

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	17
1.1	Vermessung, Ortung, Geodäsie – Versuch einer Abgrenzung	17
1.2	Vermessung ohne Satelliten – Arbeitsweise, Ergebnisse	20
1.2.1	Historische Wurzeln des Vermessungswesens	20
1.2.2	Figur der Erde.....	23
1.2.2.1	Modell „Ebene“	24
1.2.2.2	Modell „Kugel“	25
1.2.2.3	Modell „Rotationsellipsoid“	28
1.2.2.4	Geoid	29
1.2.2.5	Verfahren zur Geoid-/Ellipsoidbestimmung.....	35
1.2.2.6	Zusammenfassung	38
1.2.3	Definition und Messung von Höhen.....	39
1.2.4	Stand der Erdmessung vor dem Satellitenzeitalter	50
1.3	Überblick über die Erdmessung mit Satelliten	51
1.3.1	Methoden der Satellitengeodäsie.....	51
1.3.2	Beobachtungsverfahren	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	57
1.4.2.1	Datumsfestsetzung bei Lagevermessungen	57
1.4.2.2	Datumsfestsetzung bei Höhenvermessungen.....	60
1.4.3	Datumsfestsetzung in globalen Referenzsystemen – das Geodätische Datum ...	61
1.4.4	Datumstransformation	64
1.4.5	Koordinaten der Landesvermessung.....	66
1.4.5.1	Ellipsoidische Koordinaten.....	66
1.4.5.2	Ebene kartesische Koordinaten	66
1.5	Grundprinzipien moderner GNSS-Ortung.....	67
1.5.1	Absolute Ortung (Stand-alone GNSS).....	67
1.5.2	Differenzielle Ortung.....	69
2	Theoretische Grundlagen	71
2.1	Satellitenbahn	71
2.1.1	Ungestörte Kepler-Ellipse	71
2.1.2	Gestörte Kepler-Ellipse	77
2.1.3	Orbittypen.....	80
2.2	Koordinatensysteme	82
2.2.1	Astronomische Koordinatensysteme	85
2.2.2	Terrestrische Koordinatensysteme	85
2.2.2.1	Globale kartesische Koordinaten.....	85

2.2.2.2	Globale ellipsoidische Koordinaten.....	87
2.2.2.3	Topozentrische Koordinaten.....	87
2.3	Koordinatentransformationen	89
2.3.1	Berechnung terrestrischer Koordinaten aus Kepler-Elementen.....	89
2.3.2	Berechnung ellipsoidischer Koordinaten aus kartesischen Koordinaten.....	90
2.3.3	Berechnung kartesischer Koordinaten aus ellipsoidischen Koordinaten.....	90
2.3.4	Berechnung topozentrischer Polarkoordinaten.....	91
2.4	Überführen ellipsoidischer Höhen in Gebrauchshöhen	91
2.4.1	Einleitung	91
2.4.2	Höhenberechnung unter alleiniger Verwendung eines Geoidmodells.....	92
2.4.3	Höhenberechnung unter Verwendung von Passpunkten	93
2.4.3.1	Einleitung	93
2.4.3.2	Flächenapproximation durch bivariate Polynome	94
2.4.3.3	Finite-Element-Darstellung der Höhenbezugsfläche.....	96
2.4.3.4	Datumstransformation von Geoidmodellen.....	96
2.4.3.5	Digitale Finite-Element-Höhenbezugsfläche (DFHBF)	97
2.5	Zeitsysteme.....	97
2.5.1	Sonnenzeit – UT.....	98
2.5.2	Sternzeit.....	100
2.5.3	Atomzeit – UTC	101
2.5.4	GNSS-Systemzeiten	102
2.5.5	Relativistische Aspekte der Zeitmessung	103
2.6	Elektromagnetische Wellen.....	103
2.6.1	Allgemeine Grundlagen.....	103
2.6.1.1	Mathematische Beschreibung.....	103
2.6.1.2	Polarisation.....	107
