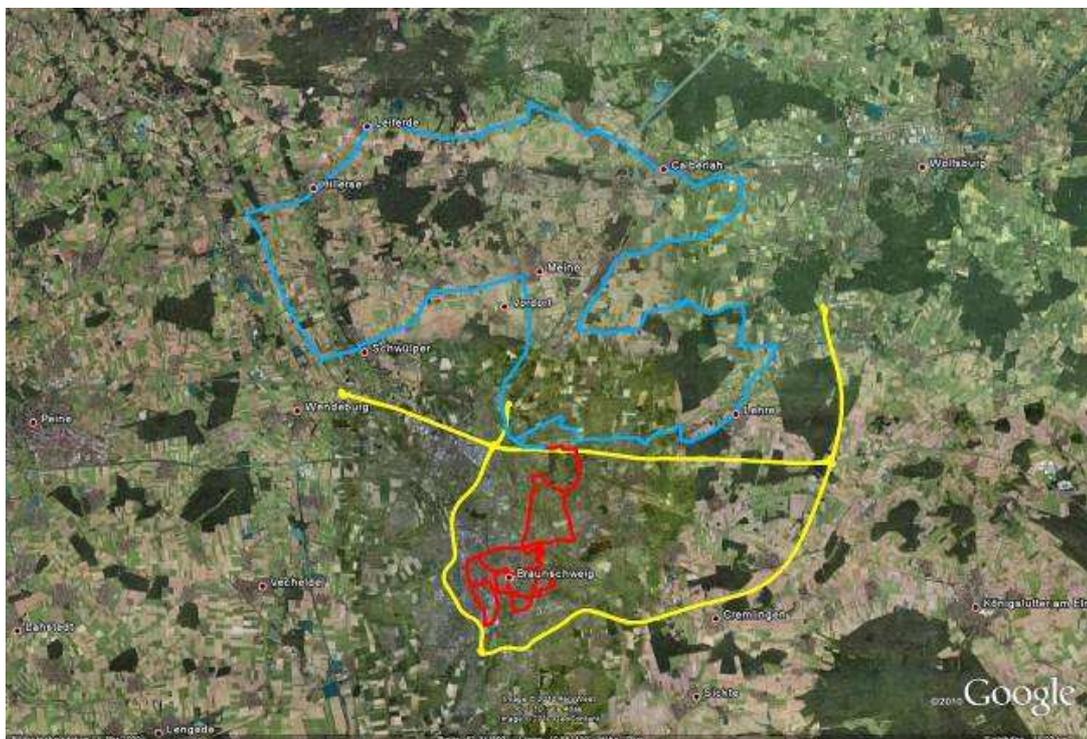


Abbildung 3-4: Szenarien der Messfahrten

Das Institut für Flugführung verfügt über ein Versuchsfahrzeug, mit dem die erforderlichen Testfahrten durchgeführt wurden. Es wurde mit einem Novatel DL-V3 Empfänger gearbeitet, da der FAMOS-Empfänger zu diesem frühen Projektzeitpunkt noch nicht verfügbar war. Die Daten der Fahrdynamiksensoren vom CAN-Bus werden ebenfalls auf dem Messrechner aufgezeichnet. Da die Sensordaten des Fahrzeugs nicht mit einem Absolutzeitstempel versehen sind, werden sie von einem Gerät, das am Institut entwickelt wurde, mit der GPS-Zeit versehen. Da für die Datenfusion der Hebelarm zwischen Antenne und dem Bezugspunkt des fahrzeugfesten Koordinatensystems bekannt sein muss, wurden charakteristische Punkte des Versuchsfahrzeugs mit einem Tachymeter von einem Geodäten vermessen.

Die Korrekturdaten werden auf einem stationären PC aufgezeichnet, um Verbindungsabbrüchen vorzubeugen. Die Datenverfügbarkeit ist nicht Bestandteil dieser Untersuchung sondern wird in einem anderen Arbeitspaket des Projekts untersucht. RTCM 2.3 Message Type 1 Daten wurden vom SAPOS Referenzdatendienst bezogen. Darüber hinaus wurden Rohdaten einer Referenzstation bezogen, die vom Institut für Flugführung betrieben wird. Diese Daten werden genutzt, um differentielle GPS Algorithmen auf Code- und Carrierbasis zu evaluieren.

Die Evaluation der verschiedenen GNSS/Fahrdynamiksensor-Kombinationen fand im Postprozess statt. Zur Bewertung der Verfahren wird eine Referenztrajektorie benötigt. Sie wird mit Hilfe der Software GrafNav von Waypoint erstellt. Ihr liegt ein nicht-kausaler Zweifrequenz-Algorithmus zu Grunde, der eine Vorwärts-Rückwärts-Rechnung durchführt.

Die zu bewertenden Trajektorien werden ebenfalls im Postprozess erstellt. Um die Prozesskette zu vereinfachen, wird eine „loosly-coupled“ Sensorfusion genutzt. Es werden zuerst die Positionslösungen aus den GPS-Rohdaten berechnet. Die Ergebnisse dieser Rechnung werden daraufhin einem Matlab-Tool zur Verfügung gestellt, das die Fahrzeugkinematik und die zugehörigen Fahrdynamiksensormessungen in einem Kalman Filter zu einer integrierten Lösung verarbeitet. Durch einen Vergleich der so entstandenen Trajektorien mit der Referenz lassen sich Histogrammplots der Ablage erstellen.

GPS ohne Fahrdynamiksensoren

Im ersten Schritt wurden unterschiedliche GNSS Korrekturtypen evaluiert. Da die Notwendigkeit eines Datenlinks für den Bezug von Korrekturdaten einen nicht zu vernachlässigenden Mehraufwand für einen potentiellen Einsatz in der Serie bedeutet, muss der Mehrwert gezeigt werden. Gleichwohl gilt es, die Datenmenge auf das erforderliche Minimum zu reduzieren. Obwohl die Erwartungen an einen GPS Standalone-Algorithmus vergleichsweise gering sind, wurde er dennoch in die Untersuchung einbezogen. Erwartungsgemäß zeigt sich eine hohe Ablage von der Referenz. Darüber hinaus zeigt das Histogramm nicht nur ein Maximum, sondern mehrere lokale Maxima. Das entsprechende Histogramm ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

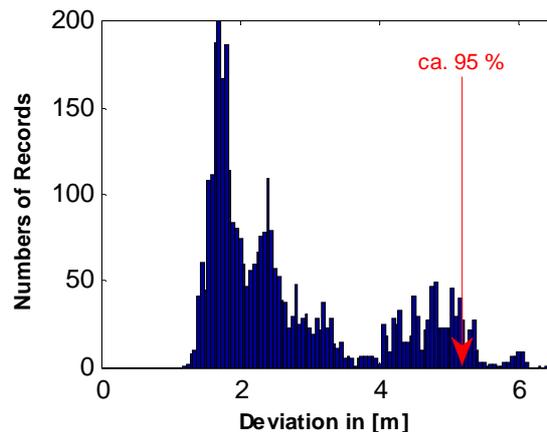


Abbildung 3-5: SGPS Positionierungsgenauigkeit

Dieses Verhalten ist für ein Positionierungsmodul eines sicherheitsrelevanten Fahrerassistenzsystems nicht akzeptabel, da ein eindeutiger Erwartungswert für die Genauigkeit erforderlich ist. Es zeigt sich also, dass eine Korrektur der GNSS-Messungen erforderlich ist.

Die Nutzung eines einfachen Korrekturwerts für die gemessenen Schrägentfernungen ist eine attraktive Option, da nur vergleichsweise wenige Daten übertragen werden müssen. Im Gegensatz zur Nutzung von Rohdaten haben Korrekturen der Pseudorange auch eine vergleichsweise lange Gültigkeit. Die gängigste Quelle in Deutschland für diese Art der Korrektur sind SBAS-Satelliten und Betreiber von Korrekturdatendiensten (in Deutschland z.B. SAPOS).

EGNOS ist seit dem 1. Oktober 2009 vollständig operabel und da das Signal frei verfügbar ist, ist die Nutzung attraktiv. Jedoch nutzt EGNOS europaweit ein Netz aus 34 Referenzstation um die Korrekturen zu generieren, bei SAPOS sind es alleine in Deutschland mehr als 270 Stationen. Die folgende Abbildung 3-6 zeigt das Histogramm der Ablage einer mit EGNOS korrigierten Trajektorie für die Messfahrt im Landstraßenszenario.

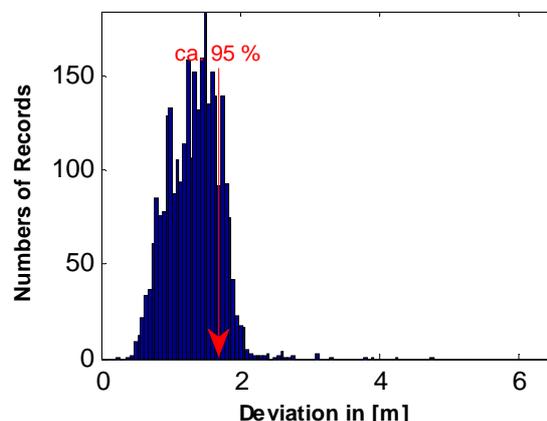


Abbildung 3-6: EGNOS Positionierungsgenauigkeit

Das Histogramm zeigt bereits eine signifikante Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit im Vergleich zur SGPS Lösung. Mehr als 95% der berechneten Lösungen zeigen eine Ablage, die weniger als 2 m von der Referenz beträgt.

