

# **Modellbasierte Interferenzkompensation für die satellitengestützte Ortung in urbanen Szenarien**

Local Interference Compensation for GNSS

**Genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dortmund**

**von**

**Dipl.-Ing. Brian Niehöfer**

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze
Dissertation eingereicht am:	24. Sep. 2015
Tag der mündlichen Prüfung:	15. Feb. 2016



Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 13

**Brian Niehöfer**

**Modellbasierte Interferenzkompensation für die  
satellitengestützte Ortung in urbanen Szenarien**

Local Interference Compensation for GNSS

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4365-5

ISSN 1867-4879

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie das Werk einer einzelnen Person. Deshalb möchte ich mich an dieser Stelle bei all den Menschen bedanken, die mir die Erstellung meiner Dissertation überhaupt erst ermöglicht haben. Allen voran Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld, der mir nicht nur den interessanten Themenbereich mit vielen Freiheiten diesen zu erschließen anvertraute und jederzeit für Diskussionen und Anregungen da war, sondern mich mit seinem unerschöpflichen Fundus an thematischen und wissenschaftlichen Hinweisen öfter als einmal in die richtige Richtung lenkte, mich wenn nötig auch mal erdete und so die Qualität dieser Arbeit geprägt und verbessert hat.

Ebenfalls gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze, Prof. Dr. Christian Wöhler und Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz, die im Zuge Ihrer Tätigkeit in meiner Prüfungskommission mir jederzeit helfend zur Seite standen und so nicht nur den erfolgreichen Abschluss ermöglichten, sondern ebenfalls die Qualität meiner Arbeit verbesserten.

Natürlich gilt mein Dank auch meinen Kollegen und Freunden am Lehrstuhl wie auch allen Studenten die mich im Rahmen von Abschluss- und Projektarbeiten oder als Hilfskräfte mit ihrem Engagement und Ideen unterstützt wie auch angespornt haben und dadurch bei der Entwicklung dieser Arbeit kaum wegzudenkende Beiträge geleistet haben. Dabei möchte ich speziell Dipl.-Ing. Sebastian Subik, Dr.-Ing. Markus Putzke, M.Sc. Sarah Lehnhausen und M.Sc. Florian Schweikowski erwähnen, die mit Rat und Tat, zielführenden Diskussionen und konstruktiver Kritik da waren, als ich sie gebraucht habe.

Als letztes erwähnen möchte ich meine über alles geliebte Familie, deren vergangene Jahre nicht minder aufreibend verlaufen sind, wie die meinen. Meine Frau Alexandra, meine Tochter Sophie und meinen Sohn Jonah, meine Eltern Monika und Dieter wie auch meine Schwiegereltern Karin und Christian die dieses Werk trotz meiner manchmal schlechten Laune und Zeiten der überstrapazierten Nerven in allen Phasen mit jeder nur möglichen Unterstützung bedacht haben. Ihnen gilt mein besonderer Dank. Ohne euch alle hätte ich weder den Mut noch die notwendige Durchhaltekraft aufbringen können, diese Arbeit so erfolgreich abzuschließen.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'S. Subik', written in a cursive style.



# Kurzfassung

Die satellitengestützte Ortung von Personen oder Objekten ist die verbreitetste Möglichkeit der Positionsbestimmung der heutigen Zeit. Jedoch können aktuelle Systeme beispielsweise in urbanen und damit herausfordernden Umgebungen keine Positionierung innerhalb einer Spurbreite garantieren, wodurch die Möglichkeiten für aufsetzende Applikationen und Services, die eine spurgenaue Ortung bedürfen, begrenzt werden. Dies liegt primär in den verbleibenden und schwer zu quantifizierenden Fehleinflüssen auf die Satellitensignale selbst begründet, wie beispielsweise ionosphärische Brechung, troposphärische Verzögerungen oder den lokalen Mehrwegeeffekten, da gerade letztere in Abhängigkeit der gegebenen Ort-/Zeitkombination als hoch dynamisch und individuell zu charakterisieren sind. Angrenzende Technologien wie auch themenverwandte Forschungsansätze zu dieser Arbeit zeigen zwar im Mittel stets ein signifikantes Maß an Genauigkeitssteigerung, lassen jedoch die umfassende Integrität und/oder Einsetzbarkeit gerade in urbanen Szenarien mit eingeschränkter Sicht zu den Satelliten vermissen oder erfordern einen hohen Installationsaufwand durch zusätzliche Hardware.

