

Seminar „Mobile Computing“

Universität Osnabrück
Fachbereich Mathematik/Informatik
Fachgebiet Informatik
Prof. Dr. Vornberger

Dipl. Wirtsch.-Inf. Christian Reuels

Global Positioning System

29. Juli 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Geschichte des Global Positioning System	1
3	Grundlagen des Global Positioning System	2
3.1	Komponenten	2
3.2	Signale und Codes	8
3.3	Grundprinzip der GPS-Positionsbestimmung	11
3.4	Fehlereinflüsse	12
3.5	Einsatzgebiete / Anwendungsbereiche	15
4	Differentielles Global Positioning System	16
5	GALILEO - das europäische GPS-Projekt	17
6	Ausblick	19

Abbildungsverzeichnis

1	Komponenten eines GPS-Systems	3
2	Das Control Segment des GPS	4
3	Gegenwärtige Satellitenzusammenstellung (Stand: 28.07.2003) . .	6
4	Screenshot der Software „GPS Viewer“	7
5	Selective Availability	10
6	Möglicher Empfängerstandort bei Vorliegen von Entfernungsmessungen zu...	13
7	Satellitenbahnfehler	14
8	Ionosphärenkorrektur	15
9	Differentielles GPS	17

Tabellenverzeichnis

1	Zeitkarte GPS-System	2
2	Anwendungsgebiete für das GPS	16
3	Zeitkarte GALILEO	18

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abb.
Bd.	Band
evtl.	eventuell
Hrsg.	Herausgeber
o.J.	ohne Jahrgang
S.	Seite
vgl.	Vergleiche

1 Einleitung

Bereits seit Jahrzehnten sind landgestützte Funkortungs- und Navigationssysteme für die Luft- und Seefahrt in Betrieb. Hierbei kommen hauptsächlich Ortungsverfahren wie die Peilung oder die Langzeitmessung zum Einsatz.¹

Durch den technologischen Fortschritt in der Raumfahrt und auch in der Informationsverarbeitung war es möglich, die Leistungsfähigkeit dieser Systeme immer weiter zu vergrößern. Der gegenwärtige Höhepunkt wurde sicher mit der Einrichtung eines satellitengestützten Funkortungs- und Navigationssystem mit hoher Genauigkeit und permanenter Erreichbarkeit - dem Global Positioning System (GPS) - erreicht. Diese Arbeit stellt die Geschichte und die Grundlagen des GPS vor. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf das zukünftige europäische Satellitennavigationsprogramm GALILEO gegeben.

2 Geschichte des Global Positioning System

Die Entwicklung von Funkortungssystemen begann bereits weit vor der Installation von GPS. Bereits im Zweiten Weltkrieg wurden solche Technologien (LORAN (Alliierte) und Sonne (Deutschland)) verwendet, um Ortsbestimmungen durchzuführen. Diese Systeme wurden im Laufe der Zeit immer weiter ausgebaut und verbessert.

Das erste Satellitennavigationssystem wurde von der US-Navy bereits 1960 in Betrieb genommen und seit 1967 auch zu zivilen Zwecken verwendet. Dieses System mit der Bezeichnung TRANSIT besaß zum damaligen Zeitpunkt eine Ortungsgenauigkeit von ca. 500 Metern. Es bestand aus sechs Satelliten mit einer Umlaufzeit von je 107 Minuten. Mit TRANSIT war jedoch noch keine Ortung von beweglichen Fahrzeugen möglich. Darüber hinaus unterstützte TRANSIT lediglich eine 2D-Positionsbestimmung. Die Bestimmung der absoluten Höhe eines Empfängers war also nicht möglich. Ein weiterer Schwachpunkt des Systems TRANSIT war, dass ein kontinuierlicher Empfang an jedem Ort der Erde noch nicht möglich war.²

Aus diesem Grund hat das Department of Defense (DoD) 1986 mit der Konzeption des NAVSTAR-GPS (Navigation System with Timing and Rating - Global Positioning System) begonnen. Das GPS-System sollte so konzipiert sein, dass es zu jeder Zeit Antworten auf die folgenden Fragen geben sollte:

- Wo genau befinde ich mich (3D - also neben dem Längen- und dem Breiten-

¹vgl. (SCHUMANN o.J.b)

²vgl. (SCHUMANN o.J.b)

Zeitraum	
1974 - 1979	Start der Entwicklung des einheitlichen Defence Navigation Satellite System (DNSS) Phase I: Überprüfungsphase (Testen der GPS-Idee) <i>Überprüfung der Konzeption auf Eignung zur Erfüllung der Forderungen an das System; Start von Testsatelliten, mit deren Hilfe der militärische Wert des Systems überprüft werden sollte; Kostenrechnungen</i>
1979 - 1985	Phase II: Entwicklungsphase (11 Block I Satelliten) <i>Technische Entwicklung des Systems; Start weiterer Prototypsatelliten; Entwicklungsarbeit für die Empfangssysteme</i>
1989 - 1994	Phase III: Ausbauphase (24 Block II Satelliten) <i>Ausbau des Systems</i>
1995	volle Betriebsbereitschaft
1996 - 2001	Ersetzung der GPS-Satelliten durch neuere Modelle aufgrund der begrenzten Haltbarkeit

Tabelle 1: Zeitkarte GPS-System

grad auch die absolute Höhe)?

- Mit welcher Geschwindigkeit bewege ich mich?
- Welche Zeit benötige ich (Uhrzeit)?
- u.v.m.

In Tabelle 1 wird der bisherige historische Verlauf von der Idee bis zur voll funktionsfähigen Installation des GPS-Systems dargestellt.³

3 Grundlagen des Global Positioning System

3.1 Komponenten

Das GPS-System besteht prinzipiell aus drei Komponenten:⁴

- GPS-Kontroll-System (Control Segment)
- Weltraumsegment (Space Segment)

³vgl. (BAUER 2003), S. 153f.

⁴vgl. (SCHÄFER 2001), S.3

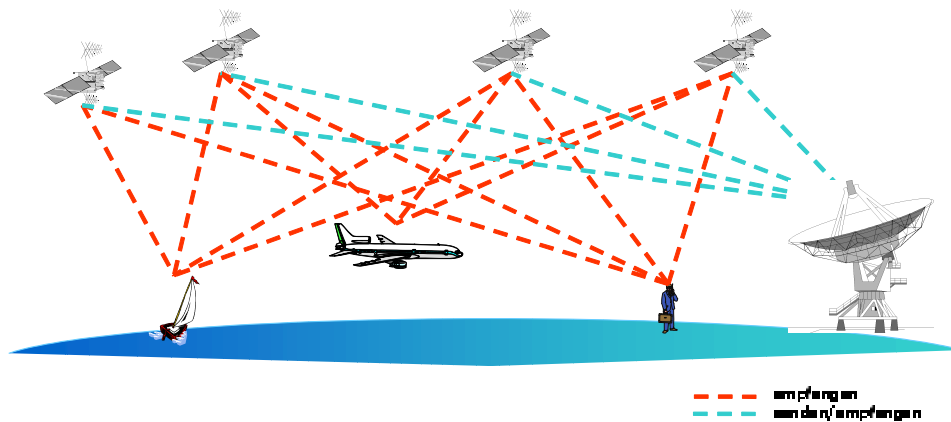


Abbildung 1: Komponenten eines GPS-Systems

- GPS-Empfänger (User Segment)

Abb. 1 stellt die Komponenten graphisch dar.⁵ Es lässt sich erkennen, dass das Control Segment als einzige Komponente die Möglichkeit bietet, Signale sowohl von den Satelliten zu empfangen als auch Signale zu den Satelliten zu senden.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten im Einzelnen beschrieben.

Control Segment

Die Hauptaufgaben des Kontrollsegments bestehen aus

- der Kontrolle des Gesamtsystems,
- der Datenverarbeitung und der Datenübermittlung,
- der Bestimmung und Korrektur der GPS-Systemzeit (Atomuhr) sowie
- der Vorausberechnung der Navigationsdaten und Bahnephemeriden bzw. der Steuerung der Satelliten.