Im Vergleich zur SBAS-Lösung zeigen die Positionen, die mit RTCM Message Type korrigiert wurden, eine weitere Verbesserung in der Reduktion der mittleren Ablage von der Referenz. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Eigenschaft durch die höhere Dichte der Referenzstationen bedingt ist (vgl. Abbildung 3-7).

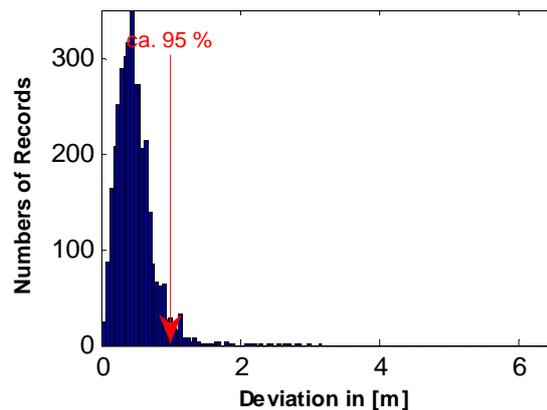


Abbildung 3-7: Positionierungsgenauigkeit von GPS mit „Range Corrections“ (RTCM 2.3 Message Type 1) von SAPOS

Es ist allerdings anzumerken, dass dieses Verhalten signifikant von der Inhomogenität der Atmosphäre abhängt. Messfahrten an unterschiedlichen Tagen haben gezeigt, dass teilweise auch sehr ähnliche Ergebnisse von EGNOS und RTCM MT1 erreicht werden, wie in der folgenden erkennbar ist.

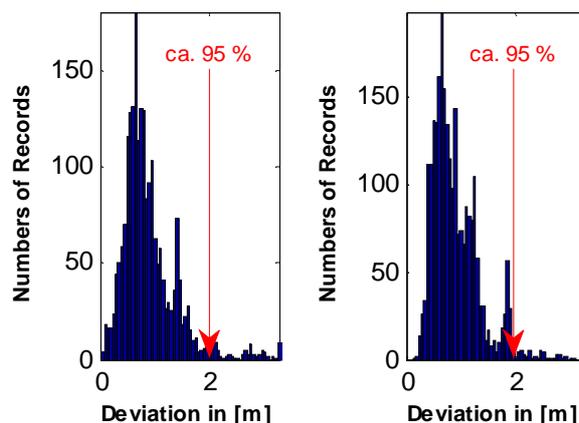


Abbildung 3-8: Positionierungsgenauigkeit von GPS mit EGNOS (links) und SAPOS (rechts)

Weitergehend wurde die Nutzung umfangreicherer Korrekturmethode im Vergleich zu Schrägentfernungskorrekturen untersucht. Es wäre zu erwarten, dass diese eine weitere systematische Verbesserung der Positionierung mit sich bringen. Dies ist jedoch nicht notwendigerweise der Fall. Abbildung 3-9 zeigt die Abweichungshistogramme solcher

differentiellen Verfahren. Es sind einmal ein differentielles Verfahren auf Codebasis und einmal eines auf Basis der Trägerphasenmessung ohne Mehrdeutigkeitslösung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die codedifferentielle Lösung eine breitere Streuung der Abweichung aufweist als bei einer Korrektur mit Hilfe des RTCM MT1. Die Trägerphasenlösung ohne gelöste Mehrdeutigkeiten ist etwa gleichauf mit der RTCM MT1 Lösung. Die zusätzliche Nutzung der L2-Frequenz brachte hier keine weitere Verbesserung.

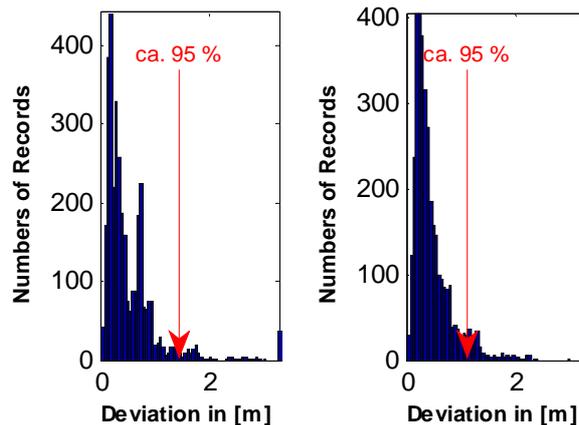


Abbildung 3-9: DGPS Positionierungsgenauigkeit von auf Codebasis (links) und mit Hilfe der Trägerphasenmessung ohne gelöste Mehrdeutigkeiten (rechts)

Weiterhin wurde untersucht, ob es lohnenswert ist, RTK Lösungen zu verwenden, deren Verfügbarkeit in schwierigen Umgebungsbedingungen limitiert ist. Die folgende Tabelle zeigt, dass die Verfügbarkeit dieser Lösungen zu gering ist, um sie für das angestrebte Positionierungsmodul zu verwenden.

Verfügbarkeit	Stadt	Landstraße	Autobahn
L1 fixed	9.3%	14.3%	18.8%
L1+L2 fixed	29.8%	36.5%	68.6%

Tabelle 3-2: Verfügbarkeit von RTK Lösungen

GPS mit Fahrdynamiksensoren

Um die Positionierung weiter zu verbessern, ist es denkbar, die im Fahrzeug verbauten Fahrdynamiksensoren zu nutzen. Obwohl diese Sensoren keine systematischen Fehler der GNSS Messungen wie z.B. Mehrwegeausbreitung oder atmosphärische Effekte kompensieren, so sind sie doch insbesondere in Zeiten schlechter Satellitensichtbarkeit hilfreich.

In den folgenden Abbildungen sind die Trajektorien drei verschiedener Sensorkonfigurationen zur Zustandsschätzung abgebildet:

- Raddrehzahlsensoren der Hinterräder, Lenkradwinkelsensor (rote Linie)

- Raddrehzahlsensoren der Hinterräder, Drehratensensor um die Hochachse, Längsbeschleunigungssensor (grüne Linie)
- Raddrehzahlsensoren der Hinterräder, Drehratensensor um die Hochachse (gelbe Linie)

Die Messupdates mit RTCM MT1 korrigierten Positionen sind als blaue Marker dargestellt.

Beispiel 1:

Im ersten Szenario ist eine Situation dargestellt, in der die GPS Position plötzlich einen signifikanten Sprung für die Dauer von etwa 5 Sekunden aufweist. Während dieser Zeit war die Trajektorie kaum gekrümmt. Die Trajektorien der drei Sensorkonfigurationen zeigen ein grundsätzlich ähnliches Verhalten. Es sind keine signifikanten Performanceunterschiede zu erkennen. Alle drei Kombinationen sind in der Lage, die Reduzierung der GPS-Genauigkeit zu kompensieren.

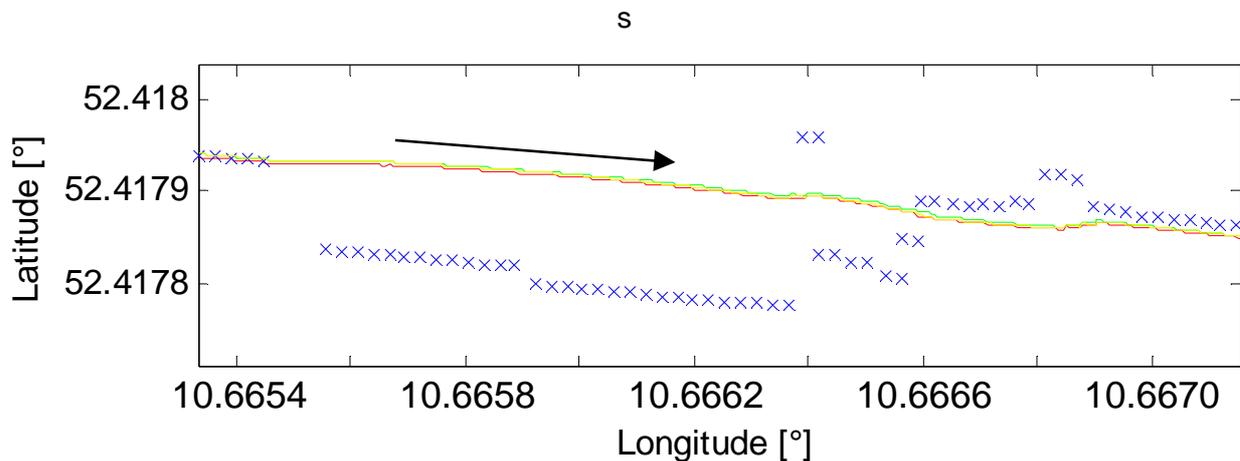


Abbildung 3-10: Positionierungsverhalten verschiedener Fahrzeugsensorkonfigurationen in einer Situation mit gerader Trajektorie

Beispiel 2:

Ein anderes Bild bietet sich, wenn die Trajektorie gekrümmt verläuft. Abbildung 3-11 zeigt das Verhalten der Sensorkonfigurationen bei sporadischer Signalabschattung. Die Kinematikmodelle, die nicht die Information des Lenkradwinkelsensors auswerten, kompensieren die Signalausfälle besser als die Modelle, die sich auf den Lenkwinkel verlassen.

