

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.....	4
1.2.2	Figur der Erde.....	7
1.2.2.1	Modell „Ebene“.....	8
1.2.2.2	Modell „Kugel“.....	9
1.2.2.3	Modell „Rotationsellipsoid“.....	12
1.2.2.4	Geoid.....	13
1.2.2.5	Verfahren zur Geoid-/Ellipsoidbestimmung	19
1.2.2.6	Zusammenfassung	22
1.2.3	Definition und Messung von Höhen	23
1.2.4	Stand der Erdmessung vor dem Satellitenzeitalter	34
1.3	Überblick über die Erdmessung mit Satelliten	35
1.3.1	Methoden der Satellitengeodäsie.....	35
1.3.2	Beobachtungsverfahren.....	36
1.3.3	Ergebnisse der Satellitengeodäsie	36
1.4	Referenzsysteme der Geodäsie – das Geodätische Datum	37
1.4.1	Referenzsystem, Datumsfestsetzung und Referenznetz	37
1.4.2	Datumsfestsetzung in konventionellen geodätischen Referenzsystemen	41
1.4.2.1	Datumsfestsetzung bei Lagevermessungen.....	41
1.4.2.2	Datumsfestsetzung bei Höhenvermessungen	44
1.4.3	Datumsfestsetzung in globalen Referenzsystemen – das Geodätische Datum.....	45
1.4.4	Datumstransformation	48
1.4.5	Koordinaten der Landesvermessung	50
1.4.5.1	Ellipsoidische Koordinaten	50
1.4.5.2	Ebene kartesische Koordinaten	50
1.5	Grundprinzip der GNSS-Ortung.....	51
1.5.1	Absolute Ortung (Stand-alone GNSS)	51
1.5.2	Differenzielle Ortung	53
2	Theoretische Grundlagen	55
2.1	Satellitenbahn	55
2.1.1	Ungestörte KEPLER-Ellipse.....	55
2.1.2	Gestörte KEPLER-Ellipse	61
2.1.3	Orbittypen.....	64
2.2	Koordinatensysteme	66
2.2.1	Astronomische Koordinatensysteme	66
2.2.2	Terrestrische Koordinatensysteme	69

2.2.2.1	Globale kartesische Koordinaten.....	69
2.2.2.2	Globale ellipsoidische Koordinaten	71
2.2.2.3	Topozentrische Koordinaten	71
2.3	Koordinatentransformationen	73
2.3.1	Berechnung terrestrischer Koordinaten aus KEPLER-Elementen	73
2.3.2	Berechnung ellipsoidischer Koordinaten aus kartesischen Koordinaten.....	74
2.3.3	Berechnung kartesischer Koordinaten aus ellipsoidischen Koordinaten.....	74
2.3.4	Berechnung topozentrischer Polarkoordinaten.....	74
2.4	Überführen ellipsoidischer Höhen in Gebrauchshöhen.....	75
2.4.1	Einleitung	75
2.4.2	Höhenberechnung unter alleiniger Verwendung eines Geoid- modells	76
2.4.3	Höhenberechnung unter Verwendung von Passpunkten.....	77
2.4.3.1	Einleitung	77
2.4.3.2	Flächenapproximation durch bivariate Polynome.....	78
2.4.3.3	Finite-Element-Darstellung der Höhenbezugsfläche.....	80
2.4.3.4	Datumstransformation von Geoidmodellen.....	80
2.4.3.5	Digitale Finite Element Höhenbezugsfläche (DFHBF).....	80
2.5	Zeitsysteme	81
2.5.1	Sonnenzeit – UT	81
2.5.2	Sternzeit.....	84
2.5.3	Atomzeit – UTC	84
2.5.4	GNSS-Systemzeiten	86
2.5.5	Relativistische Aspekte der Zeitmessung	86
2.6	Elektromagnetische Wellen	87
2.6.1	Allgemeine Grundlagen.....	87
2.6.1.1	Mathematische Beschreibung.....	87
2.6.1.2	Spektrum der elektromagnetischen Wellen.....	90
2.6.1.3	Ausbreitung von Radiowellen	92
2.6.2	Der DOPPLER-Effekt.....	92
2.6.3	Phasengeschwindigkeit – Gruppengeschwindigkeit	95
2.6.4	Signalausbreitung in der Erdatmosphäre.....	97
2.6.4.1	Aufbau der Erdatmosphäre.....	100
2.6.4.2	Ionosphäre	101
2.6.4.3	Ionosphärische Refraktion.....	104
2.6.4.4	Erfassung der ionosphärischen Refraktion.....	106
2.6.4.5	Troposphärische Refraktion	111
2.6.4.6	Mehrwegeausbreitung (Multipath).....	113
2.6.4.7	Signalbeugung (Signal Diffraction)	116
2.7	Elektromagnetische Signale der GNSS	118
2.7.1	Die Frequenzzuweisung – Signalbänder der GNSS.....	118
2.7.2	Prinzipielle Entstehung der GNSS-Signale	121
2.7.2.1	Basisbandsignal, Bandpasssignal	121