Das Control Segment besteht aus drei verschiedenen Komponenten mit unterschiedlichen Aufgaben. Die Monitor Stations empfangen die Signale von den Satelliten und berechnen die Entfernungsdaten. Die Master Control Station ermittelt die genauen Satellitenephemeriden und leitet evtl. Bahnkorrekturen ein. Mit Hilfe der Ground Antennas werden die Daten an die Satelliten gesendet. In Abb. 2 sind die einzelnen Stationen des Control Segments aufgeführt.

⁵in Anlehnung an (SCHÄFER 2001), S.3



Abbildung 2: Das Control Segment des GPS

Space Segment

Das Space Segment wird durch die GPS-Satelliten dargestellt. Die Satelliten umkreisen die Erde in einem Orbit von 20.183 Kilometern. Sie sind zum einen 55° gegen den Äquator geneigt, zum anderen 60° gegeneinander. Auf jedem Orbit (jeder Umlaufbahn) befinden sich mindestens vier Satelliten, die sich mit einer Umlaufdauer von zwölf Stunden um die Erde bewegen. Jeder Satellit eines identischen Orbits ist um 120° geographischer Breite gegen seinen Vor- bzw. Nachläufer versetzt.⁶

Die Aufgaben eines GPS-Satelliten lassen sich wie folgt beschreiben:⁷

- ◆ Empfangen und Speichern der vom terrestrischen Kontrollsegment übertragenen Informationen,
- ◆ einfache Datenverarbeitung mittels Mikroprozessoren,
- ◆ Vorhalten einer auf 10^{-13} Sekunden genauen Uhrzeit (Atomuhr) sowie
- ◆ Durchführung von Bahnkorrekturen durch Steuerungselemente.

⁶vgl. (SCHÄFER 2001), S. 3

⁷vgl. (BRINKKOETTER-RUNDE 1995)

Jeder Satellit ist mit einer eindeutigen Kennziffer versehen. Zur Erfüllung seiner Aufgaben ist er mit dem folgenden Equipment ausgerüstet:

- ◆ Solarflügel für die Stromversorgung,
- ◆ Radio-Transceiver,
- ◆ Cäsium/Rubidium-Atomuhr und
- ◆ Antriebssystem zur Lagekorrektur.

Im Signal der Satelliten sind in codierter Form Informationen über die aktuelle Zeit, die eigene Position und Hilfsinformationen für die Nutzer enthalten.

Es lassen sich vier verschiedene Satelliten-Generationen unterscheiden.

Typ Block I: Die ersten elf Satelliten vom Typ Block I wurden im Zeitraum vom 22. Februar 1978 und 9. Oktober 1985 in den Weltraum befördert. Es waren noch Experimentations-Satelliten, die bei der Entwicklung und den Tests des GPS-Systems verwendet wurden. Sie waren mit einem Winkel von 64° zur Erde geneigt und hatten einen Navigationsdaten-Speicher von 14 Tagen. Hierdurch war es möglich, dass der Satellit bis zu 14 Tage ohne Verbindung zum Control-Segment weiterarbeiten konnte. Die geplante Lebenszeit des Typ Block I betrug 4,5 Jahre. Diese Lebenszeit wurde aber teilweise weit übertroffen (bis zu 10 Jahre). Der letzte Satellit vom Typ Block I wurde am 18. November 1995 abgeschaltet.

Typ Block II/IIA: Die GPS-Satelliten der nächsten Generation wurden zwischen Februar 1989 und November 1997 in Betrieb genommen. Die insgesamt 28 Satelliten hatten einen Neigungswinkel von 55° zur Erde und einen Navigationsdaten-Speicher von bis zu 180 Tagen. Auch die Lebenszeit war mit 7,5 Jahren großzügiger bemessen als beim Vorgänger-Modell. Die Satelliten vom Typ II wurden erstmals mit den Sicherheitseigenschaften Selective Availability (SA) und Antispoofing (AS) ausgerüstet.⁸

Typ Block IIR: Die aktuelle GPS-Satelliten-Generation ist eine abwärtskompatible Weiterentwicklung des Typs Block II/IIA. Insgesamt 21 Satelliten mit einer geplanten Lebenszeit von 10 Jahren und einem Navigationsspeicher von bis zu 180 Tagen wurden in den letzten Jahren in den Orbit befördert.