2.6.1.3	Spektrum der elektromagnetischen Wellen	109
2.6.1.4	Ausbreitung von Radiowellen	110
2.6.2	Der Doppler-Effekt.....	111
2.6.3	Phasengeschwindigkeit – Gruppengeschwindigkeit.....	114
2.6.4	Signalausbreitung in der Erdatmosphäre	116
2.6.4.1	Aufbau der Erdatmosphäre.....	119
2.6.4.2	Ionosphäre	120
2.6.4.3	Ionosphärische Refraktion.....	123
2.6.4.4	Erfassung der ionosphärischen Refraktion	125
2.6.4.5	Troposphärische Refraktion	130
2.6.4.6	Mehrwegeausbreitung (Multipath).....	132
2.6.4.7	Signalbeugung (Signal Diffraction).....	135
2.7	Elektromagnetische Signale der GNSS	137
2.7.1	Frequenzzuweisung – Signalbänder der GNSS	137
2.7.2	Prinzipielle Entstehung der GNSS-Signale	140
2.7.2.1	Basisbandsignal, Bandpasssignal	140
2.7.2.2	Spread-Spektrum-Technik (Spreizbandtechnik), spektrale Leistungsdichte	140
2.7.3	Modulationsverfahren im Einzelnen.....	142
2.7.3.1	PSK-Modulation.....	142
2.7.3.2	BOC-Modulation.....	147

2.7.4	Signal-Vielfachnutzung (Signal-Multiplexing)	151
2.7.4.1	Quadraturmodulation.....	151
2.7.4.2	Alternative BOC-Modulation	156
2.7.4.3	Modifizierte Hexaphasen-Modulation.....	159
2.7.4.4	MBOC-Modulation	159
2.7.5	PRN-Codes.....	160
2.7.5.1	Eigenschaften der PRN-Codes	160
2.7.5.2	Autokorrelationsfunktion	161
2.7.6	Autokorrelationsfunktion (AKF), Leistungsdichte und Bandbreite der GNSS-Signale	162
2.7.6.1	Autokorrelationsfunktion der GNSS-Signale	162
2.7.6.2	Spektrale Leistungsdichte und Bandbreite	167
2.7.6.3	Signalqualität (SNR, C/N_0).....	170
2.7.7	Verfahren zur Sicherung der Datenübertragung.....	172
2.7.7.1	Hinzufügen von Redundanz	172
2.7.7.2	Interleaving.....	174
2.7.8	Zentrale Bauteile der GNSS-Empfänger	175
2.7.8.1	Frequenzumsetzer, Filter	175
2.7.8.2	Rauscharmer Verstärker (Low Noise Amplifier (LNA)).....	177
2.7.8.3	Analog-digital-Wandler – automatischer Verstärkungsregler	178
2.7.8.4	Korrelator	181
2.7.9	Merkmale der GNSS-Empfangsantennen.....	182
2.7.9.1	Unterstützte Frequenzen und Bandbreiten.....	183
2.7.9.2	Polarisation, Axial Ratio (Achsenverhältnis)	184
2.7.9.3	Antennencharakteristik, Antennengewinn.....	185
2.7.9.4	Phasenzentrumsstabilität	190
2.7.9.5	Merkmale aktiver Antennen	190
2.8	Satellitendatum	191
2.9	Genauigkeitsmaße	192
2.9.1	Eindimensionale Genauigkeitsmaße.....	193
2.9.2	Zweidimensionale Genauigkeitsmaße	194
2.9.3	Dreidimensionale Genauigkeitsmaße	196
2.9.4	Standardabweichung σ als zwei- oder dreidimensionales Genauigkeitsmaß...	196
2.10	Anforderungen an Navigationssysteme	196
3	Arbeitsweise und Systemcharakteristiken	201
3.1	Die Systemkomponenten.....	201
3.1.1	Weltraumsegment.....	201
3.1.1.1	Satellitenkonstellation	201
3.1.1.2	GNSS-Satelliten	202
3.1.2	Bodensegment	204
3.1.2.1	Bodensegment der Systembetreiber	204
3.1.2.2	Ziviler Bahndienst des IGS.....	204
3.1.3	Nutzersegment.....	206
