

2774-542 9

Werner Mansfeld

# Satellitenortung und Navigation

**Grundlagen und Anwendung globaler  
Satellitennavigationssysteme**

Mit 207 Bildern und 51 Tabellen



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen</b> .....	1
1.1 Einführung .....	1
1.2 Grundprinzip kooperativer Funkortungssysteme .....	3
1.2.1 Orten durch Messung des Winkels in einer Ebene .....	4
1.2.2 Orten durch Messung der Entfernung .....	5
1.2.2.1 Impulsverfahren .....	7
1.2.2.2 CW-Verfahren.....	8
1.2.3 Orten durch Messung der Entfernungsdifferenz .....	9
1.2.4 Orten durch Messung der Entfernungsänderung.....	11
1.3 Übersicht zur Konzeption von Satellitenortungssystemen .....	11
1.3.1 Allgemeine Parameter.....	11
1.3.2 Verwendete Ortungsverfahren .....	18
1.3.2.1 Orten durch Messung von Winkeln.....	18
1.3.2.2 Orten durch Messung der Entfernung .....	20
1.3.2.3 Orten durch Messung der Entfernungsdifferenz.....	24
1.3.2.4 Orten durch Messung der Entfernungsänderung .....	24
1.4 Satellitenbahn.....	25
1.4.1 Keplersche Gesetze.....	25
1.4.2 Bahnparameter.....	25
1.4.3 Sichtbarkeitsbereich.....	27
1.5 Bezugssysteme und Koordinaten .....	30
1.5.1 Kartesisches Koordinatensystem .....	31
1.5.2 Vereinbartes raumfestes Bezugssystem .....	32
1.5.3 Vereinbartes erdfestes Bezugssystem .....	33
1.5.4 Elliptisches Bezugssystem .....	34
1.5.5 Geoid .....	35
1.5.6 Geodätisches Weltsystem .....	36
1.6 Zeitsysteme .....	37
1.6.1 Sternzeit und Weltzeit .....	38
1.6.2 Dynamische Zeit .....	38
1.6.3 Atomzeit .....	39
1.6.4 Koordinierte Weltzeit UTC .....	39
1.7 Frequenz- und Zeitnormale .....	39
1.7.1 Quarzoszillatoren.....	40
1.7.2 Atomfrequenznormale .....	41
1.7.2.1 Rubidium-Frequenznormal .....	41
1.7.2.2 Cäsium-Frequenznormal .....	42
1.7.2.3 Wasserstoff-Maser-Frequenznormal .....	44
1.7.2.4 Praktische Anwendung.....	44
1.8 Elektromagnetische Wellen .....	45
1.8.1 Struktur der Welle .....	45
1.8.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit .....	48
1.8.3 Frequenzbereiche für Satellitenortungssysteme .....	51
1.8.4 Richtantennen .....	51