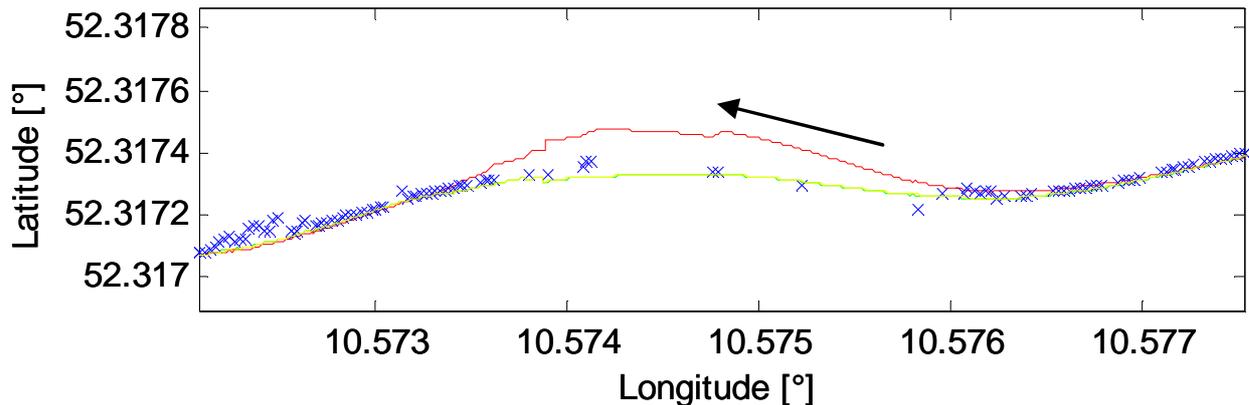


Abbildung 3-11: Positionierungsverhalten verschiedener Fahrzeugsensorkonfigurationen in einer Situation mit gekrümmter Trajektorie

Der Lenkradwinkelsensor zeigt darüber hinaus ein nachteiliges Verhalten in weiteren Situationen. Modelle mit Verwendung des Lenkradwinkelsensors sind beispielsweise anfällig in Seitenwindsituationen. Bei starkem Seitenwind auf gerader Strecke ist oftmals ein leichter Lenkeingriff notwendig, um das Fahrzeug in der Spur zu halten. Dieser konstante Offset erzeugt eine Drift in der Positionslösung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nutzung von Fahrdynamiksensoren eine sinnvolle Möglichkeit darstellt, in Phasen schlechter Satellitensichtbarkeit die Positionierungsgenauigkeit aufrecht zu erhalten. Die Raddrehzahlsensoren der Hinterachse bieten eine solide Basis für eine Koppelortung. Die zusätzliche Nutzung eines Längsbeschleunigungssensors und Drehratensensors um die Hochachse bietet eine Redundanz und verbessert die Genauigkeit in bei Signalausfällen bei gekrümmten Trajektorien.

3.1.3 Umsetzung der Ortungsfusion

Obwohl wirtschaftliche Aspekte in einem Forschungsprojekt oftmals nicht im primären Fokus sind, müssen sie in diesem Fall bei der Entwicklung der Ortungsfusion dennoch berücksichtigt werden, da das Modul grundsätzlich geeignet sein muss, in eine Serienentwicklung überzugehen. Daraus ergeben sich im Wesentlichen zwei Implikationen: Einerseits ist es erforderlich, dass neben einem verbesserten GNSS Empfänger keine zusätzlichen Sensoren in der Datenfusion benötigt werden, die nicht dem derzeitigen Stand der Serie entsprechen. Außerdem soll es möglich sein, das Positionierungsmodul in verschiedenen Fahrzeugplattformen zu verwenden. Das bedeutet, dass das Design eine Flexibilität bezüglich der Nutzung verschiedener Sensortypen und -qualitäten besitzen muss.

Erwägungen vor der Implementierung

Die Aufgabe des Instituts für Flugführung im FAMOS Projekt ist die Entwicklung einer echtzeitfähigen Zustandsschätzung der Fahrzeugbewegung. Grundsätzlich ist das System als

eine Fusion aus GNSS-Messungen und Messungen der Fahrdynamiksensoren aufgebaut. Um die Schnittstelle zu den anknüpfenden Applikation zu gewährleisten, wurde ein Softwareframework für die Implementierung verwandt, das in der Automobilindustrie im Bereich der Fahrerassistenzsysteme verbreitet ist, und auch bei den beteiligten Projektpartnern Verwendung findet.

Das „Automotive Data and Time-Triggered Framework“ (ADTF) wurde als Basis für die Implementierung der Ortungsfusion gewählt. Hauptanwendungsbereich dieser Softwareumgebung ist die Entwicklung und Erprobung von ADAS. Die zentrale Entwicklungsumgebung ist eine grafische Benutzeroberfläche, in der das Zielsystem aus verschiedenen Modulen aufgebaut wird. Diese Module können als unabhängige Softwarekomponenten verstanden werden. Sie werden üblicherweise in C++ geschrieben und als dynamische Bibliothek gebaut. Als Schnittstellen sind Ein- und Ausgangspins standardisiert vorgesehen, die durch entsprechende Datentypen innerhalb der Module angelegt werden. ADTF verwaltet dann den Austausch der Daten zwischen den Modulen, die über Verbindungslinien im Konfigurationseditor arrangiert werden. Darüber hinaus bietet das Framework eine Vielzahl von Support-Funktionen zur Datenverarbeitung. Beispielsweise existieren vorgefertigte Module zur Datenaufzeichnung und für das Abspielen aufgezeichneter Daten. Außerdem werden Klassen zum Verwalten von Threads und zur Zeitsynchronisierung mitgeliefert. Ein typischer Systemaufbau einer ADTF-Konfiguration ist in Abbildung 3-12 dargestellt:

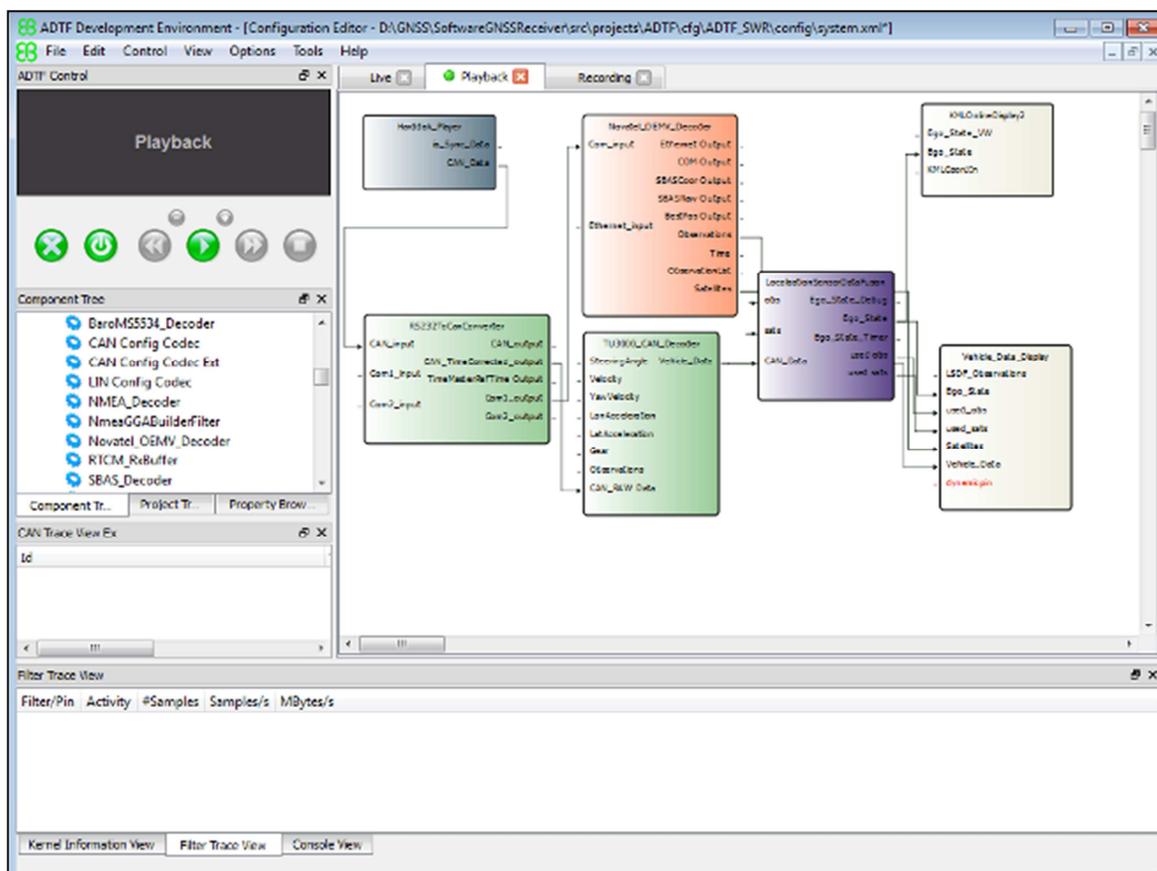


Abbildung 3-12: Typische Systemarchitektur in ADTF

Systemarchitektur

Die zentrale Komponente des Positionierungsmoduls ist eine eng gekoppelte Datenfusion („tightly coupled integration“), die Rohdaten des GNSS-Empfängers (Pseudoschrägentfernung und Doppler-Messung) mit den Messungen der Fahrdynamiksensoren fusioniert. Als Grundlage des Kopplungsalgorithmus wurde ein „Extended Kalman Filter“ gewählt. Die kinematische Modellierung der Fahrzeugbewegung basiert auf dem Ackermann-Modell. Der Systemaufbau ist in Abbildung 3-13 dargestellt:

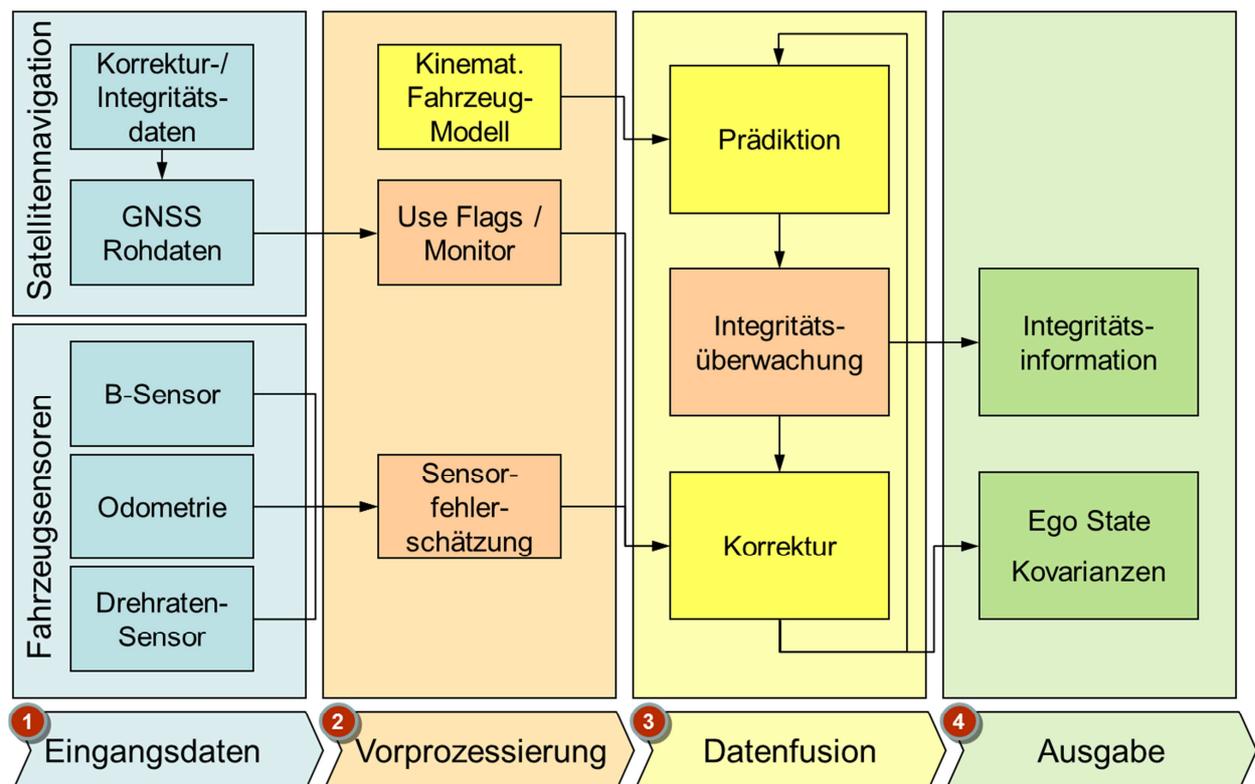


Abbildung 3-13: Systemarchitektur des Positionierungsmoduls

Die Systemarchitektur kann als ein Aufbau in vier Ebenen verstanden werden: Die erste Ebene ist die Eingabeebene (blaue Schattierung). In ihr sind sämtliche Prozesse enthalten, die im Rahmen der Datenaufbereitung anfallen. Da die Daten des GNSS-Empfängers und die der Fahrdynamiksensoren können über einen leichten Zeitoffset verfügen. Daher ist eine Pufferung der Daten und ggf. eine entsprechende Sortierung erforderlich. Darüber hinaus müssen die eingehenden Daten standardisiert und vereinheitlicht werden, da verschiedene Empfänger und Fahrdynamiksensoren in unterschiedlichen Testfahrzeugen im Rahmen des Projekts zum Einsatz kommen.

In der zweiten Ebene (orange Schattierung) findet eine Präprozessierung der Messdaten statt. Die Daten werden überwacht und vorab auf Konsistenz geprüft. Die GNSS-Rohdaten werden

validiert, indem die zeitliche Änderung der Schrägentfernungsmessung mit den Dopplermesswerten über einen Zeitraum verglichen wird. Die Daten der Fahrdynamiksensoren werden auf ähnliche Weise überwacht und bei Bedarf ignoriert.

Bevor die Fahrdynamiksensoren für Navigationszwecke verwendet werden, ist es sinnvoll, sie bezüglich Skalenfaktor- und Nullpunktfehlern automatisiert zu kalibrieren. Ein solches Tool wurde im Rahmen des Projekts entwickelt. Für den Fall, dass die Fusion in einem Fahrzeug verwendet wird, wurde die Datenfusion darüber hinaus mit einem selbstkalibrierenden Algorithmus ausgestattet.

Die dritte Ebene ist die Sensordatenfusion selbst (gelbe Schattierung). Sie arbeitet in vier Modi: Prä-Initialisierung, Initialisierung, dynamische und statische Zustandsschätzung. Das folgende Schema zeigt die Betriebsmodi:

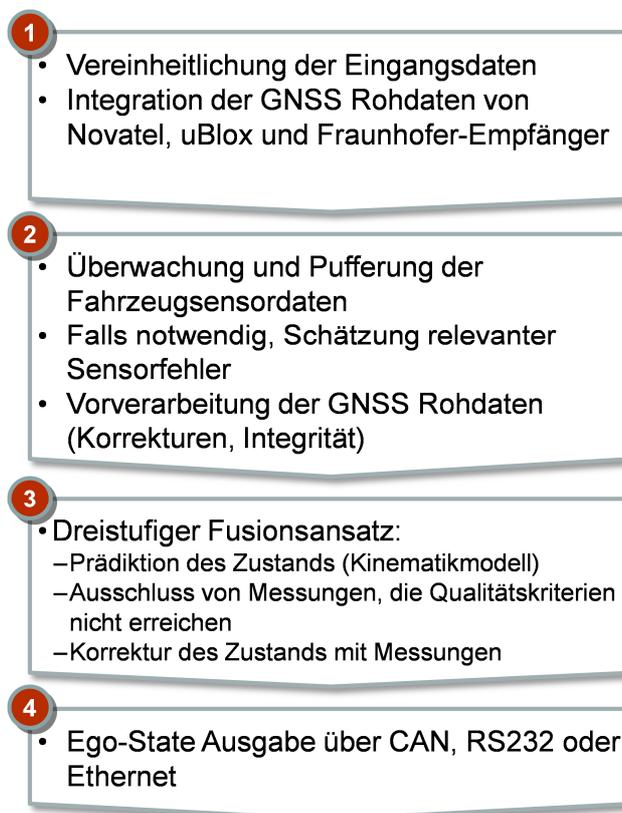


Abbildung 3-14: Betriebsmodi der Ortungsfusion

In der Prä-Initialisierungsphase werden die Rohdaten und die Ephemeriden des GNSS-Receiver der Fusion übermittelt und eine Position berechnet. So lange das Fahrzeug steht, wird die Position kontinuierlich aktualisiert.

Sobald sich das Fahrzeug in Bewegung setzt, wird die zweistufige Initialisierungsphase gestartet: Wenn die Fahrdynamik eine langsame Bewegung feststellen, wird ein Teil des Dynamikmodells ausschließlich mit den Pseudorange-Messungen initialisiert. Sobald die

Radgeschwindigkeiten einen Schwellwert überschreiten, werden die verbliebenen Elemente des Zustandsvektors unter Zuhilfenahme der Doppler-Messungen wie z.B. die Fahrtrichtung initialisiert.

