

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Modellbasierte Genauigkeitssteigerung für GNSS	1
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 entwickelte Prozesskette	15
1.8 Gliederung der Arbeit	15
2 Grundlagen der satellitengestützten Ortung	17
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
3	Steigerung der Ortungsgenauigkeit durch Technik und Forschung	41
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
4	LOcal interfeRenCe compensATIOn - Architektur, Funktionen, Umsetzung	63
4.1	Grundidee: Quantifizierbare Fehlerstreuung beliebiger GNSS Konstellationen	63
4.2	<i>LOCATe</i> als Modellbasierter Optimierungsansatz	66
4.2.1	Grundlegendes Vorgehen - Prädizieren, 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 (OS⁹)</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
5	Leistungsevaluation der LOCATe Methode	95
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</i> - <i>dLOCATe</i>	109
5.3.2	Erweiterung <i>Predictive LOCATe</i> - <i>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
6	Kontextsensitiver Einsatz von LOCATe im Straßenverkehr	123
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
7 Zusammenfassung	137
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
8 Ausblick - Mögliche Erweiterungen der <i>LOCATe</i>	143
8.1 Zusätzlicher Nutzen des <i>ASDR</i>	143
8.2 Filtererweiterungen und deren Wirkung auf <i>LOCATe</i>	145
8.3 Ray-Tracing Optimierungen mittels Smart Model Simplification	148
A Referenzkoordinatensysteme und physikalische Erdmodelle	151
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 Verwendeten Szenarien der SPAD	155
C Wissenschaftliche Beiträge	157
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
Literaturverzeichnis	165