1.9	Ausbreitungserscheinungen .....	58
1.9.1	Freiraumausbreitung .....	58
1.9.2	Reflexion .....	59
1.9.3	Brechung (Refraktion) in der Troposphäre und Ionosphäre .....	61
1.9.4	Beugung .....	64
1.9.5	Absorption .....	64
1.9.6	Streuung .....	66
1.9.7	Wellenarten .....	67
1.9.8	Beurteilung der zu wählenden Frequenz .....	70
1.10	Informationsübertragung .....	71
1.10.1	Verfahren zur Übertragung und Gewinnung der Ortungsinformation .....	71
1.10.2	Formen des Basisbandsignals .....	72
1.10.3	Multiplexverfahren .....	73
1.10.4	Modulation des hochfrequenten Trägers .....	74
1.10.5	Spektrale Spreizung .....	75
1.10.6	Frequenzumsetzung .....	76
1.10.7	Doppler-Frequenzverschiebung .....	79
1.11	Fehlermaße in der Ortung .....	84
1.11.1	Fehlerarten .....	84
1.11.2	Fehlermaße der Standlinie .....	85
1.11.3	Fehlermaße des Standortes .....	87
1.11.3.1	Fehlerellipse .....	87
1.11.3.2	Mittlerer Punktfehler $d_{\text{rms}}$ .....	90
1.11.3.3	Fehlerkreis (CEP) .....	91
<b>2</b>	<b>Satellitensysteme für Ortung und Navigation .....</b>	<b>93</b>
2.1	TRANSIT .....	93
2.1.1	Einführung .....	93
2.1.2	Systembestandteile .....	94
2.1.2.1	Raumsegment .....	94
2.1.2.2	Kontrollsegment .....	95
2.1.2.3	Nutzersegment .....	95
2.1.3	Ortungsverfahren .....	96
2.1.4	Genauigkeit und Fehlerursachen .....	99
2.1.5	Perspektive .....	101
2.2	CIKADA .....	101
2.3	NAVSTAR-GPS .....	102
2.4	GLONASS .....	102
2.5	EUTELTRACS .....	103
2.5.1	Einführung .....	103
2.5.2	Systembestandteile .....	103
2.5.2.1	Raumsegment .....	104
2.5.2.2	Kontrollsegment .....	104
2.5.2.3	Nutzersegment .....	105
2.5.3	Ortungsverfahren .....	105
2.5.4	Ortungsgenauigkeit .....	106
2.5.5	Perspektive .....	107
2.6	QASPR .....	108
2.7	SECOR .....	108

2.7.1	Einführung .....	108
2.7.2	Systembestandteile .....	108
2.7.3	Ortungsverfahren .....	109
2.7.4	Ortungsgenauigkeit.....	110
2.8	STARFIX.....	110
2.9	DORIS .....	110
2.10	LAGEOS.....	111
2.11	PRARE .....	111
2.11.1	Einführung .....	111
2.11.2	Systembestandteile .....	111
2.11.3	Ortungsverfahren .....	111
2.11.4	Ortungsgenauigkeit.....	112
2.11.5	Perspektive .....	112
<b>3</b>	<b>Global Positioning System (GPS)</b> .....	<b>113</b>
3.1	Einführung .....	113
3.2	Segmente des Systems .....	116
3.2.1	Raumsegment .....	116
3.2.1.1	Satelliten .....	118
3.2.1.2	Satellitenbahn.....	119
3.2.2	Kontrollsegment .....	120
3.2.2.1	Hauptkontrollstation.....	122
3.2.2.2	Monitorstationen .....	123
3.2.2.3	Bodensendestationen.....	123
3.2.3	Nutzersegment.....	124
3.3	Satellitensignale .....	125
3.3.1	Übersicht .....	125
3.3.2	Hochfrequente Träger.....	126
3.3.3	Ortungssignale .....	127
3.3.3.1	Erzeugung der PRN-Impulsfolgen .....	128
3.3.3.2	C/A-Code .....	130
3.3.3.3	P-Code und P(Y)-Code .....	131
3.3.4	Navigationsmitteilung.....	133
3.3.5	Sendesignale .....	136
3.3.6	GPS-Zeit.....	139
3.3.7	Verfügte Veränderungen von GPS-Informationen.....	141
3.3.7.1	Selective Availability .....	141
3.3.7.2	Anti-Spoofing.....	142
3.3.8	Leistungsbilanz der Funkverbindung zwischen Satellit und Nutzer .....	142
3.4	Meßvorgang – Empfang und Aufbereitung der Satellitensignale.....	144
3.4.1	Erfassen der Satellitensignale .....	144
3.4.2	Korrelationsfunktion.....	145
3.4.2.1	Rechteckimpuls .....	146
3.4.2.2	Code mit statistisch verteilten Impulsen.....	147
3.4.2.3	PRN-Impulsfolge eines Codes maximaler Länge.....	148
3.4.2.4	Autokorrelationsfunktion vom C/A-Code und P(Y)-Code.....	149
3.4.2.5	Kreuzkorrelationsfunktion und Code-Mehrfachzugriff.....	150
3.4.3	Grundkonzeption der GPS-Empfänger .....	151
3.4.3.1	Hauptkomponenten eines GPS-Empfängers .....	151