Die Datenfusion selbst ist als „Extended Kalman Filter“ aufgebaut. Der erste Schritt nach der Initialisierung ist die Prädiktion des Bewegungszustands des Fahrzeugs auf Basis der vorherigen Epoche. Nach der Prädiktion wird der Zustand mit den eingehenden Messungen korrigiert. Dies sind entweder die Messungen des Empfängers oder aber die Daten der Fahrdynamikssensoren. Falls die der Zustand mit GNSS-Messungen korrigiert wird, durchlaufen sie zuvor einen RAIM-Algorithmus in Anlehnung an [69].

In Zeiten des Stillstandes des Fahrzeugs pausieren die dynamischen Updates. Dies ist eine Anforderung der Assistenzsysteme. Die „Zero Velocity“ Bedingung wird über die Raddrehzahlsensoren detektiert.

Die letzte Ebene der Positionierungssoftware ist die Ausgabebene (grüne Schattierung). Die nachgelagerten Assistenzsysteme erhalten den Fahrzeugzustand über das „Controller Area Network“ (CAN). Zu Aufzeichnungs- und Validierungszwecken wurde darüber hinaus noch die Möglichkeit vorgehalten, den Zustand über RS232 oder Ethernet auszugeben.

Hardwareintegration

Obwohl die primäre Aufgabe des Instituts für Flugführung im Projekt die Softwareentwicklung war, wurde ein Hardwaredemonstrator eingerichtet. Seine zwei Hauptbestandteile sind ein Mikro-PC, der auf einem Atom-Prozessor basiert. Darüber hinaus findet eine Zeitsynchronisierungseinheit Verwendung, die die Messungen der Fahrdynamikssensoren mit einem Zeitstempel versieht. Da die CAN-Nachrichten standardmäßig nicht über einen Absolutzeitstempel verfügen, wurde ein Zeitmaster im Rahmen des Projekts am Institut entwickelt. Es nutzt den PPS von dem GNSS-Empfänger um den CAN-Zeitstempel, der sich in der Regel auf die Zeit seit dem Einschaltzeitpunkt bezieht, durch die GPS-Systemzeit zu ersetzen. Es ist sinnvoll, dies PPS-basiert auf einem Mikrocontroller zu implementieren, da eine rein softwareseitige Lösung von Unsicherheiten der Datenpufferung beeinträchtigt sein könnte, da die CAN-Module oftmals über USB an den Messdatenrechnern angeschlossen sind.

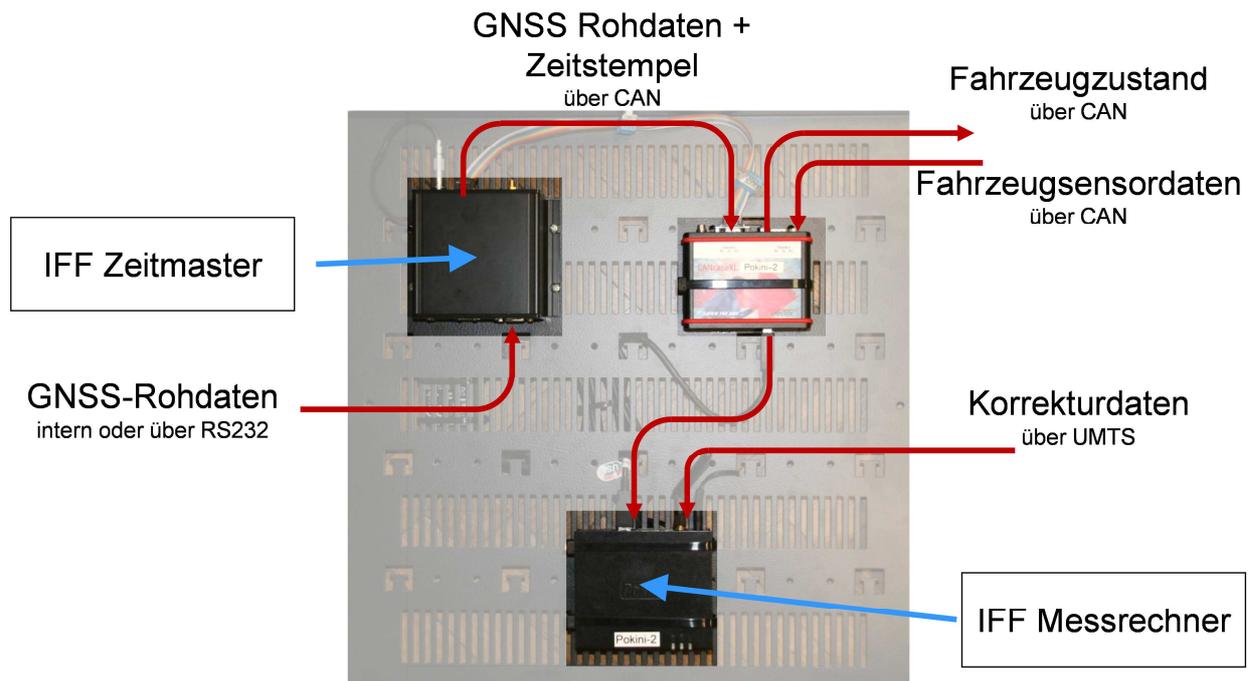


Abbildung 3-15: Hardware zur Datenverarbeitung

Ein Pokini-PC wird für die Berechnung des Fahrzeugzustands verwendet. Es ist ein sehr kleiner Rechner mit vergleichsweise geringer Rechenleistung um zu demonstrieren, dass auch eine aufwändigere Zustandsschätzung mit geringen Hardwareanforderungen erfolgen kann. Der Pokini-PC verfügt über einen Atom-Prozessor und ist widerstandsfähig für die Anwendung in Fahrzeugen ausgelegt. Es ist eine 2.0 GHz CPU mit 2 GB RAM verbaut. Alle integrierten Komponenten sind stoßsicher ausgeführt. Das Gesamtgewicht der Einheit beträgt etwa 500 g inklusive einer Solid State Disk. Weiterhin ist keine aktive Kühlung erforderlich, der Gesamtstromverbrauch beträgt etwa 5 W.

3.1.4 Systemtests

Die Assistenzsysteme, die im Rahmen des FAMOS Projekts entwickelt werden, sind primär für den Einsatz auf Landstraßen und Autobahnen gedacht. Daher wurde das Positionierungsmodul hauptsächlich unter diesen Bedingungen evaluiert. Darüber hinaus wurden zusätzlich Situationen im Stadtverkehr evaluiert. Eine repräsentative Testfahrt ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Die gefahrene Strecke umfasst insgesamt etwa 300 km.