3.2	Die Navigationsnachricht	206

3.3	GNSS-Empfänger.....	207
3.3.1	Grundsätzlicher Aufbau.....	207
3.3.1.1	Antennen – Antennentypen	207
3.3.1.2	Front-End.....	207
3.3.1.3	Basisbandrechner.....	208
3.3.1.4	Anwendungsrechner.....	210
3.3.2	Empfängertypen	210
3.4	GNSS-Messgrößen.....	211
3.4.1	Messung der Pseudoentfernung (Codephase).....	212
3.4.2	Messung der Trägerphase.....	214
3.4.3	Bestimmung Doppler-Frequenzverschiebung	216
3.5	Modellierung der Messgrößen.....	216
3.5.1	Modellierung der Pseudoentfernung.....	216
3.5.1.1	Herkömmliche Navigationslösung	216
3.5.1.2	Navigationslösung mit Hilfsdaten (A-GNSS)	223
3.5.2	Modellierung der Trägerphase.....	225
3.5.2.1	Grundgleichung	225
3.5.2.2	Linearkombinationen aus Trägerphasen einer Frequenz.....	228
3.5.2.3	Linearkombinationen aus Trägerphasen von zwei Frequenzen.....	233
3.5.2.4	Linearkombinationen aus Trägerphasen von drei Frequenzen	236
3.5.3	Glättung der Pseudostrecken	237
3.5.4	Behandlung von Phasensprüngen.....	239
3.5.4.1	Aufdecken von Phasensprüngen.....	239
3.5.4.2	Korrigieren von Phasensprüngen.....	242
3.5.5	Verfahren zur Festlegung des Mehrdeutigkeitsparameters der Trägerphase ...	242
3.5.5.1	Lösung aus der Satellitengeometrie.....	243
3.5.5.2	Lösung mit Suchalgorithmen.....	243
3.5.5.3	Mehrdeutigkeitslösungen „on-the-fly“	244
3.6	Präzise GNSS-Positionierung.....	245
3.6.1	Prinzip der differenziellen Positionierung	246
3.6.2	Differenzielle GNSS-Positionierung mit <i>einer</i> Referenzstation	247
3.6.2.1	Differenzielles GNSS (DGNSS)	248
3.6.2.2	Real-Time Kinematik (RTK).....	249
3.6.2.3	Differenzielle GNSS-Positionierung im Postprocessing	249
3.6.3	Differenzielle GNSS-Positionierung im Referenzstationsnetz	250
3.6.3.1	Netz-DGNSS	250
3.6.3.2	Netz-RTK	252
3.6.3.3	Netzauswertungen im Postprocessing	256
3.6.4	Absolute Positionierung – Precise Point Positioning (PPP)	256
3.6.4.1	Standard-PPP	257
3.6.4.2	PPP-RTK.....	258
3.6.5	Aspekte der Datenfernübertragung.....	260
3.6.5.1	Datenfernübertragung durch DGNSS-spezifische Funkdienste und Frequenzen	260
3.6.5.2	Datenfernübertragung durch Mobilfunk.....	261
3.6.5.3	Datenfernübertragung mithilfe des Internets und Mobilfunks.....	261

3.7	Genauigkeit	261
3.7.1	Vorbemerkung	261
3.7.2	Genauigkeit der Pseudostreckenmessung.....	262
3.7.2.1	Ephemeriden- und Satellitenuhrenfehler	262
3.7.2.2	Signalausbreitungsfehler	263
3.7.2.3	Empfängerfehler.....	264
3.7.2.4	Gesamtfehlerhaushalt	264
3.7.3	Genauigkeit bei Auswertung der Pseudostreckenmessung.....	265
3.7.3.1	Genauigkeit der herkömmlichen Einzelpunktbestimmung – DOP-Faktoren	265
3.7.3.2	Genauigkeit bei differenzieller Behandlung der Pseudostrecken	267
3.7.4	Genauigkeit der Auswertung der Trägerphasen	267
3.7.4.1	Genauigkeit bei differenzieller Behandlung	267