3.4.3.2	Hochfrequenzteil.....	153
3.4.3.3	Signalverarbeitungseinrichtungen.....	154
3.4.3.4	Einteilung der Empfängertypen.....	155
3.4.3.5	Codeabhängige Empfänger.....	156
3.4.3.6	Codefreie Empfänger.....	158
3.4.3.7	Empfang bei Anti-Spoofing.....	159
3.5	Meßsignalverarbeitung und Auswertung.....	159
3.5.1	Beobachtungsgrößen.....	159
3.5.1.1	Pseudoentfernung aus Code-Messung.....	160
3.5.1.2	Bestimmung der Entfernung durch Trägerphasenmessung.....	161
3.5.1.3	Entfernungsdifferenz durch Messung der Doppler- Frequenzverschiebung.....	164
3.5.2	Auswertung der Meßgrößen.....	165
3.5.2.1	Bestimmung der Entfernungen zur Ortung und Navigation.....	165
3.5.2.2	Entfernungs- und Positionsbestimmung durch Trägerphasenmessung bei Mehrdeutigkeit.....	171
3.5.2.3	Bestimmung der Geschwindigkeit.....	172
3.5.2.4	Ermittlung der Zeitinformation.....	176
3.6	Genauigkeit und genauigkeitsbeeinflussende Faktoren.....	178
3.6.1	Fehlermaße.....	178
3.6.2	Fehler und Fehlerursachen bei der Messung der Pseudoentfernung.....	178
3.6.2.1	Fehler und Fehlerursachen im Satelliten.....	178
3.6.2.2	Fehler und Fehlerursachen in der Empfangsanlage.....	179
3.6.2.3	Fehler durch die Einflüsse des Ausbreitungsweges.....	180
3.6.2.4	Fehler durch Mehrwegeausbreitung.....	183
3.6.3	Fehler und Fehlerursachen durch hochfrequente Störungen.....	184
3.6.3.1	Allgemein gültige Beziehungen.....	184
3.6.3.2	Quantitative Betrachtung von RF-Interferenzen.....	186
3.6.3.3	Schwellwert für den Nachlauf bei Interferenzen.....	186
3.6.3.4	Störung durch TV-Sender.....	188
3.6.4	Geometrisch bedingte Positionsfehler.....	190
3.6.4.1	Prinzip des geometrisch bedingten Positionsfehlers.....	190
3.6.4.2	Dilution of Precision (DOP) als Maß der geometrisch bedingten Ortungsfehler.....	193
3.6.4.3	Meß- und Rechenergebnisse.....	196
3.6.5	Fehlerübersicht.....	201
3.7	Sichtbarkeit und Verfügbarkeit.....	203
3.7.1	Begriffsbestimmung.....	203
3.7.2	Sichtbarkeit der GPS-Satelliten.....	204
3.7.3	Verfügbarkeit der GPS-Satelliten.....	208
3.7.4	Auswirkung der Verringerung der Anzahl der verfügbaren Satelliten.....	210
3.8	Integrität.....	211
3.9	Übersicht zu der mit GPS erzielbaren Genauigkeit.....	214
3.9.1	Genauigkeit bei GPS.....	214
3.9.2	Genauigkeit bei Differential-GPS.....	215
<b>4</b>	<b>Ergänzungen zum Global Positioning System (GPS).....</b>	<b>217</b>
4.1	Differential-GPS.....	217
4.1.1	Grundprinzip.....	217