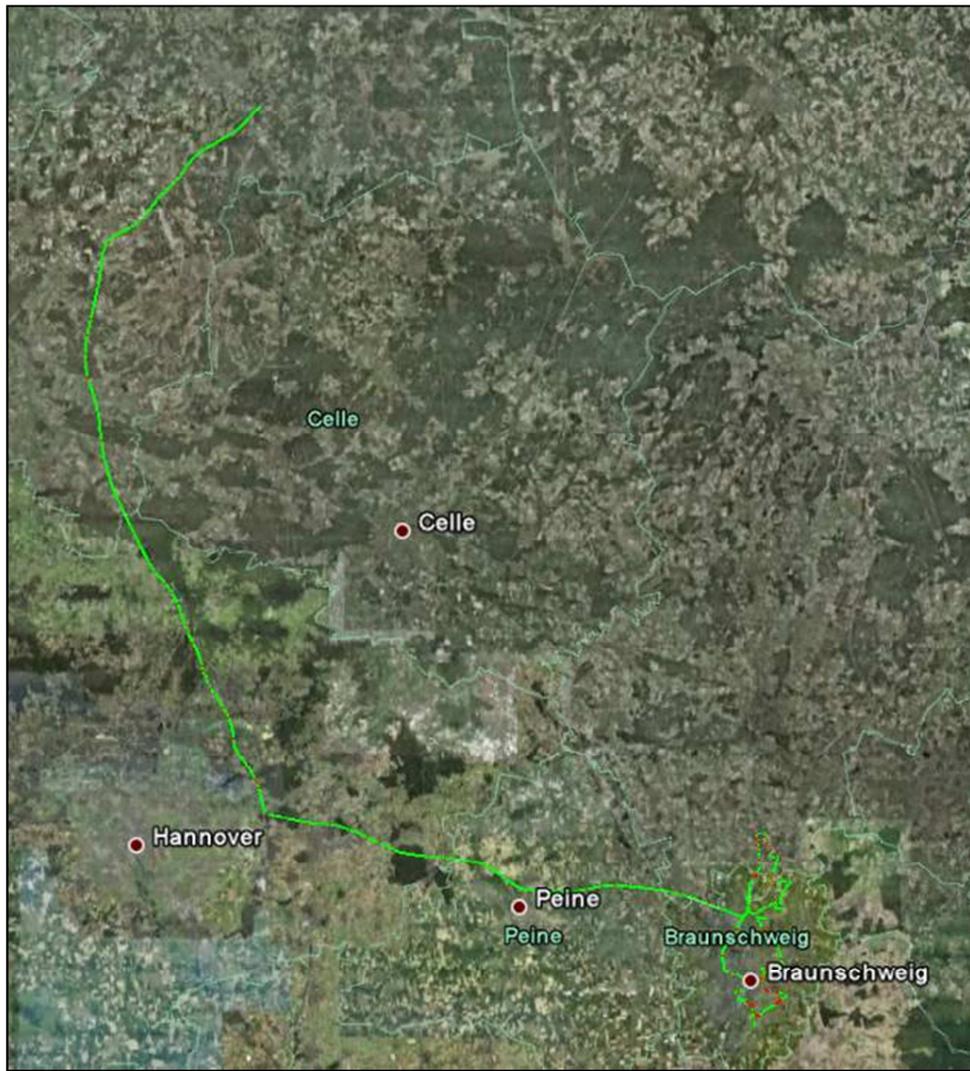


Abbildung 3-16: Szenario der Testfahrt

Es wurden sowohl Testfahrten mit dem VW Passat des Instituts, als auch mit dem VW Golf des FAMOS Projekts durchgeführt. Der Passat des Instituts kann mit verschiedenen GNSS-Empfängern und Antennen, aber auch mit IMUs und sonstigen Sensoren ausgerüstet werden. Außerdem ist es möglich, die Daten des Controller Area Networks auszulesen, und auf diese Weise die Messwerte der Fahrdynamiksensoren zu erhalten.



Abbildung 3-17: Versuchsaufbau im Passat des Instituts für Flugführung

In Abbildung 3-17 ist der Messaufbau im Versuchsfahrzeug dargestellt. Das Messfahrzeug ist sowohl mit dem in FAMOS entwickelten Positionierungsmodul als auch mit einem Referenzsystem ausgerüstet. Das Antennensignal wird mit Hilfe eines Splitters an zwei Novatel-Empfänger verteilt. Einer von ihnen ist mit dem Referenzsystem verbunden, das auf einer iNAV-RQH IMU basiert. Die Daten vom Empfänger und der IMU werden für die spätere Datenprozessierung aufgezeichnet. Ein weiterer Novatel-Empfänger, dessen Antenne auf dem Dach des Instituts präzise eingemessen ist, wird als Referenzempfänger verwendet. Die Referenztrajektorie wird mit Hilfe eines Zweifrequenzalgorithmus durch eine Vorwärts-Rückwärts-RTK-Rechnung generiert.

Das FAMOS-Positionierungsmodul erhält für diese Auswertung GNSS-Rohdaten von dem zweiten Novatel-Empfänger. Die Daten der Fahrdynamiksensoren werden über ein CAN-Device der Firma Vector aus dem Fahrzeugnetzwerk ausgelesen. Sie werden daraufhin in den IFF-Zeitmaster gegeben, der die Daten mit der GPS-Systemzeit versieht. Da für die Sensordatenfusion der Hebelarm zwischen Antenne und den Fahrdynamiksensoren bekannt sein muss, wurden wesentliche Bezugspunkte des Fahrzeugs von einem Vermessungsingenieur eingemessen. Die Pseudorange-Korrekturdaten des SAPOS Netzwerks wurden mit Hilfe einer UMTS-Verbindung in das Fahrzeug übermittelt.

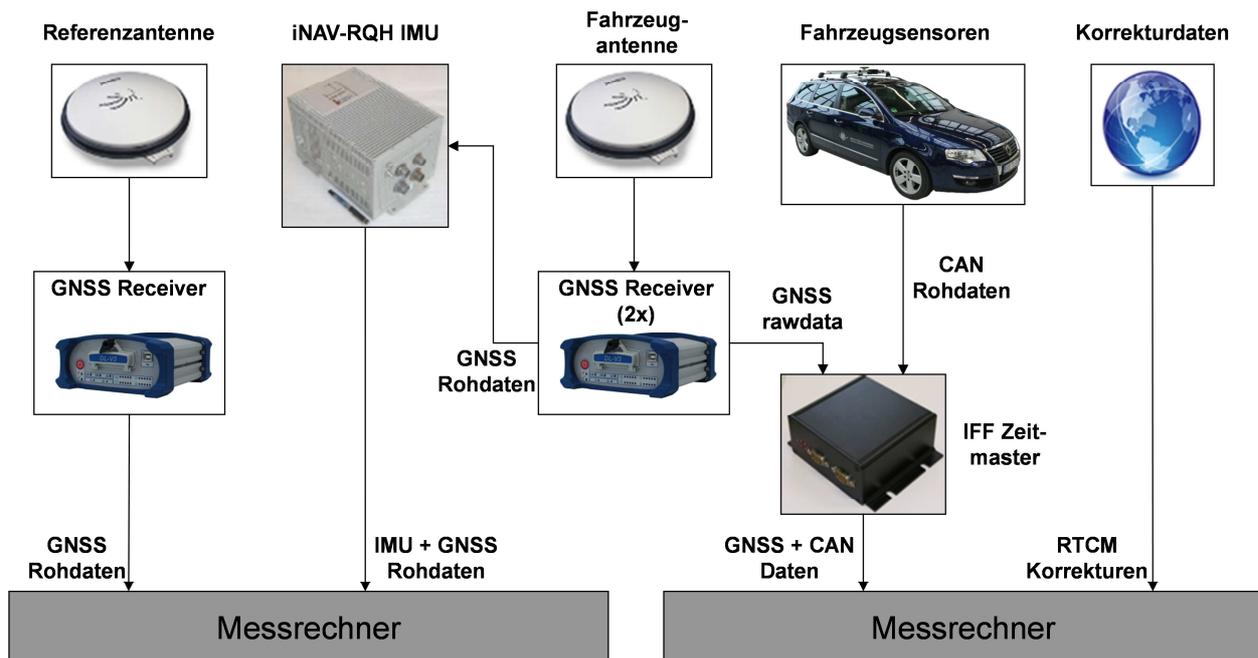


Abbildung 3-18: Evaluationsschema

Die Evaluation der Sensordatenfusion wird im Postprozess durchgeführt. Durch Vergleich mit der Referenztrajektorie lässt sich eine Häufigkeitsverteilung des Positionierungsfehlers bestimmen.

3.1.5 Testergebnisse

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung präsentiert. Zunächst werden qualitative Ergebnisse gezeigt, um einen visuellen Eindruck der Qualität der Ortungslösung zu vermitteln. Danach werden Häufigkeitsverteilungen des Positionierungs- und Richtungsfehlers dargestellt.

Qualitative Ergebnisse

Die folgende Abbildung 3-19 zeigt zwei typische Trajektorien der enggekoppelten Sensordatenfusion. Die obere Trajektorie zeigt eine Situation unter optimalen Sichtbarkeitsbedingungen. Das Fahrzeug überfährt eine Brücke, Bäume und andere Vegetation haben einen großen Abstand zur Fahrbahn. Unter diesen Bedingungen berechnet die Datenfusion augenscheinlich eine glatte und rauscharme Trajektorie etwa mittig des Fahrstreifens. Qualitativ lässt sich sagen, dass das primäre Ziel der fahrstreifengenauen Ortung mit Hilfe des einfachen Korrekturdatentyps erreicht wird.

