

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	21
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	Grundprinzip 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 Geoids.....	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.....	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	Signalvielfachnutzung (Signal-Multiplexing)	151
2.7.4.1	Quadraturmodulation.....	151
2.7.4.2	Alternative BOC-Modulation	156
2.7.4.3	Modifizierte Drei-Code Hexaphasen Modulation	159
2.7.4.4	MBOC-Modulation	159
2.7.5	PRN-Codes.....	160
2.7.5.1	Eigenschaften von PRN-Codes	160
2.7.5.2	Die 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	Signal-Qualität (SNR, C/N0).....	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	Filter, Frequenzumsetzer	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-Empfangs-Antennen	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	Navigationssnachricht.....	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	Empfänger-Typen.....	220
3.4	GNSS-Messgrößen.....	211
3.4.1	Messung der Pseudoentfernung (Code-Phase)	212
3.4.2	Messung der Träger-Phase	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 einer Referenzstation	247
3.6.2.1	Differenzielles GNSS (DGNSS)	248
3.6.2.2	Real-Time Kinematik (RTK).....	249
3.6.2.3	Relative GNSS-Positionierung im Post-Processing	249
3.6.3	Differenzielle GNSS-Positionierung im Referenzstationsnetz	250
3.6.3.1	Netz-DGNSS	260
3.6.3.2	Netz-RTK	260
3.6.2.3	Netzauswertungen im Post-Processing.....	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 GNSS-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 bei Trägerphasen.....	267
3.7.4.1	Genauigkeit bei differenzieller Behandlung	267
3.7.4.2	Genauigkeit der PPP-Lösung.....	267
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	Störsende geringer Reichweite (Privacy 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 Störsignale.....	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	306
5.5.3	Navigationenachricht	308
5.5.3.1	Struktur der Nachricht	308
5.5.3.2	Inhalt der Nachricht	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
5.5.5	Formelmäßige 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 (S/A)	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	Navigationenachricht	323
5.8.5	Die modernisierten Signale	324
5.8.5.1	M-Code Signal	325
5.8.5.2	L2C-Signal	325
5.8.5.3	L5-Signal	327
5.8.5	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 Dienstes.....	340
6.4.2	Navigationenachricht des autorisierten Dienstes.....	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.	Allgemeine Informationen.....	347
6.6.2.	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.....	359
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 veröffentliche 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.....	393
10.2.2.3	Besonderheiten von EGNOS	394
10.3	Lokale Erweiterungssysteme	396
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	<i>Vermessung mit Satelliten in der Praxis</i>	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	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	420
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	<i>Ortung mit Satelliten in der Praxis</i>	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	461
Anhang D: Erzeugung von PRN-Folgen.....	465
Anhang E: Berechnung der Spektraldichteverteilung bei BOC- Modulationen	481
Anhang F: Berechnung der Satellitenposition	483
Anhang G: Messgrößenbestimmung.....	493
Anhang H: Datenformate	505
Anhang I: In Deutschland verfügbare Echtzeit-DGNSS-Dienste	517
Anhang J: Excel-Tabellen und -Grafiken	527
Kleines geodätisches Glossar	535
Abkürzungsverzeichnis.....	541
Literaturverzeichnis.....	545
Stichwortverzeichnis.....	565