4.1.2	Lokales Differential-GPS .....	219
4.1.2.1	Systemkonzeption des Local Area DGPS (LADGPS) .....	219
4.1.2.2	Prinzip der Fehlereliminierung bei DGPS .....	220
4.1.2.3	Format der Mitteilung der Korrekturdaten .....	222
4.1.2.4	Einfluß der Distanz auf die Genauigkeit .....	225
4.1.2.5	Referenzstationen und Referenzstationsnetze .....	225
4.1.3	Referenzstationen des Vermessungswesens .....	226
4.1.3.1	Differenzenbildung .....	226
4.1.3.2	Referenzdienste im Vermessungswesen .....	227
4.1.4	DGPS-Referenzstationen verschiedener Dienste des Verkehrswesens .....	229
4.1.4.1	DGPS-Referenzstationen für die Seefahrt .....	229
4.1.4.2	DGPS-Referenzstationen für die Luftfahrt .....	231
4.1.4.3	DGPS-Referenzstationen für den Landverkehr .....	233
4.1.5	Weitbereich – DGPS (WADGPS) .....	234
4.2	Pseudolit .....	236
4.3	Integritätsprüfung .....	238
4.3.1	Empfängerautonome Integritätsprüfung (RAIM) .....	240
4.3.2	GPS-Integritätskanal .....	240
4.4	Wide Area Augmentation System (WAAS) .....	241
4.4.1	Aufgabe des Systems .....	241
4.4.2	Realisierung von WAAS .....	242
4.4.2.1	Konzept .....	242
4.4.2.2	Satellit Inmarsat-3 .....	244
4.4.2.3	Konstellation der Satelliten Inmarsat-3 .....	245
4.4.2.4	WAAS-Signale .....	246
4.4.2.5	Anwendung von WAAS .....	246
<b>5</b>	<b>Global Navigation Satellite System (GLONASS) .....</b>	<b>247</b>
5.1	Einführung .....	247
5.2	Segmente des Systems .....	247
5.2.1	Raumsegment .....	247
5.2.1.1	Satellitenbahnen .....	247
5.2.1.2	GLONASS-Satellit .....	250
5.2.1.3	Navigationssystem .....	250
5.2.2	Kontrollsegment .....	251
5.2.3	Nutzersegment .....	252
5.3	Satellitensignale .....	253
5.3.1	Hochfrequente Träger .....	253
5.3.2	Ortungssignale .....	254
5.3.2.1	GLONASS – C/A-Code .....	254
5.3.2.2	GLONASS-P-Code .....	255
5.3.3	Navigationsmittteilung .....	255
5.3.3.1	C/A-Code-Navigationsmittteilung .....	256
5.3.3.2	P-Code-Navigationsmittteilung .....	256
5.3.4	Sendesignale .....	256
5.3.5	Leistungsbilanz .....	257
5.4	Meßvorgang und Meßsignalverarbeitung .....	258
5.5	Genauigkeit .....	258
5.6	Kombinierte Nutzung von GLONASS und GPS .....	259