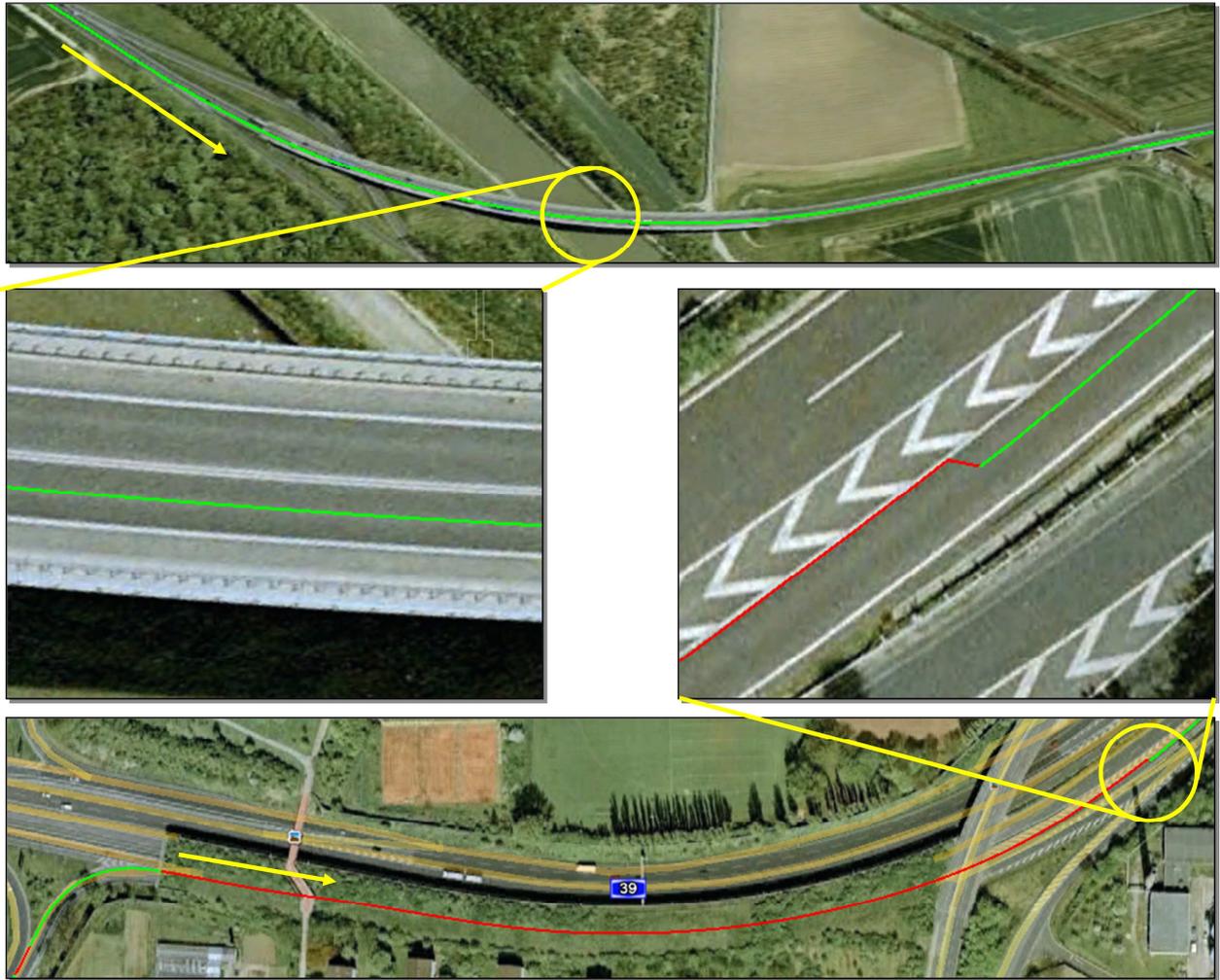


Abbildung 3-19: Trajektorien unter optimalen und gestörten Satellitensichtbarkeitsbedingungen

Die untere Trajektorie in Abbildung 3-19 zeigt ein Beispiel der Positionierungsgüte bei kompletter Signalabschattung aller Satelliten. Das Beispiel zeigt die Trajektorie einer Tunneldurchfahrt mit einer Fahrstrecke von etwa 500 m (~20 s). Während der Abschattung nutzt die Datenfusion lediglich die Messwerte der Fahrdynamiksensoren. Bei der Tunnelausfahrt beträgt der Integrationsfehler der Fusion etwa 1,2 m. Die Positionierungsgenauigkeit liegt nach wie vor im Bereich der halben Fahrstreifenbreite (1,75 m). Also wäre unter diesen Randbedingungen eine Zuordnung des Fahrzeugs auf den richtigen Fahrstreifen möglich.



Abbildung 3-20: Trajektorie in einem Wohngebiet

Die herausforderndsten Rahmenbedingungen für eine GNSS-basierte Ortungsfusion herrschen in urbanen Umgebungen, in denen teilweise nur 50% oder weniger der Messepochen eine Standalone-Lösung zulassen. Ein Beispiel für ein solches Szenario ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Es zeigt einen etwa 2 km langen Abschnitt einer Fahrt durch ein Wohngebiet. Obwohl der GPS-Empfang schlecht und nahezu nur an Kreuzungen überhaupt möglich ist, zeigt die fusionierte Trajektorie keine großen Ausreißer.

Quantitative Ergebnisse

Neben einer qualitativen Evaluierung wurde auch eine quantitative Bewertung der Positionierungsgüte durchgeführt. Die folgende Abbildung 3-21 zeigt die Fehlerverteilung des FAMOS-Positionierungsmoduls im Vergleich zur Referenztrajektorie.

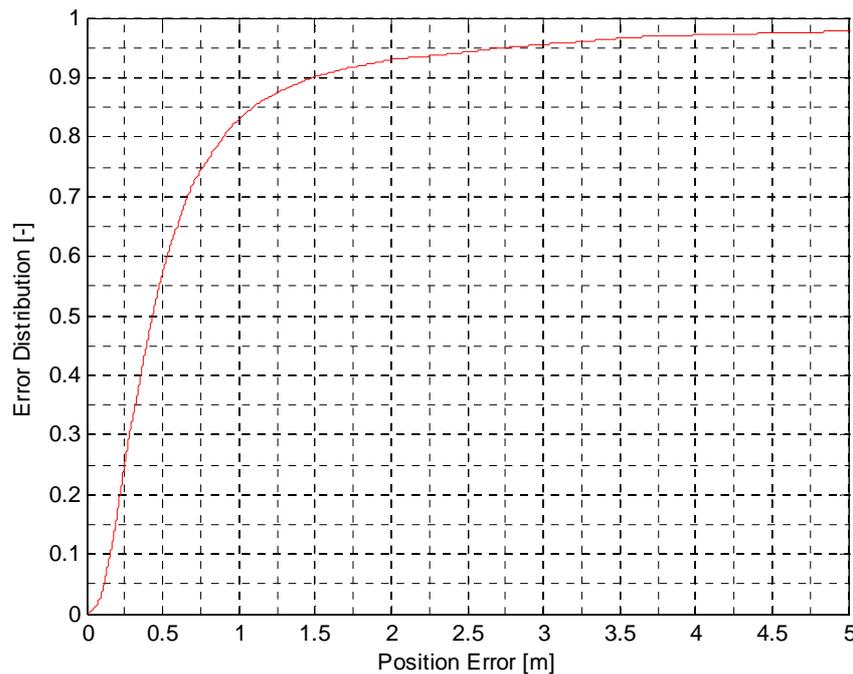


Abbildung 3-21: Positionierungsfehlerverteilung des FAMOS-Ortungsmoduls im Autobahn-Szenario

Der Vergleich der Positionen des FAMOS-Ortungsmoduls mit der Referenz zeigt, dass mehr als 80 % der berechneten Positionslösungen eine Ablage < 1 m von der Referenz aufweisen. Die Absolutgenauigkeit ist unter anderem ein Ergebnis des genutzten Korrekturdatentyps. In diesem Fall zeigt sich also, dass der vergleichsweise simple RTCM 2.3 Message Type 1 eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht.

Abbildung 3-22 zeigt die Verteilung des Kursfehlers für die entsprechende Messfahrt. Es ist ersichtlich, dass 95% der berechneten Kurswerte einen Fehler von $0,5^\circ$ oder weniger im Vergleich zur Referenztrajektorie aufweisen. Die Güte der Kursgenauigkeit ist insbesondere von Bedeutung, wenn Umfeldsensoren im Fahrzeug für Assistenzsysteme genutzt werden und andere Verkehrsteilnehmer Fahrspuren zugeordnet werden müssen. Die Größe des Fehlers ist ein direktes Ergebnis der Güte der Ortungsfusion.

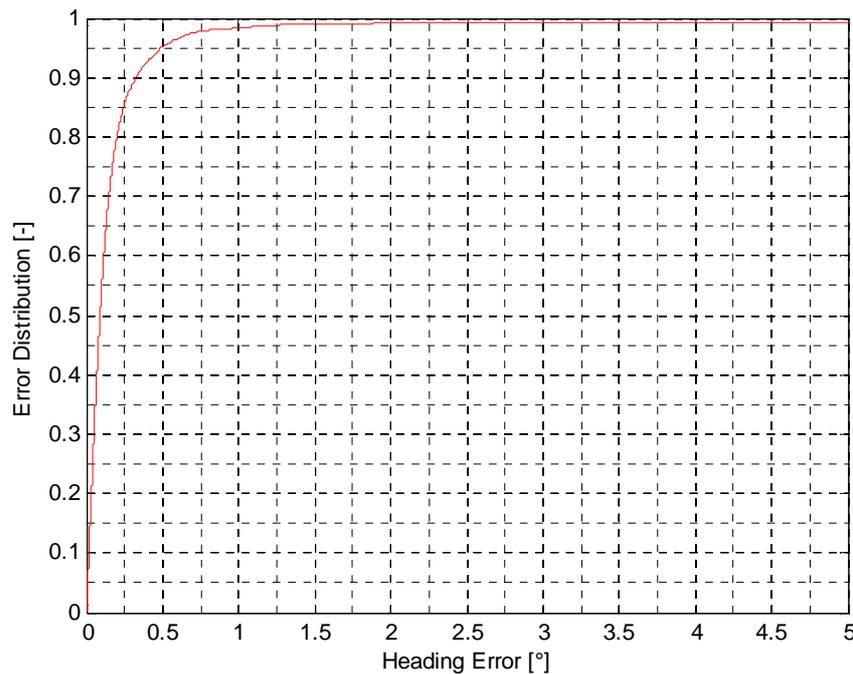


Abbildung 3-22: Kursfehlerverteilung des FAMOS-Ortungsmoduls im Autobahn-Szenario

3.1.6 Zusammenfassung

Basierend auf der Voruntersuchung wurde ein enggekoppeltes Positionierungsmodul zur Fahrzeugpositionierung implementiert. Als Grundlage dienen drei Datenquellen: GNSS-Rohdaten, Messungen der Fahrdynamiksensoren sowie Korrekturdaten einer Referenzstation.