Die hier vorliegende Arbeit fokussiert sich daher auf die Entwicklung einer modellbasierten und damit umfassend einsetzbaren Möglichkeit der Genauigkeitssteigerung von globalen, satellitengestützten Navigationssystemen mittels Interferenzkompensation. Mit Hilfe der entwickelten und so genannten *LOcal interference Compensation (LOCATe)* werden, basierend auf einem eigens geschaffenen, modularen und mittlerweile frei verfügbaren Satellitensimulator, dem *Open Source Satellite Simulator (OS<sup>3</sup>)* die aktuellen Satellitenpositionen des betrachteten Systems berechnet. In Kombination mit einem 3D Modell der Empfängerumgebung, eines Ray-Tracers und korrespondierenden Webservices und Datenbanken zur Ermittlung von Atmosphäreneinflüssen und Topologie, können somit alle Einflüsse auf die Satellitensignale selbst präzisiert werden. Darauf aufbauend quantifiziert *LOCATe* die Gesamtfehler abhängig von der gegebenen Ort-/Zeitkombination und kompensiert diesen im Nachgang. Basierend auf voneinander unabhängigen Evaluationsansätzen wird sowohl analytisch, wie auch modellbasiert eine signifikante Steigerung der Ortungsgenauigkeit von > 45% im Mittel, wie auch eine Reduzierung des maximalen Fehlers > 50% belegt und durch empirische Messungen an zwei Referenzpunkten mit dem eigens entwickelten *Advanced Software-Defined GNSS Receivers (ASDR)* untermauert.

Um eine Einordnung der hier vorliegenden Arbeit zu ermöglichen, wird zusätzlich ein aktueller und themenverwandter Forschungsansatz mit einer analogen Zielsetzung zum direkten Vergleich mit der *LOCATe* nachempfunden. Dabei zeigen sowohl analytische Untersuchungen wie auch durchgeführte Messungen mittels *ASDR* in urbanen Szenarien mit hohen Wahrscheinlichkeiten des *Non-Line-of-Sight* Empfangs von Satellitensignalen eine signifikante Steigerung der erzielten

---

Ortungsgenauigkeit mittels *LOCATe*. Gerade die Verwendung eines eigens umgesetzten Tools zur Fehlerbestimmung ermöglicht dabei eine *White Box*-Analyse des vollständigen Systemaufbaus frei von potentiellen Filter- oder Optimierungsmethoden in kommerziellen Tools und somit eine valide Quantifizierung der jeweiligen Genauigkeitssteigerung.

Ebenfalls werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Fallstudien im Themenfeld des Straßenverkehrs diskutiert und sowohl mit als auch ohne Einsatz der *LOCATe* bewertet. Hierbei handelt es sich zum einen um die spurgenaue Ortung von Verkehrsflussobjekten zur dynamischen Verkehrsprognose, als auch um die Cloud-basierte Erstellung von Straßenkartenmaterial. Beide stehen dabei exemplarisch für die Eingangs angeführten Anwendungen mit der Anforderung der spurgenaue Ortung von Objekten im Straßenverkehr und würden folgerichtig unmittelbar von einer Entwicklung wie *LOCATe* profitieren. Es wird sich zeigen, dass eingeführte Erweiterungen und kontextsensitive Betrachtungen mit Hilfe der *LOCATe* eine signifikante Leistungssteigerung in beiden Fallstudien in annähernd Echtzeit und eine spurgenaue Zuordnung von Ortungsmessungen in urbanen und herausfordernden Szenarien in  $\approx 90\%$  aller Fälle ermöglichen. Dies entspricht einer Steigerung gegenüber den durchgeführten kommerziellen GPS Messungen um das Achtfache und einer deutlichen Annäherung an die theoretisch optimal erreichbare Ortungsgenauigkeit. Neben der somit erreichten signifikanten Steigerung von Genauigkeit, Integrität und Abdeckung, wahrt *LOCATe* dank des Cloud-basierten Ansatzes zusätzlich die Ressourcenbeschränktheit von vorhandenen mobilen Endgeräten und reduziert somit folgerichtig auch potentielle Installationskosten eines laufenden Systems.