5.6.1	Vergleich von GPS und GLONASS .....	259
5.6.2	Ergebnisse der kombinierten Nutzung von GLONASS und GPS.....	261
5.7	Weiterentwicklung von GLONASS.....	264
<b>6</b>	<b>Internationale Aktivitäten zur Weiterentwicklung der Satellitenortungs- und Satellitennavigationssysteme .....</b>	<b>267</b>
6.1	Allgemeine Begründung für eine Weiterentwicklung.....	267
6.2	Aktivitäten in USA .....	268
6.2.1	Berichte und Empfehlungen .....	268
6.2.2	Maßnahmen zur technischen Entwicklung .....	269
6.2.2.1	Dritte Frequenz für GPS .....	269
6.2.2.2	Projekt der Sat Tech Systems Corp.....	269
6.3	Aktivitäten in Europa.....	270
6.3.1	Beschlüsse zur Strategie .....	270
6.3.2	Laufende Arbeiten und Projekte.....	271
6.3.2.1	GNSS 1 .....	271
6.3.2.2	GNSS 2 .....	271
6.4	Aktivitäten der INMARSAT.....	276
6.5	Aktivitäten in Japan .....	278
<b>7</b>	<b>Übersicht zur zivilen Anwendung der Satellitensysteme GPS, GLONASS und GNSS .....</b>	<b>281</b>
7.1	GPS-Anwendung in der zivilen Luftfahrt .....	281
7.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	281
7.1.2	Einsatzbedingungen.....	284
7.1.3	GPS für den Landeanflug .....	285
7.1.4	Integration von CNS.....	286
7.1.5	Bordempfangsgeräte.....	288
7.1.5.1	GPS-Navigationsempfänger GARMIN GPS 95 .....	288
7.1.5.2	GPS-Bordnavigationsempfänger Trimble 2000 Approach Plus .....	289
7.1.5.3	GPS-Empfängerantennen.....	291
7.1.6	Markt.....	293
7.2	GPS-Anwendung in der Seefahrt.....	293
7.2.1	Einsatzbedingungen.....	293
7.2.2	Bordempfangsgeräte.....	294
7.2.2.1	Shipmate RS 5400 und Shipmate RS 5800.....	294
7.2.2.2	GPS/GLONASS-Navigationsempfänger MAN NR – N 124.....	297
7.2.3	Markt .....	298
7.3	GPS-Anwendungen im Landverkehr .....	298
7.3.1	Einsatzbedingungen.....	298
7.3.2	Aufgabenstellung und Lösungen für den Straßenverkehr .....	299
7.3.2.1	Zielführungssysteme .....	299
7.3.2.2	Positionsmeldesysteme .....	301
7.3.2.3	Verkehrsleitsysteme.....	302
7.3.3	Markt.....	302
7.4	Anwendung von GPS im Vermessungswesen.....	303
7.4.1	Aufgabenbereiche für das Vermessungswesen mit Hilfe von GPS.....	303
7.4.2	Meßverfahren .....	303
7.4.3	Referenzstationsnetz in der Bundesrepublik Deutschland.....	304

7.4.3.1	Echtzeit-Positions-Service (EPS).....	304
7.4.3.2	Echtzeit-Positionierungs-Service mit Zentimeter-Genauigkeit (HEPS).....	304
7.4.3.3	Geodätischer Präziser Positionierungs-Service (GPPS).....	304
7.4.3.4	Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service (GHPS)..... für Postprocessing.....	305
7.4.4	Kartographie.....	306
7.4.4.1	Verfahren zur Oberflächenvermessung.....	306
7.4.4.2	Verfahren zur Vermessung der Struktur des Meeresbodens.....	306
7.4.4.3	Verfahren zur Bestimmung von Meerestiefen.....	306
7.5	Sonstige Anwendungsbereiche der Satellitenortungs- und Navigationssysteme.....	307
7.5.1	Wissenschaft und Forschung.....	307
7.5.2	Wirtschaft und Industrie.....	308
7.5.3	Land- und Forstwirtschaft.....	308
7.5.4	Nachrichtentechnik.....	308
7.5.5	Touristik.....	308
<b>8</b>	<b>GPS-Informationsquellen.....</b>	<b>309</b>
8.1	GPS-Informations- und Beobachtungssystem (Abkürzung GIBS).....	309
8.1.1	Aufgabenstellung.....	309
8.1.2	Verfügbare Informationen.....	309
8.1.3	Form der Informationserteilung.....	310
8.1.4	Computer Bulletin Board.....	310
8.1.5	GIBS-Newsletter.....	310
8.1.6	Allgemeine Hinweise.....	310
8.2	GPS-Bahndaten.....	311
8.3	Berechnungen zum Raumsegment.....	311
<b>Anhang</b>	.....	<b>313</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	<b>327</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	<b>341</b>