

Manfred Bauer

Vermessung und Ortung mit Satelliten

NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte
Navigationssysteme

Eine Einführung für die Praxis

4., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage

 **WICHMANN**

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1 Vermessung, Ortung, Geodäsie - Versuch einer Abgrenzung	1
1.2 Vermessung ohne Satelliten - Arbeitsweise, Ergebnisse	4
1.2.1 Historische Wurzeln des Vermessungswesens	5
1.2.2 Figur der Erde	9
1.2.2.1 Modell "Ebene"	10
1.2.2.2 Modell "Kugel"	11
1.2.2.3 Modell "Rotationsellipsoid"	14
1.2.2.4 Geoid	16
1.2.2.5 Verfahren zur Geoid-/Ellipsoidbestimmung	23
1.2.2.6 Zusammenfassung	27
1.2.3 Definition und Messung von Höhen	28
1.2.4 Stand der Erdmessung vor dem Satellitenzeitalter	39
1.3 Überblick über die Erdmessung mit Satelliten	41
1.3.1 Methoden der Satellitengeodäsie	41
1.3.2 Beobachtungsverfahren	42
1.3.2.1 Richtungsbeobachtungen	42
1.3.2.2 Streckenmessungen	46
1.3.2.3 Beobachtung von Entfernungsdifferenzen	48
1.3.2.4 Altimetrie	52
1.3.2.5 Satellit-zu-Satellit-Beobachtung	52
1.3.3 Ergebnisse der Satellitengeodäsie	52
1.4 Referenzsysteme der Geodäsie - Das Geodätische Datum	53
1.4.1 Referenzsystem, Datumsfestsetzung und Referenznetz	53
1.4.2 Datumsfestsetzung in konventionellen geodätischen Referenzsystemen	58
1.4.2.1 Datumsfestsetzung bei Lagevermessungen	58
1.4.2.2 Datumsfestsetzung bei Höhenvermessungen	62
1.4.3 Datumsfestsetzung in globalen Referenzsystemen - Das Geodätische Datum	63
1.4.4 Datumstransformation	66
1.4.5 Koordinaten der Landesvermessung	69
1.4.5.1 Ellipsoidische Koordinaten	69
1.4.5.2 Ebene kartesische Koordinaten	70

2. Theoretische Grundlagen	71
2.1 Satellitenbahn	71
2.1.1 Ungestörte KEPLER-Ellipse	71
2.1.2 Gestörte KEPLER-Ellipse	78
2.2 Koordinatensysteme	82
2.2.1 Astronomische Koordinatensysteme	82
2.2.2 Terrestrische Koordinatensysteme	86
2.2.2.1 Globale kartesische Koordinaten	86
2.2.2.2 Globale ellipsoidische Koordinaten	88
2.2.2.3 Topozentrische Koordinaten	88
2.3 Koordinatentransformationen	90
2.3.1 Berechnung terrestrischer Koordinaten aus KEPLER-Elementen	90
2.3.2 Berechnung ellipsoidischer Koordinaten aus kartesischen Koordinaten	91
2.3.3 Berechnung kartesischer Koordinaten aus ellipsoidischen Koordinaten	92
2.3.4 Berechnung topozentrischer Polarkoordinaten	92
2.4 Zeitsysteme	93
2.4.1 Sonnenzeit - UT	93
2.4.2 Sternzeit	97
2.4.3 Atomzeit - UTC	98
2.4.4 GPS- und GLONASS-Systemzeit	100
2.4.5 Relativistische Aspekte der Zeitmessung	100
2.5 Elektromagnetische Wellen	101
2.5.1 Allgemeine Grundlagen	101
2.5.1.1 Mathematische Beschreibung	101
2.5.1.2 Spektrum der elektromagnetischen Wellen	106
2.5.1.3 Ausbreitung von Radiowellen	108
2.5.2 Der DOPPLER-Effekt	109
2.5.3 Frequenzmischung - Phasenmessung	112
2.5.4 Phasengeschwindigkeit - Gruppengeschwindigkeit	116
2.5.5 Signalausbreitung in der Erdatmosphäre	118
2.5.5.1 Aufbau der Erdatmosphäre	122
2.5.5.2 Ionosphäre	123
2.5.5.3 Ionosphärische Refraktion	126
2.5.5.4 Erfassung der ionosphärischen Refraktion	128
2.5.5.5 Troposphärische Refraktion	135
2.5.5.6 Mehrwegeausbreitung (Multipath)	137