# Abstract

Global Navigation Satellite Systems are nowadays the most common way for the tracking of people or objects. However, existing systems cannot guarantee tracking accuracy within a lane-width due to external influences that impair the quality of the satellite signals, such as ionospheric refraction or tropospheric delays. The accuracy is further degraded especially in urban environments due to multipath effects, which are highly dynamic, individual and position-specific. This in turn impacts the performance of applications and services that rely on a high degree of tracking accuracy. Recent related research results indicate a variety of techniques available that significantly improves on the accuracy of positioning solutions, however they lack in ensuring service integrity and applicability in the challenging urban environment and scenarios. On the other hand, solutions that are offered to improve upon the impaired sight to the satellites require high installation cost incurred by additional hardware.

In view of the above mentioned challenge, this thesis focuses on the development of a model-based generic approach for increasing the accuracy of Global Navigation Satellite Systems without neglecting adjacent performance indicators by means of interference compensation. For this purpose, a high fidelity simulation framework, referred to as *Local interference compensATIOn (LOCATe)* has been developed using the *Open Source Satellite Simulator (OS3)*. *LOCATe*, can not only estimate the position of any satellite in any given constellation, but it can also accurately predict the influences on the satellite signal by incorporating a highly detailed 3D ray-tracing model of the surrounding receivers, corresponding web services, databases for determining atmospheric effects and the given topology. This enables *LOCATe* to quantify the resulting overall error depending on the given position/time combination and compensates for the most-likely interferences. Independent evaluation approaches, analytical as well as model-based ones, show a significant gain in the positioning accuracy by more than 45% on average, and a reduction of the maximum error by more than 50%. Furthermore, the performance and computational requirements of the *LOCATe* framework has been validated by performing experimental measurements at two reference points with the specially developed *Advanced Software Defined GNSS Receiver (ASDR)*. Thereby, the usage of self-developed tools for the evaluation process facilitates a White Box analysis of the complete system design irrespective of filter or optimization methods in commercial tools. Hence, the results reflecting a valid quantification of the increased accuracy by *LOCATe* only.

For analysis and demonstration, this work evaluates two use case studies in the subject area of traffic systems with and without the use of *LOCATe*. One use case addresses the lane-specific positioning of traffic objects for dynamic traffic forecast, whereby the second use case aims on a cloud-based generation of

---

road maps. Both are exemplary applications with the above mentioned requirement of lane-specific positioning and would consequently benefit directly from a simulation framework like *LOCATe*.

It has been shown that developed extensions and contextual considerations combined with *LOCATe* leads to a significant increase in performance in both use case scenarios in almost real time and a lane-specific allocation of positioning measurements in urban and by that challenging scenarios in  $\approx 90\%$  of all cases. This amounts to eight times the gain when compared to the measurements conducted with commercial GPS systems, and thus significantly closer to the theoretically optimal achievable location accuracy that can be achieved theoretically. Due to the cloud-based approach, *LOCATe* also maintain to the resource limitations of existing mobile devices and hence may be used in combination with already existing and highly prevailing user equipment to achieve a significant increase of accuracy and integrity.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Modellbasierte Genauigkeitssteigerung für GNSS</b>	<b>1</b>
1.1 Global Navigation Satellite Systems (GNSS) - Eine Einleitung . .	1
1.2 Entwicklung der GNSS Performanz und Nutzerdichte . . . . .	3
1.3 Motivation: Urbane, Spurgenaue Ortung von Verkehrsflussobjekten	4
1.4 Wissenschaftliche Herausforderungen für GNSS in urbanen Umgebungen . . . . .	6
1.4.1 Optimierungspotential der satellitenbasierten Ortung . . .	6
1.4.2 Urban Canyons als Ursache des ungenutzten Potentials .	7
1.4.3 Zielsetzung: Orts- und zeitkontinuierliche Leistungssteigerung der KPIs . . . . .	8
1.4.4 Rechenzeit und Durchdringungsrate als zusätzliche KPIs .	9
1.5 Problemdefinition . . . . .	10
1.6 Methodik . . . . .	11
1.7 Wissenschaftliche Beiträge . . . . .	13
1.7.1 Modularer Open-Source Satellitensimulator zur Modellierung und Evaluation beliebiger Konstellationen . . . . .	14
1.7.2 Modellbasierter Ansatz zur ort-/zeitspezifischen Interferenzbestimmung und -kompensation . . . . .	14
1.7.3 Spurgenaue Ortung in urbanen Szenarien mittels GPS . .	15
1.7.4 Experimentalsystem der entwickelten Prozesskette . . . . .	15
1.8 Gliederung der Arbeit . . . . .	15
<b>2 Grundlagen der satellitengestützten Ortung</b>	<b>17</b>
2.1 Grundidee der satellitenbasierten Ortungssysteme . . . . .	17
2.1.1 Aus der Entfernungsbestimmung zur eigenen Position . .	18
2.1.2 Bestimmung der Satellitenposition - Two-Line-Elements .	19
2.1.3 Umsetzung der Entfernungsbestimmung - PRN Codes . .	21
2.2 Heterogene Fehlerquellen innerhalb GNSS . . . . .	24
2.2.1 Uhren- und Ephemeridienfehler . . . . .	26
2.2.2 Atmosphärische Einflüsse . . . . .	26
2.2.3 Mehrwegeeffekte - Lokale und ortsspezifische Einflüsse . .	28