2.7.2.2	Spread-Spektrum-Technik (Spreizbandtechnik), spektrale Leistungsdichte.....	121
2.7.3	Modulationsverfahren im Einzelnen	123
2.7.3.1	PSK-Modulation.....	123
2.7.3.2	BOC-Modulation.....	128
2.7.4	Signalvielfachnutzung (Signal-Multiplexing).....	132
2.7.4.1	Quadraturmodulation.....	132
2.7.4.2	Alternative BOC-Modulation.....	137
2.7.4.3	Modifizierte Hexaphasen-Modulation.....	140
2.7.4.4	MBOC-Modulation	140
2.7.5	PRN-Codes.....	141
2.7.5.1	Eigenschaften von PRN-Codes	141
2.7.5.2	Autokorrelationsfunktion	142
2.7.6	Autokorrelationsfunktion (AKF), Leistungsdichte und Bandbreite der GNSS-Signale	143
2.7.6.1	Autokorrelationsfunktion der GNSS-Signale.....	143
2.7.6.2	Spektrale Leistungsdichte und Bandbreite der GNSS-Signale.....	148
2.7.7	Verfahren zur Sicherung der Datenübertragung.....	151
2.7.7.1	Hinzufügen von Redundanz	151
2.7.7.2	Interleaving.....	154
2.7.8	Frequenzumsetzung, Filter	154
2.8	Satellitendatum	156
2.9	Genauigkeitsmaße.....	157
2.9.1	Eindimensionale Genauigkeitsmaße.....	158
2.9.2	Zweidimensionale Genauigkeitsmaße	159
2.9.3	Dreidimensionale Genauigkeitsmaße	160
2.9.4	Standardabweichung σ als zwei- oder dreidimensionales Genauigkeitsmaß.....	161
2.10	Anforderungen an Navigationssysteme	161
3	Arbeitsweise und Systemcharakteristiken	165
3.1	Die Systemkomponenten	165
3.1.1	Weltraumsegment.....	165
3.1.1.1	Satellitenkonstellation	165
3.1.1.2	GNSS-Satelliten	166
3.1.2	Bodensegment	168
3.1.2.1	Bodensegment der Systembetreiber	168
3.1.2.2	Ziviler Bahndienst des IGS	168
3.1.3	Nutzersegment.....	170
3.2	Die Navigationsnachricht	170
3.3	GNSS-Messgrößen	171
3.3.1	Messung der Pseudoentfernung (Codephase)	171
3.3.2	Messung der Trägerphase.....	173
3.3.3	Bestimmung der DOPPLER-Frequenzverschiebung	175