Es konnte gezeigt werden, dass die Fusion in Zeiten der Signalabschattung über mehrere hundert Meter auf Basis der Fahrdynamiksensoren eine Positionslösung mit angemessener Genauigkeit berechnen kann.

Die Ausgabe des Positionierungsmoduls ist ein Zustandsvektor der Fahrzeugbewegung inklusive Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung. Diese Information wird an die nachgelagerten Assistenzsysteme über den CAN-Bus weitergeleitet. Die Implementierung in ADTF erlaubt eine Echtzeitprozessierung mit der geforderten geringen Latenz.

3.2 Nutzen und Verwertbarkeit

Das Institut für Flugführung ist als Forschungseinrichtung primär an der wissenschaftlichen Nutzung der Ergebnisse interessiert. Die wissenschaftlichen Ergebnisse im Bereich der Fahrzeugnavigation erlaubten es dem IFF als Partner in verschiedenen nationalen und europäischen Projekten Aufgaben zu übernehmen (z.B. „Testplattform für GNSS Automotive TEGA“) und haben damit den Technologiestandort Braunschweig und Deutschland gestärkt.

Die Ergebnisse wurden außerdem zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses verwendet (Bachelorarbeit z.B. A. Strassheim, Diplomarbeit N. Grabo, Dissertation A. Sasse, Vorlesungen Flugmesstechnik, Satellitennavigation, e.t.c.).

3.3 Abgrenzung von anderen Projekten

Projekt	Beschreibung und Abgrenzung
GENEVA	Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung an innerstädtischen Kreuzungen, Fahrzeugzustandsschätzung fokussiert auf den innerstädtischen Bereich und Richtungsschätzung

Tabelle 3-3: Relevante Projekte

3.4 Veröffentlichungen

Veranstaltung	Datum, Ort	Beitrag	beteiligte Partner
7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles 2010	6. – 8. September 2010, Lecce, Italien	On the Definition of Lane Accuracy for Vehicle Positioning Systems	IFF
ION GNSS 2010	21. – 24. September 2010, Portland, USA	Optimization of Vehicle Positioning System Architectures for Future Automotive Applications	IFF
ENC GNSS 2010	19. – 21. Oktober 2010, Braunschweig, Deutschland	Achieving reliable vehicle positioning for safety-relevant driver assistance systems using series production sensor technology	IFF, VW
ION GNSS 2011	19. – 23. September 2011, Portland, USA	A GPS/Galileo Tightly-Coupled Localization System for Safety-Relevant Automotive Assistance Systems	IFF
AAET 2012	8. – 9. Februar 2012, Braunschweig, Deutschland	FAMOS - Ortung und Kommunikation	OCN, IFF, FhG, NC

Tabelle 3-4: Öffentlichkeitswirksame Maßnahmen

4 Anhang 1 – Referenzen

4.1 Abkürzungen

Es wird auf das projektweite Abkürzungsverzeichnis verwiesen [BD-1].

4.2 Bezugsdokumente

- [BD-1] Volkswagen AG & Projektpartner: FAMOS – AP 1100 Abkürzungsverzeichnis. 2012
- [BD-2] Ulrich Haak, Andreas Sasse and Prof. Peter Hecker: On the Definition of Lane Accuracy for Vehicle Positioning Systems, 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles 2010
- [BD-3] Hans-Georg Büsing, Andreas Sasse, Tobias Scheide, Prof. Peter Hecker, Optimization of Vehicle Positioning System Architectures for Future Automotive Applications, ION GNSS 2010
- [BD-4] Andreas Sasse, Tobias Scheide, Hans-Georg Büsing, Prof. Peter Hecker, Institute of Flight Guidance, Braunschweig University of Technology, Bernd Dornieden, Fabian Hüger, Dr. Lutz Junge, Thomas Biehle, Group Research, Volkswagen AG, Achieving reliable vehicle positioning for safety-relevant driver assistance systems using series production sensor technology, ENC 2010
- [BD-5] Hans-Georg Büsing, Martin Escher, Tobias Scheide, Prof. Peter Hecker, A GPS/Galileo Tightly-Coupled Localization System for Safety-Relevant Automotive Assistance Systems, ION GNSS 2011
- [BD-6] Andreas Kahmann, Stephan Ritter, Timo Nels (OECON Products & Services), Hans-Georg Büsing, Martin Escher, Tobias Scheide, Prof. Dr. Peter Hecker (TU Braunschweig), Dr. Günter Rohmer, Christian Fiermann (Fraunhofer IIS), Uwe Stehr (IMST GmbH), Stefan Götte (NavCert GmbH), FAMOS - Ortung und Kommunikation, AAET 2012

■ Ende des Dokuments ■

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht zum 31.03.2012 – öffentlicher Teil Galileo for Future Automotive Systems FAMOS Teilvorhaben: Institut für Flugführung Förderkennzeichen: 19S9007D	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Büsing, Hans-Georg; Sasse, Andreas; Bestmann, Ulf; Hecker, Prof. Dr.-Ing. Peter	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.3.2012
	6. Veröffentlichungsdatum 30.9.2012
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Flugführung Technische Universität Braunschweig Hermann-Blenk-Str. 27 38108 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen FKZ: 19S9007D
	11. Seitenzahl 43
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 74
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 22
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das vorliegende Dokument beschreibt die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Instituts für Flugführung der TU Braunschweig im Projekt „Galileo for Future Automotive Systems – FAMOS“. Zur Korrektur der GNSS Rohdaten wurden unterschiedliche Korrekturdatentypen evaluiert. Dabei war insbesondere von Interesse, in welchem Detailgrad Korrekturdaten vorliegen müssen, um eine Positionierung im Bereich $1\sigma \leq 1m$ durchführen zu können. Es konnte gezeigt werden, dass eine Positionslösung der erforderlichen Genauigkeit erreicht werden kann, indem man den RTCM Message Type 1 verwendet, der gleichzeitig nur eine geringe Übertragungsbandbreite benötigt. Im Bereich der Präzisionsortung für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme wurde zunächst der derzeitige Stand der Wissenschaft evaluiert. Basierend auf dieser Recherche wurden bisherige Ansätze weiterentwickelt und mit Integritätsansätzen aus der Luftfahrt verbunden. Weiterhin wurde der besonderen Umgebung der Positionierung Sorge getragen, indem ein besonderes Augenmerk auf die Gewichtung von schwachen und gestörten Signalen eingegangen wird. Darauf basierend wurde eine Sensordatenfusion zur Kopplung von Rohdaten aus einem kombinierten GPS/Galileo-Empfänger mit Fahrdynamiksensoren entwickelt. Die Positionierungsalgorithmen wurden in Fahrversuchen erfolgreich getestet und die Echtzeitfähigkeit der Implementierung im Rahmen des Projekts validiert.	
19. Schlagwörter Fahrzeugnavigation, Positionierung, Fahrerassistenzsysteme, GPS, Galileo	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report	
3. title Schlussbericht zum 31.03.2012 – öffentlicher Teil Galileo for Future Automotive Systems FAMOS Teilvorhaben: Institut für Flugführung Förderkennzeichen: 19S9007D		
4. author(s) (family name, first name(s)) Büsing, Hans-Georg; Sasse, Andreas; Bestmann, Ulf; Hecker, Prof. Dr.-Ing. Peter	5. end of project 31.3.2012	6. publication date 30.9.2012
	7. form of publication report	
	8. performing organization(s) (name, address) Institut für Flugführung Technische Universität Braunschweig Hermann-Blenk-Str. 27 38108 Braunschweig	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn		9. originator's report no.
		10. reference no. FKZ: 19S9007D
		11. no. of pages 43
16. supplementary notes		13. no. of references 74
		14. no. of tables 4
		15. no. of figures 22
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract This report describes the scientific and technical results of the Institute of Flight Guidance at Technische Universität Braunschweig in the project „Galileo for Future Automotive Systems – FAMOS“.		
To correct the GNSS raw data measurements different types of correction have been evaluated. It was of special interest how detailed corrections are necessary to allow for a positioning accuracy of $1\sigma \leq 1m$. It could be shown that a positioning solution that meets the requirements could be achieved by using RTCM Message Type 1 that only requires a limited data link bandwidth.		
In the field of precise positioning for safety relevant driver assistance systems the current state of the technology was evaluated. Based on that evaluation the current approaches have been enhanced and improved and integrity methods from airborne navigation have been integrated. Additionally the particular environment of vehicle positioning has been considered by limiting the influence of measurements from disturbed signals. A sensor data fusion has been implemented that couples raw data measurements from the GNSS receiver with measurements from the vehicle dynamic sensors. The positioning algorithms have successfully been validated in test drives and the real time capability could be proven within this project.		
19. keywords Vehicle navigation, positioning, advanced driver assistance systems, GPS, Galileo		
20. publisher	21. price	