2.2.4	Künstliche Interferenzen - Spoofing, Meaconing und Jamming . . . . .	31
2.3	Anforderungen an satellitenbasierte Ortungssysteme . . . . .	31
2.3.1	Key Performance Indicators (KPIs) . . . . .	31
2.3.2	Systemanforderungen und Anforderungsprofile . . . . .	32
2.3.3	Nutzeranforderungen . . . . .	33
2.3.4	<i>Dilution of Precision (DOPs)</i> . . . . .	34
2.4	Mögliche Bewertungsmethoden der GNSS Leistungscharakteristika . . . . .	35
2.4.1	Analytische Bewertung . . . . .	36
2.4.2	Modellbasierte Betrachtungen - Ray-Tracing Grundlagen . . . . .	37
2.4.3	Empirische Evaluation . . . . .	38
	Lessons Learned - satellitenbasierten Ortung, Fehleinflüsse, Anforderungen und Bewertungsmethoden . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Steigerung der Ortungsgenauigkeit durch Technik und Forschung</b>	<b>41</b>
3.1	Pre-Processing: Präventive Ortungsverbesserung und deren Einschränkungen . . . . .	41
3.1.1	Inertiale Navigation . . . . .	41
3.1.2	Augmentation Systems . . . . .	43
3.1.3	Mehrfrequenz GNSS . . . . .	47
3.1.4	Pseudolites . . . . .	48
3.1.5	GNSS Antennen Technologie . . . . .	49
3.1.6	Mehrwegedetektion durch 3D Modellierung . . . . .	50
3.1.7	Bewertungsmatrix der Pre-Processing Methoden . . . . .	52
3.2	Post-Processing: Reaktiven Fehlerkompensation für GNSS . . . . .	53
3.2.1	Assisted GPS (AGPS) . . . . .	53
3.2.2	Integrierte Navigation und Dead Reckoning . . . . .	54
3.2.3	Softwarebasierte Filterungen . . . . .	55
3.2.4	Map Matching . . . . .	57
3.2.5	Modellbasierte Methoden mit direktem Bezug zu <i>LOCATe</i> . . . . .	58
3.2.6	Bewertungsmatrix von post-simulativen Verbesserungsansätzen . . . . .	61
	Lessons Learned - Abgrenzung von <i>LOCATe</i> zu vorhandenen Ansätze . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Local interferenCe compensATIon - Architektur, Funktionen, Umsetzung</b>	<b>63</b>
4.1	Grundidee: Quantifizierbare Fehlerstreuung beliebiger GNSS Konstellationen . . . . .	63
4.2	<i>LOCATe</i> als Modellbasierter Optimierungsansatz . . . . .	66
4.2.1	Grundlegendes Vorgehen - Präzidieren, Quantifizieren, Kompensieren . . . . .	67
4.2.2	Modularer Aufbau der <i>LOCATe</i> . . . . .	68
4.3	Funktionale Module der <i>LOCATe</i> . . . . .	69