3.4	Modellierung der Messgrößen	175
3.4.1	Modellierung der Pseudoentfernung	175
3.4.1.1	Herkömmliche Navigationslösung	175
3.4.1.2	Navigationslösung mit Hilfsdaten (A-GNSS)	182
3.4.2	Modellierung der Trägerphase	184
3.4.2.1	Grundgleichung	184
3.4.2.2	Linearkombinationen aus Trägerphasen einer Frequenz	187
3.4.2.3	Linearkombinationen aus Trägerphasen von zwei Frequenzen	192
3.4.2.4	Linearkombinationen aus Trägerphasen von drei Frequenzen	195
3.4.3	Gemeinsame Modellierung von Code- und Trägerphasenmes- sung	196
3.4.3.1	Glättung der Pseudostrecken	196
3.4.3.2	Precise Point Positioning (PPP)	198
3.4.4	Behandlung von Phasensprüngen	200
3.4.4.1	Aufdecken von Phasensprüngen	200
3.4.4.2	Korrigieren von Phasensprüngen	203
3.4.5	Verfahren zur Festlegung des Mehrdeutigkeitsparameters der Trägerphase	203
3.4.5.1	Lösung aus der Satellitengeometrie	204
3.4.5.2	Lösungen mit Suchalgorithmen	204
3.4.5.3	Mehrdeutigkeitslösungen „on-the-fly“	205
3.5	Relative GNSS-Positionierung	206
3.5.1	Relative GNSS-Positionierung mit <i>einer</i> Referenzstation	207
3.5.1.1	Differenzielles GNSS (DGNSS)	208
3.5.1.2	Real-Time Kinematik (RTK)	209
3.5.1.3	Relative GNSS-Positionierung im Postprocessing	209
3.5.2	Relative GNSS-Positionierung im Referenzstationsnetz	210
3.5.2.1	Netz-DGNSS	210
3.5.2.2	Netz-RTK	212
3.5.2.3	Netzauswertungen im Postprocessing	215
3.5.3	Aspekte der Datenfernübertragung	216
3.5.3.1	Datenfernübertragung durch DGNSS-spezifische Funk- dienste und Frequenzen	216
3.5.3.2	Datenfernübertragung durch Mobilfunk	217
3.5.3.3	Datenfernübertragung mithilfe des Internets und Mobil- funks	217
3.6	Genauigkeit	218
3.6.1	Vorbemerkung	218
3.6.2	Genauigkeit der Pseudostreckenmessung	218
3.6.2.1	Nutzer-Streckenfehler	218
3.6.2.2	Signalausbreitungsfehler	219
3.6.2.3	Empfängerfehler	220
3.6.2.4	Gesamtfehlerhaushalt	221

3.6.3	Genauigkeit bei Auswertung der Pseudostreckenmessung	221
3.6.3.1	Genauigkeit der herkömmlichen Einzelpunktbestimmung – DOP-Faktoren	221
3.6.3.2	Genauigkeit bei differenzieller Behandlung der Pseudo- strecken.....	223
3.6.4	Genauigkeit der Auswertung der Trägerphasen	223
3.6.4.1	Genauigkeit bei differenzieller Behandlung.....	223
3.6.4.2	Genauigkeit von PPP-Lösungen.....	224
3.7	Merkmale von GNSS-Empfängern.....	224
4	GPS – das US-amerikanische GNSS.....	227
4.1	Einleitung.....	227
4.2	GPS-Dienste	229
4.3	Segmente.....	229
4.3.1	Weltraumsegment.....	229
4.3.1.1	Satellitenkonstellation	229
4.3.1.2	Satelliten.....	229
4.3.2	Bodensegment	231
4.4	Referenzsysteme	231
4.4.1	Positionsangaben	231
4.4.2	Zeit	232
4.5	Herkömmliches GPS.....	232
4.5.1	Weltraumsegment.....	232
4.5.2	Bodensegment	233
4.5.3	Navigationenachricht.....	234
4.5.3.1	Struktur der Navigationenachricht.....	235
4.5.3.2	Inhalt der Navigationenachricht	235
4.5.4	Signalstrukturen.....	237
4.5.4.1	Einleitung	237
4.5.4.2	L1-Signale	237
4.5.4.3	L2-Signal	240
4.5.4.4	Formelmäßige Darstellung der Signale	240
4.6	Die Systemsicherungsmaßnahmen Selective Availability (SA) und Anti-Spoofing (A-S).....	241
4.6.1	Antispoofing (A-S).....	241
4.6.2	Selective Availability (SA).....	241
4.7	Besonderheiten der GPS-Messgrößenerzeugung.....	242
4.7.1	Messung der Pseudostrecke (Codephase) beim C/A-Code	242
4.7.2	Messung der Pseudostrecke (Codephase) beim P(Y)-Code	244
4.7.3	Messung der L2-Trägerphase bei eingeschaltetem Anti- Spoofing (A-S)	244
4.8	Modernisiertes GPS	246
4.8.1	Einleitung	246
4.8.2	Raumsegment	247