2.6 Satellitendatum	140
2.7 Genauigkeitsmaße	141
2.7.1 Eindimensionale Genauigkeitsmaße	143
2.7.2 Zweidimensionale Genauigkeitsmaße	145
2.7.3 Dreidimensionale Genauigkeitsmaße	146
2.7.4 Standardabweichung σ als zwei- oder dreidimensionales Genauigkeitsmaß	146
2.8 Anforderungen an Navigationssysteme	147
3. NAVSTAR - GPS	151
3.0 Zusammenfassung	151
3.1 Historische Entwicklung	151
3.2 Weltraumsegment	153
3.2.1 Satellitenkonstellation	153
3.2.2 GPS-Satelliten	155
3.3 Militärisches Kontrollsegment - Ziviler Bahndienst	156
3.3.1 Militärisches Kontrollsegment	156
3.3.2 Ziviler Bahndienst des IGS	158
3.4 Signalstrukturen	160
3.4.1 Einleitung	161
3.4.2 Codierung der Signale	163
3.4.2.1 Codierung des L_1 - Signals	163
3.4.2.2 Codierung des L_2 - Signals	166
3.4.2.3 Formelmäßige Darstellung der Codierungen	166
3.4.3 Ergänzende Informationen zu den Codes	167
3.4.3.1 C/A-Code	167
3.4.3.2 P-Code	167
3.5 Militärische Vorbehalte zur Nutzung des NAVSTAR-GPS	168
3.5.1 Selected Availability (SA) / Anti-Spoofing (A-S)	168
3.5.2 SA / A-S in der Diskussion	169
3.6 Die GPS-Navigationsnachricht	170
3.6.1 Struktur der Nachricht	170
3.6.2 Inhalt der Navigationsnachricht	171
3.6.3 Berechnung der Satellitenkoordinaten	174

3.7 Referenzsysteme des GPS	177
3.7.1 Positionsangaben	177
3.7.2 Zeit	177
3.8 GPS-Meßgrößen	178
3.8.1 Messung der Codephase (Pseudoentfernungsmessung)	178
3.8.1.0 Vorbemerkung	178
3.8.1.1 Prinzip des Meßverfahrens (Kreuzkorrelation)	178
3.8.1.2 Messung der Codephase beim C/A-Code	182
3.8.1.3 Messung der Codephase beim P-Code	182
3.8.2 Messung des DOPPLER-Counts	183
3.8.3 Messung der Trägermischphase	184
3.8.3.1 Grundprinzip	184
3.8.3.2 Technische Realisierung	187
3.8.4 Messung bei eingeschaltetem Anti-Spoofing (A-S)	187
3.8.4.1 Autokorrelation des Signals ("squaring")	188
3.8.4.2 Kreuzkorrelation	189
3.8.4.3 P-W-tracking ("Ashtech technique")	190
3.9 Modellierung der Meßgrößen	190
3.9.1 Modellierung der Codephase und des DOPPLER-Counts	190
3.9.1.1 Modellierung der Code-Phase	190
3.9.1.2 Gemeinsame Modellierung von Code-Phase und DOPPLER-Count	199
3.9.2 Modellierung der Trägermischphase	202
3.9.2.1 Grundgleichung	202
3.9.2.2 Linearkombinationen aus L_1 -Trägermischphasen	205
3.9.2.3 Linearkombinationen aus L_1 , L_2 -Trägermischphasen	211
3.9.3 Behandlung von Phasensprüngen	216
3.9.3.1 Aufdecken von Phasensprüngen	217
3.9.3.2 Korrigieren der Phasensprünge	219
3.9.4 Verfahren zur Festlegung des Mehrdeutigkeitsparameters der Trägermischphase	220
3.9.4.1 Lösung aus der Satellitengeometrie	221
3.9.4.2 Lösung aus der Empfängermetrie	221
3.9.4.3 Lösungen mit Suchalgorithmen	225
3.9.4.4 Mehrdeutigkeitslösungen "on the fly"	229
3.10 Differentielles GPS (DGPS)	232
3.10.1 Grundprinzip	232
3.10.2 Varianten	234
3.10.2.1 Korrekturverfahren	234
3.10.2.2 Übersendung der Korrekturdaten / Rohdaten	238
3.10.3 DGPS-Meßwertkorrekturdaten für Echtzeit-Anwendungen	238