4.3.1	Modul Satellitenbewegung: <i>Open Source Satellite Simulator (OS<sup>3</sup>)</i> . . . . .	70
4.3.2	Modul Atmosphäreneinflüsse . . . . .	80
4.3.3	Modul Mehrwege Betrachtungen . . . . .	82
4.3.4	Modul Plausibilitätsbetrachtungen . . . . .	83
4.3.5	Cloud gestützter Ansatz - Eine Backend Lösung mittels Webservices . . . . .	84
4.4	Entwickeltes Experimentalsystem - <i>Advanced Software-Defined GNSS Receiver</i> . . . . .	86
4.4.1	Stand-Alone Filtering Mechanics . . . . .	88
4.4.2	Dual-Link Characteristic . . . . .	88
4.4.3	<i>Smart Constellation Selection (SCS)</i> . . . . .	89
	Lessons Learned - <i>LOcal interfeRenCe compenSATion (LOCATe)</i> . . .	92
<b>5</b>	<b>Leistungsevaluation der LOCATe Methode</b>	<b>95</b>
5.1	Leistungsvergleich von GNSS Konstellationen als Ausgangswert .	95
5.1.1	Genauigkeitsbestimmung der aktuellen GPS Konstellation	96
5.1.2	Grenzen der Anwendung im Verkehrswesen . . . . .	97
5.2	Leistungsbewertung der <i>LOCATe</i> . . . . .	102
5.2.1	Versuchsaufbau zur experimentellen Bewertung . . . . .	102
5.2.2	Quantitative Genauigkeitssteigerung durch <i>LOCATe</i> . . .	103
5.2.3	Sensitivitätsanalyse der <i>LOCATe</i> gegenüber Modelldetails	105
5.3	Anwendbarkeit in Echtzeit: <i>Real-Time LOCATe (RT-LOCATe)</i> .	108
5.3.1	Erweiterung Differentielles <i>LOCATe - dLOCATe</i> . . . . .	109
5.3.2	Erweiterung <i>Predictive LOCATe - pLOCATe</i> . . . . .	112
5.4	Effizienzbewertung durch Einbeziehung der notwendigen CPU Zeit	114
5.5	Einordnung in aktuelle Forschungsarbeiten . . . . .	117
	Lessons Learned - Abschließende Bewertung von <i>LOCATe</i> . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Kontextsensitiver Einsatz von LOCATe im Straßenverkehr</b>	<b>123</b>
6.1	Spurgenaue Ortung als Zielsetzung für <i>LOCATe</i> . . . . .	123
6.2	Fallstudie 'Spurgenaue Verkehrsprognose' . . . . .	124
6.2.1	Motivation der orts- und zeitkontinuierlichen Datenaggregation im Verkehrswesen . . . . .	125
6.2.2	Kontextsensitive Betrachtungen in Verkehrsszenarien . . .	125
6.2.3	Bewertung der <i>LOCATe</i> zur spurgenauen Ortung . . . . .	126
6.3	Fallstudie 'Cloud-basierte Kartengenerierung' . . . . .	129
6.3.1	Motivation und Ansatz des Kartengenerators . . . . .	129
6.3.2	Funktioneller Aufbau - Von individueller Bewegung zum Kartenmaterial . . . . .	130
6.3.3	Beispiel der iterativen Kartengenerierung . . . . .	131
6.3.4	Vergleich Kartengenerator mit/ohne <i>LOCATe</i> . . . . .	133

Lessons Learned - Bewertung der <i>LOCATe</i> für Anwendungen im Straßenverkehr . . . . .	135
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>137</b>
7.1 <i>Local interferenCe compensATion</i> for GNSS . . . . .	137
7.2 Anwendung der Real-Time <i>LOCATe</i> in Verkehrsszenarien . . . . .	139
7.3 Vergleichende Leistungsbewertung mittels Effizienzanalyse . . . . .	141
<b>8 Ausblick - Mögliche Erweiterungen der LOCATe</b>	<b>143</b>
8.1 Zusätzlicher Nutzen des <i>ASDR</i> . . . . .	143
8.2 Filtererweiterungen und deren Wirkung auf <i>LOCATe</i> . . . . .	145
8.3 Ray-Tracing Optimierung mittels Smart Model Simplification . . . . .	148
<b>A Referenzkoordinatensysteme und physikalische Erdmodelle</b>	<b>151</b>
A.1 <i>Earth-Centered Inertial Coordinate Sytem (ECI)</i> . . . . .	151
A.2 <i>Earth-Centered Earth-Fixed Coordinate System (ECEF)</i> . . . . .	152
A.3 Vereinfachter Erdellipsoid - World Geodetic System . . . . .	152
A.4 Unterschied Modell, Geoid und Topographie . . . . .	153
<b>B Verwendeten Szenarien der SPAD</b>	<b>155</b>
<b>C Wissenschaftliche Beiträge</b>	<b>157</b>
C.1 Publikationen . . . . .	157
C.1.1 Konferenzen . . . . .	157
C.1.2 Wissenschaftliche Fachzeitschriften . . . . .	159
C.2 Auszeichnungen . . . . .	159
C.3 Internationale Vernetzung und Konferenzorganisation . . . . .	160
C.4 Mitarbeit an wissenschaftlichen Forschungsprojekten . . . . .	161
C.5 Betreuung von Abschlussarbeiten . . . . .	161
C.6 Lehraufgaben . . . . .	162
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>