3.7.4.2	Genauigkeit von PPP-Lösungen.....	268
4	Verwundbarkeit der GNSS-Signale	269
4.1	Einleitung	269
4.2	Mögliche Störungen	271
4.2.1	Störungen durch natürliche Interferenzen	271
4.2.2	Störungen durch unbeabsichtigte Funkinterferenzen.....	272
4.2.3	Störungen durch beabsichtigte Funkinterferenzen	273
4.2.3.1	Störsender geringer Reichweite (Private Protection Devices (PPD)).....	273
4.2.3.2	Störsender größerer Reichweite.....	275
4.2.4	Störung unter Verwendung ge- bzw. verfälschter Signale	277
4.2.4.1	Spoofing	277
4.2.4.2	Meaconing	277
4.2.5	Störung durch Systemausfall.....	278
4.3	Nachrichtentechnische Klassifikation der störenden Interferenzen.....	278
4.3.1	Klassifikation nach Frequenzbändern.....	278
4.3.2	Klassifikation nach Signaltypen	279
4.4	Strategien zur Erkennung und Bekämpfung von Störungen.....	281
4.4.1	Erkennung	281
4.4.1.1	Front-End-Auswertungen (Präkorrelation).....	282
4.4.1.2	Auswertung im Basisbandprozessor (Postkorrelation).....	286
4.4.2	Abwehr der GNSS-Störungen	288
4.4.2.1	Vorhalten eines Parallelsystems (Back-up-System)	288
4.4.2.2	Integration von GNSS und INS	289
4.4.2.3	Filtern der Signale	290
4.4.2.4	Detektieren und Lokalisieren der GNSS-Jammer	292
5	GPS – das US-amerikanische GNSS	297
5.1	Einleitung	297
5.2	GPS-Dienste	299
5.2.1	Terrestrial Service – Space Service	299
5.2.2	Militärischer Dienst – ziviler Dienst.....	300

5.3	Segmente	300
5.3.1	Weltraumsegment.....	300
5.3.1.1	Satellitenkonstellation	300
5.3.1.2	Satelliten.....	301
5.3.1.3	Merkmale der GPS-Sendeantennen.....	302
5.3.2	Bodensegment	305
5.4	Referenzsysteme.....	305
5.4.1	Positionsangaben	305
5.4.2	Zeit	306
5.5	Herkömmliches GPS	306
5.5.1	Weltraumsegment.....	306
5.5.2	Bodensegment	307
5.5.3	Navigationsnachricht.....	308
5.5.3.1	Struktur der Navigationsnachricht.....	308
5.5.3.2	Inhalt der Navigationsnachricht.....	308
5.5.4	Signalstrukturen.....	310
5.5.4.1	Einleitung	311
5.5.4.2	L1-Signale	311
5.5.4.3	L2-Signal.....	313
5.5.4.4	Formelhafte Darstellung der Signale.....	314
5.6	Die Systemsicherungsmaßnahmen Selected Availability (SA) und Anti-Spoofing (A-S).....	314
5.6.1	Antispoofing (A-S).....	315
5.6.2	Selected Availability (SA)	315
5.7	Besonderheiten der GPS-Messgrößenerzeugung.....	316
5.7.1	Messung der Pseudostrecke (Codephase) beim C/A-Code	316
5.7.2	Messung der Pseudostrecke (Codephase) beim P(Y)-Code	317
5.7.3	Messung der L2-Trägerphase bei eingeschaltetem Anti-Spoofing (A-S).....	318
5.8	Modernisiertes GPS.....	320
5.8.1	Einleitung	320
5.8.2	Weltraumsegment.....	321
5.8.3	Bodensegment	322
5.8.4	Navigationsnachricht.....	323
5.8.5	Die modernisierten Signale	324
5.8.5.1	M-Codsignal	325
5.8.5.2	L2C-Signal	325
5.8.5.3	L5-Signal.....	327
5.8.5.4	L1C-Signal	330
5.9	GPS-Signale im Überblick	331
6	GLONASS – das russische GNSS.....	335
6.1	Einleitung	335
