

# 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 entwickelte 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, Anforde- rungen 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 Ein- schränkungen . . . . .	41
3.1.1	Inertiale Navigation . . . . .	41
3.1.2	Augmentation Systems . . . . .	43
3.1.3	Mehr Frequenz GNSS . . . . .	47
3.1.4	Pseudolites . . . . .	48
3.1.5	GNSS Antennen Technologie . . . . .	49
3.1.6	Mehrwegedektion 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 Verbesserungsan- sätzen . . . . .	61
Lessons Learned - Abgrenzung von <i>LOCATe</i> zu vorhandenen Ansätze		61
<b>4</b>	<b>LOcal interferenCe compensATion - Architektur, Funktionen, Umset- zung</b>	<b>63</b>
4.1	Grundidee: Quantifizierbare Fehlerstreuung beliebiger GNSS Kon- stellationen . . . . .	63
4.2	<i>LOCATe</i> als Modellbasierter Optimierungsansatz . . . . .	66
4.2.1	Grundlegendes Vorgehen - Prädizieren, Quantifizieren, Kom- pensieren . . . . .	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>g</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 LOCATe . . . . .	102
5.2.1	Versuchsaufbau zur experimentellen Bewertung . . . . .	102
5.2.2	Quantitative Genauigkeitssteigerung durch LOCATe . . . . .	103
5.2.3	Sensitivitätsanalyse der LOCATe gegenüber Modelldetails	105
5.3	Anwendbarkeit in Echtzeit: <i>Real-Time LOCATe (RT-LOCATe)</i> . . . . .	108
5.3.1	Erweiterung Differentielles LOCATe - <i>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 LOCATe . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Kontextsensitiver Einsatz von LOCATe im Straßenverkehr</b>	<b>123</b>
6.1	Spurgenaue Ortung als Zielsetzung für LOCATe . . . . .	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 LOCATe 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 LOCATe . . . . .	133

Lessons Learned - Bewertung der <i>LOCATE</i> für Anwendungen im Stra- ßenverkehr . . . . .	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 Optimierungen mittels Smart Model Simplification . . . . .	148
<b>A Referenzkoordinatensysteme und physikalische Erdmodelle</b>	<b>151</b>
A.1 <i>Earth-Centered Inertial Coordinate System (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>