3.10.4	RTCM-Datenformat	239
3.10.4.1	Grundstruktur / Nachrichtentypen	240
3.10.4.2	Nachrichtentyp 1	243
3.10.4.3	Nachrichtentypen 18 - 21	245
3.10.4.4	Übertragungsrate der RTCM-Korrekturdaten bei Echtzeit - DGPS	245
3.10.5	Aspekte der Datenfernübertragung	247
3.11	Genauigkeit	248
3.11.1	Vorbemerkung	248
3.11.2	Fehlereinflüsse bei der Pseudostreckenmessung	249
3.11.2.1	Satellitenfehler	249
3.11.2.2	Signalausbreitungsfehler	250
3.11.2.3	Empfängerfehler	252
3.11.2.4	Gesamtfehlerhaushalt	252
3.11.3	Genauigkeit bei Auswertung der Pseudostreckenmessung	252
3.11.3.1	Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung - DOP-Faktoren	252
3.11.3.2	Genauigkeit bei differentieller Behandlung der Codephase	255
3.11.4	Genauigkeit der Auswertung bei Trägermischphasen- messung	256
3.11.4.1	Genauigkeit bei statischer Messung	256
3.11.4.2	Genauigkeit bei kinematischer Messung	257
3.12	Merkmale von Empfängern	258
3.13	Ortung mit GPS in der Praxis	260
3.13.1	Administrative Aspekte	260
3.13.2	Ortung im absoluten Modus	262
3.13.3	Ortung im differentiellen Modus	267
3.13.3.1	DGPS-Systeme	267
3.13.3.2	DGPS-Dienste	268
3.14	Vermessung mit GPS in der Praxis	271
3.14.1	Besonderheiten der GPS-Vermessung	271
3.14.2	Auswahl von Hard- und Software	272
3.14.3	Entwurf einer GPS-Messung	273
3.14.3.1	Erkundung der Punktlagen	275
3.14.3.2	Beobachtungsverfahren	277
3.14.3.3	Beobachtungsanordnung	281
3.14.3.4	Netzgestaltung	284

3.14.4	Aspekte der Messungsdurchführung	288
3.14.4.1	<i>Auswahl der Beobachtungszeitpunkte</i>	289
3.14.4.2	<i>Messungsablauf</i>	290
3.14.5	Auswertung	290
3.14.5.1	<i>Lagerung einer GPS-Messung</i>	293
3.14.5.2	<i>Merkmale der Auswertesoftware</i>	294
3.14.5.3	<i>Auswertung von Originalbeobachtungen</i>	299
3.14.5.4	<i>Auswertung von Doppeldifferenzen</i>	299
3.14.5.5	<i>Ergebnis-Kontrolle / Netzausgleichung</i>	301
3.14.6	Einpassen der Ergebnisse in das Gebrauchsnetz	302
3.14.7	Kombination von GPS mit terrestrischen Meßelementen	305
3.14.7.1	<i>Allgemeines</i>	305
3.14.7.2	<i>Aspekte der Planung einer kombinierten GPS-terrestrischen Messung</i>	306
3.14.8	GPS-Vermessung mit Echtzeitauswertung (RTK-Vermessung)	307
3.14.8.1	<i>Echtzeitauswertung im Vermessungswesen</i>	307
3.14.8.2	<i>Ansprüche an die Echtzeitfähigkeit einer GPS-Vermessung</i>	309
3.14.8.3	<i>Datumsproblem, Meßkonzept der RTK-Vermessung</i>	309
3.14.8.4	<i>Technische Voraussetzungen und Realisierungsmöglichkeiten für RTK</i>	310
3.14.8.5	<i>Einschätzung der Praxisauglichkeit und Praxisrelevanz</i>	312
4.	GLONASS	318
4.0	Einleitung	318
4.1	Historische Entwicklung	319
4.2	Weltraumsegment	319
4.3	Kontrollsegment	323
4.4	Signalstruktur	326
4.4.1	Allgemeine Informationen	326
4.4.2	Signalcodierung	326
4.5	GLONASS-Navigationsnachricht	327
4.5.1	Struktur der Nachricht	327
4.5.2	Inhalt der Nachricht	329
4.5.2.1	<i>Operative Informationen</i>	330
4.5.2.2	<i>Nichtoperative Informationen (Almanach)</i>	331