4.8.3	Bodensegment	249
4.8.4	Navigationsnachricht	249
4.8.5	Die modernisierten Signale	251
4.8.5.1	M-Codesignal	251
4.8.5.2	L2C-Signal	252
4.8.5.3	L5-Signal	254
4.8.5.4	L1C-Signal	256
4.9	GPS-Signale im Überblick.....	258
5	GLONASS – das russische GNSS.....	263
5.1	Einleitung.....	263
5.2	GLONASS-Dienste	264
5.3	Segmente.....	264
5.3.1	Weltraumsegment.....	264
5.3.1.1	Satellitenkonstellation	264
5.3.1.2	Satelliten.....	266
5.3.2	Bodensegment	267
5.4	Navigationsnachricht	269
5.4.1	Navigationsnachricht des offenen Diensts	269
5.4.2	Navigationsnachricht des autorisierten Diensts.....	272
5.5	GLONASS-Referenzsysteme	272
5.5.1	Positionsangaben	272
5.5.2	Zeit	273
5.6	GLONASS-Signale.....	273
5.6.1	Signale der GLONASS-M-Satelliten	273
5.6.1.1	Allgemeine Informationen.....	273
5.6.1.2	Modulationen/Codes	274
5.6.2	Signale der GLONASS-K-Satelliten.....	275
5.7	GLONASS-Signale im Überblick	277
6	Compass – das chinesische GNSS.....	283
6.1	Einleitung.....	283
6.2	COMPASS-Dienste	283
6.3	Segmente.....	284
6.3.1	Weltraumsegment.....	284
6.3.1.1	Satellitenkonstellation	284
6.3.1.2	Satelliten.....	285
6.3.2	Bodensegment	285
6.4	Navigationsnachricht	285
6.5	Referenzsysteme	285
6.5.1	Positionsangaben	285
6.5.2	Zeit	285

6.6	Signale	285
6.6.1	B1-Signal.....	286
6.6.2	B2-Signal.....	287
6.6.3	B3-Signal.....	287
7	Galileo – das europäische GNSS.....	289
7.1	Historische Entwicklung – Ausbauzustand	289
7.2	Das Galileo Dienste-Konzept	291
7.3	Segmente.....	293
7.3.1	Weltraumsegment.....	293
7.3.1.1	Satellitenkonstellation	293
7.3.1.2	Satelliten.....	293
7.3.2	Bodensegment	294
7.4	Galileo-Navigationsnachricht	295
7.5	Referenzsysteme	297
7.5.1	Position.....	297
7.5.2	Zeit	297
7.6	Signale	297
7.6.1	Signal E1	298
7.6.2	Signal E6	300
7.6.3	Signal E5	301
8	IRNSS – das indische regionale Navigationssatellitensystem.....	303
9	Erweiterungssysteme.....	305
9.1	Globale Erweiterungssysteme.....	305
9.2	Regionale Erweiterungssysteme	307
9.2.1	QZSS – das satellitengestützte Erweiterungssystem Japans.....	307
9.2.2	SBAS – satellitengestütztes Erweiterungssystem nach ICAO-Standard.....	309
9.2.2.1	Einführung.....	309
9.2.2.2	EGNOS – das SBAS Europas	310
9.2.2.3	Besonderheiten von EGNOS.....	311
9.3	Lokale Erweiterungssysteme	312
9.3.1	Marine DGNSS	312
9.3.2	GBAS – bodengestütztes Erweiterungssystem nach ICAO-Standard..	313
9.3.3	Vernetzte Referenzstationen.....	314
10	Andere satellitengestützte Ortungssysteme	315
10.1	ARGOS.....	315
10.2	EutelTRACS	317
10.3	DORIS	318