6.2	GLONASS-Dienste	336
6.3	Segmente	336
6.3.1	Weltraumsegment.....	336

6.3.1.1	Satellitenkonstellation	336
6.3.1.2	Satelliten.....	338
6.3.2	Bodensegment	339
6.4	Navigationenachricht.....	340
6.4.1	Navigationenachricht des offenen Diensts.....	340
6.4.2	Navigationenachricht des autorisierten Diensts	344
6.5	GLONASS-Referenzsysteme	344
6.5.1	Positionangaben	344
6.5.2	Zeit	345
6.6	GLONASS-Signale	345
6.6.1	Signale der GLONASS-M-Satelliten	345
6.6.1.1	Allgemeine Informationen.....	345
6.6.1.2	Modulationen/Codes.....	346
6.6.2	Signale der GLONASS-K-Satelliten	347
6.6.2.1	Allgemeine Informationen.....	347
6.6.2.2	Modulationen/Codes.....	348
6.7	GLONASS-Signale im Überblick	349
6.7.1	GLONASS-M-Signale	349
6.7.2	GLONASS-K-Signale	350
7	BDS – das chinesische GNSS.....	353
7.1	Einleitung	353
7.2	BDS-Dienste.....	355
7.3	Segmente	356
7.3.1	Weltraumsegment.....	356
7.3.1.1	Satellitenkonstellation	356
7.3.1.2	Satelliten.....	357
7.3.2	Bodensegment	357
7.4	Referenzsysteme.....	358
7.4.1	Positionangaben	358
7.4.2	Zeit	358
7.5	Navigationenachricht.....	358
7.5.1	Nachrichtentypen und ihre Inhalte	358
7.5.2	D1-Navigationenachricht.....	359
7.5.3	D2-Navigationenachricht.....	360
7.6	Signalstrukturen.....	360
7.6.1	Einleitung	360
7.6.2	B1-Signale	361
7.6.3	B2-Signale	363
7.6.4	Das nicht veröffentlichte B3-Signal	364
8	Galileo – das europäische GNSS.....	367
8.1	Historische Entwicklung – Ausbauzustand	367
8.2	Das Galileo-Dienste-Konzept.....	369

8.3	Segmente	371
8.3.1	Weltraumsegment	371
8.3.1.1	Satellitenkonstellation.....	371
8.3.1.2	Satelliten	372
8.3.2	Bodensegment.....	372
8.4	Referenzsysteme	374
8.4.1	Position	374
8.4.2	Zeit.....	374
8.5	Galileo-Navigationsnachricht	374
8.6	Signale	376
8.6.1	Signal E1.....	377
8.6.2	Signal E6.....	379
8.6.3	Signal E5.....	380
9	NAVIC – das indische regionale Navigationssatellitensystem	383
9.1	Einleitung.....	383
9.2	NAVIC-Dienste	383
9.3	Segmente	384
9.3.1	Weltraumsegment	384
9.3.1.1	Satellitenkonstellation.....	384
9.3.1.2	Satelliten	384
9.3.2	Bodensegment.....	385
9.4	Navigationsnachricht	386
9.5	Referenzsysteme	387
9.5.1	Position	387
9.5.2	Zeit.....	387
9.6	Signale	387
9.6.1	Frequenzen.....	387
9.6.2	Codes	388
10	Erweiterungssysteme	389
10.1	Globale Erweiterungssysteme.....	389
10.2	Regionale Erweiterungssysteme	391
10.2.1	QZSS – das satellitengestützte Erweiterungssystem Japans	391
10.2.2	SBAS – satellitengestütztes Erweiterungssystem nach ICAO Standard.....	393
10.2.2.1	Einführung	393
10.2.2.2	EGNOS – das SBAS Europas.....	394
10.2.2.3	Besonderheiten von EGNOS	396
10.3	Lokale Erweiterungssysteme	397
10.3.1	Marine-DGNSS	397
10.3.2	GBAS – bodengestütztes Erweiterungssystem nach ICAO-Standard.....	398
10.3.3	Vernetzte Referenzstationen	399

11	Andere satellitengestützte Ortungssysteme	401