4.5.3 Berechnung der Satellitenkoordinaten mit Hilfe der Ephemeriden.....	332
4.5.4 Berechnung der Satellitenkoordinaten mit Hilfe der Almanachdaten	336
4.6 GLONASS-Referenzsysteme	338
4.6.1 Positionsangaben	338
4.6.2 Zeit	338
4.7 Bedeutung von GLONASS für die Praxis	339
4.7.1 Vergleich der Leistungsmerkmale GLONASS - GPS	339
4.7.2 GLONASS Hard- und Softwaremarkt	340
4.7.3 Hard- und Softwaremarkt für kombinierte GLONASS/GPS - Empfänger.....	342
4.7.4 Schlußbemerkung	344
 5. GNSS - Das Globale Navigationssatellitensystem der Zukunft?	 345
5.1 Einleitung.....	345
5.2 GNSS - Gemeinsame Nutzung von GPS und GLONASS.....	347
5.2.1 Verbesserung der Integrität	348
5.2.2 Verbesserung der Verfügbarkeit.....	348
5.2.3 Verbesserung der Genauigkeit.....	350
5.3 GNSS 1 - Zivile Ergänzung von GPS und GLONASS.....	350
5.3.1 Weitbereichserweiterung	350
5.3.2 Lokale Erweiterung.....	352
5.3.3 Stand der Realisierung	352
5.4 Wege zu GNSS 2	354
 6. INMARSAT	 357
6.1 Segmente des INMARSAT-Systems	357
6.1.1 Weltraumsegment	357
6.1.2 Bodensegment	359
6.1.3 Nutzersegment	359
6.2 INMARSAT-Dienste	361
6.2.1 INMARSAT-A/B	361
6.2.2 INMARSAT-C	362
6.2.3 INMARSAT-M.....	364
6.2.4 INMARSAT-Aero-Dienst.....	364

6.2.5 INMARSAT-P-Dienst	364
6.3 INMARSAT und Satellitennavigation.....	365
 7. Andere satellitengestützte Ortungssysteme	 368
7.1 ARGOS.....	368
7.2 EUTELTRACS.....	370
7.3 DORIS	373
7.4 PRARE	373
 Anhang A: Geodätische Referenzsysteme und -netze in Deutschland	 375
A.1 Bisherige Systeme und Netze	375
A.1.1 Lagesysteme und -netze	375
A.1.1.1 Das Grundlagennetz der westlichen Bundesländer.....	377
A.1.1.2 Das Grundlagennetz der östlichen Bundesländer	382
A.1.1.3 Sondernetze einzelner östlicher Bundesländer.....	383
A.1.1.4 Das Europäische Hauptdreiecksnetz.....	383
A.1.2 Höhensysteme und -netze	384
A.1.2.1 Westliche Bundesländer	384
A.1.2.2 Östliche Bundesländer.....	385
A.2 Zukünftige Systeme	385
A.2.1 Das neue dreidimensionale Bezugssystem ETRS 89	385
A.2.2 Das neue Höhenbezugssystem DHNN 92.....	389
 Anhang B: SAPOS - Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung	 390
 Anhang C: RINEX - Das empfängerunabhängige Daten- format für GPS-Daten	 400
 Glossar	 401
 Literatur	 407
 Stichwortverzeichnis	 417