11 Ortung und Vermessung mit Satelliten in der Praxis	321
11.1 <i>Ortung</i> mit Satelliten in der Praxis	321
11.1.1 Administrative Aspekte	321
11.1.2 Ortung im absoluten Modus	324
11.1.3 Ortung im differenziellen Modus	326
11.1.3.1 DGNSS	326
11.1.3.2 Netz-DGNSS	327
11.2 <i>Vermessung</i> mit Satelliten in der Praxis	327
11.2.1 Besonderheiten satellitengestützter Vermessung	328
11.2.2 Auswahl von Hard- und Software	329
11.2.2.1 Auswahl der Auswertesoftware	329
11.2.2.2 Empfängerwahl	331
11.2.3 Antennenkalibrierung	332
11.2.3.1 Relative Kalibrierung im Feld	333
11.2.3.2 Absolute Kalibrierung im Feld	334
11.2.3.3 Absolute Kalibrierung im Hochfrequenzlabor	335
11.2.4 Vorbereitung der Feldmessungen	337
11.2.4.1 Erkundung der Punktlagen	337
11.2.4.2 Auswahl des Beobachtungsverfahrens	338
11.2.4.3 Kontrolle einer GNSS-Messung	340
11.2.5 RTK-Vermessung	340
11.2.5.1 Voraussetzungen	340
11.2.5.2 Varianten der RTK-Vermessung	341
11.2.6 Statische Vermessung mit Auswertung im Postprocessing	344
11.2.6.1 Varianten der statischen Beobachtung	344
11.2.6.2 Aspekte der Messungsdurchführung	349
11.2.6.3 Durchführung der Auswertung	351
11.2.7 Besonderheiten amtlicher GNSS-Vermessungen	357
11.2.7.1 Einpassen von Lagekoordinaten (Allgemeiner Fall)	358
11.2.7.2 Einpassen von Lagekoordinaten in das Bezugssystem ETRS89	359
11.2.7.3 Höheneinpassung	360
11.2.8 Kombination von GNSS mit terrestrischen Messelementen	361
12.2.8.1 Schaffung und Überwachung vermarkter Festpunkt- felder	362
12.2.8.2 Detailaufnahme ohne vermarkte Festpunktfelder	363
 Anhang A: Geodätische Referenzsysteme und -netze in Deutschland	 365
A.1 Bisherige Systeme und Netze	365
A.2 Neue Systeme	374
 Anhang B: Finite-Element-Darstellung der Höhenbezugsfläche	 379
 Anhang C: Datumstransformation von Geoidmodellen	 383

Anhang D: Erzeugung von PRN-Folgen	387
D.1 Allgemeines	387
D.2 Schieberegister	387
D.3 Maximalfolgen.....	389
D.4 GOLD-Codes.....	389
D.5 Legendre-Folgen.....	393
D.6 WEIL-Codes/L1C-Codes	395
D.7 Random-Codes	395
D.8 Tiered-Codes	395
D.9 NEUMANN-HOFMANN-Codes	396
Anhang E: Berechnung der Spektraldichteverteilung bei BOC-Modulationen	397
Anhang F: Berechnung der Satellitenposition	399
F.1 Berechnung der Satellitenposition aus KEPLER-Elementen	399
F.2 Berechnung der Satellitenposition aus Koordinaten-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor.....	402
F.3 Berechnung der Satellitenposition mithilfe der Almanachdaten (GLONASS).....	406
Anhang G: Messgrößenbestimmung	409
G.1 Messung der Codephase (Pseudoentfernung).....	409
G.2 Messung der Trägerphase	413
Anhang H: Datenformate	421
H.1 RINEX.....	421
H.2 RTCM SC-104.....	423
H.3 NMEA-0183	428
Anhang I: In Deutschland verfügbare Echtzeit-DGNSS-Dienste	431
I.1 Genauigkeitsniveau „Meter“.....	431
I.2 Genauigkeitsniveau „Zentimeter“	431
Anhang J: Excel-Tabellen und -Grafiken	441
J.1 Einführung.....	441
J.2 Auflistung der Tabellen	442
J.3 Erläuterung der Tabellen	443

Kleines geodätisches Glossar	449
Abkürzungsverzeichnis	455
Literaturverzeichnis	459
Stichwortverzeichnis	473