11.1	ARGOS.....	401
11.2	DORIS	403
12	Vermessung mit Satelliten in der Praxis	405
12.1	Besonderheiten satellitengestützter Vermessung.....	406
12.2	Auswahl von Hard- und Software.....	407
12.2.1	Auswahl der Auswertesoftware	407
12.2.1.1	Auswertung von Originalbeobachtungen.....	408
12.2.1.2	Auswertung von Doppeldifferenzen (Baseline-Auswertung)	408
12.2.2	Empfängerauswahl	408
12.3	Antennenkalibrierung	410
12.3.1	Relative Kalibrierung im Feld	411
12.3.2	Absolute Kalibrierung im Feld	412
12.3.3	Absolute Kalibrierung im Hochfrequenzlabor.....	413
12.4	Vorbereitung der Feldmessungen	415
12.4.1	Erkundung der Punktlagen.....	415
12.4.2	Auswahl des Beobachtungsverfahrens.....	416
12.4.2.1	Statisches Beobachtungsverfahren.....	417
12.4.2.2	Kinematische Beobachtungsverfahren.....	417
12.4.3	Kontrolle einer GNSS-Messung	418
12.5	Differenzielle Vermessung	418
12.5.1	RTK-Vermessung	418
12.5.1.1	Voraussetzungen.....	418
12.5.1.2	Varianten der RTK-Vermessung	419
12.5.2	Statische Vermessung mit Auswertung im Postprocessing	422
12.5.2.1	Varianten der statischen Beobachtung.....	422
12.5.2.2	Beobachtungsdauer.....	425
12.5.2.3	Zu erwartende Genauigkeit und Zuverlässigkeit	426
12.5.2.4	Aspekte der Messungsdurchführung.....	427
12.5.2.5	Durchführung der Auswertung	429
12.6	Absolute Vermessung (PPP-Vermessung).....	435
12.7	Besonderheiten amtlicher GNSS-Vermessungen	435
12.7.1	Einpassen von Lagekoordinaten (allgemeiner Fall).....	436
12.7.2	Einpassen von Lagekoordinaten in das Bezugssystem ETRS89	438
12.7.3	Höheneinpassung	439
12.8	Kombination von GNSS mit terrestrischen Messelementen.....	440
12.8.1	Schaffung und Überwachung vermarkter Festpunktfelder	441
12.8.2	Detailaufnahme ohne vermarktete Festpunktfelder	442
13	Ortung mit Satelliten in der Praxis	443
13.1	Administrative Aspekte	443
13.2	Ortung im absoluten Modus	445
13.2.1	Auswertung der Codephasen (Navigationslösung).....	445
13.2.2	Auswertung der Phasenbeobachtungen (PPP-Verfahren).....	447

13.3	Ortung im differenziellen Modus.....	447
13.3.1	DGNSS	448
13.3.2	Netz-DGNSS	448
Anhang A:	Der integrierte geodätische Raumbezug – das geodätische Referenzsystem für Deutschland.....	449
Anhang B:	Finite-Element-Darstellung der Höhenbezugsfläche	457
Anhang C:	Datumstransformation von Geoidmodellen	460
Anhang D:	Erzeugung von PRN-Folgen.....	464
Anhang E:	Berechnung der Spektraldichteverteilung bei BOC- Modulationen	479
Anhang F:	Berechnung der Satellitenposition	481
Anhang G:	Messgrößenbestimmung.....	490
Anhang H:	Datenformate	502
Anhang I:	In Deutschland verfügbare Echtzeit-DGNSS-Dienste für hochgenaue Echtzeit-Positionierung	513
Anhang J:	Excel-Tabellen und -Grafiken	522
	Kleines geodätisches Glossar	529
	Abkürzungsverzeichnis	535
	Literaturverzeichnis.....	539
	Stichwortverzeichnis	559