Typ Block IIF: Ca. 2005 werden die ersten Satelliten vom Typ Block IIF in Betrieb genommen. Geplant sind insgesamt 33 Satelliten, die jeweils mit einer geplanten Lebenszeit von ca. 15 Jahren und einer weit verlängerten autonomen GPS-Positionsgenauigkeit ausgestattet sind.

⁸vgl. Kapitel 3.2.

LAUNCH ORDER	PRN	SVN	LAUNCH DATE	FREQ STD	PLANE	US SPACE COMMAND **
*II-1		14	14 FEB 89			19802
II-2	02	13	10 JUN 89	Cs	B5	20061
*II-3		16	18 AUG 89			20185
*II-4		19	21 OCT 89			20302
II-5	17	17	11 DEC 89	Cs	D6	20361
*II-6		18	24 JAN 90			20452
*II-7		20	26 MAR 90			20533
*II-8		21	02 AUG 90			20724
II-9	15	15	01 OCT 90	Cs	D5	20830
IIA-10	23	23	26 NOV 90	Cs	E5	20959
IIA-11	24	24	04 JUL 91	Cs	D1	21552
IIA-12	25	25	23 FEB 92	Cs	A2	21890
*IIA-13		28	10 APR 92			21930
IIA-14	26	26	07 JUL 92	Rb	F2	22014
IIA-15	27	27	09 SEP 92	Rb	A4	22108
IIA-16	01	32	22 NOV 92	Cs	F4	22231
IIA-17	29	29	18 DEC 92	Rb	F5	22275
IIA-18	22	22	03 FEB 93	Cs	B6	22446
IIA-19	31	31	30 MAR 93	Rb	C3	22581
IIA-20	07	37	13 MAY 93	Rb	C4	22657
IIA-21	09	39	26 JUN 93	Cs	A1	22700
IIA-22	05	35	30 AUG 93	Cs	B4	22779
IIA-23	04	34	26 OCT 93	Rb	D4	22877
IIA-24	06	36	10 MAR 94	Cs	C1	23027
IIA-25	03	33	28 MAR 96	Cs	C2	23833
IIA-26	10	40	16 JUL 96	Cs	E3	23953
IIA-27	30	30	12 SEP 96	Rb	B2	24320
IIA-28	08	38	06 NOV 97	Rb	A3	25030
***IIR-1		42	17 JAN 97			
IIR-2	13	43	23 JUL 97	Rb	F3	24876
IIR-3	11	46	07 OCT 99	Rb	D2	25933
IIR-4	20	51	11 MAY 00	Rb	E1	26360
IIR-5	28	44	16 JUL 00	Rb	B3	26407
IIR-6	14	41	10 NOV 00	Rb	F1	26605
IIR-7	18	54	30 JAN 01	Rb	E4	26690
IIR-8	16	56	29 JAN 03	Rb	B1	27663
IIR-9	21	45	31 MAR 03	Rb	D3	27704

Abbildung 3: Gegenwärtige Satellitenzusammenstellung (Stand: 28.07.2003)

Gegenwärtig befinden sich 9 Block II, 19 Block IIA und 8 Block IIR Satelliten in Betrieb. Tabelle 3 zeigt die zum Zeitpunkt der Schriftherstellung aktuelle Satellitenzusammenstellung.⁹

User Segment

Bestandteile des User Segments sind die eigentlichen GPS-Empfänger. Die GPS-Empfänger lassen sich anhand der Signalakquisition und anhand der Daten-/Signalverarbeitung klassifizieren.

Bei der Signalakquisition werden die folgenden Typen unterschieden:¹⁰

• Sequentielle Empfänger

Die Signale der Satelliten werden zeitversetzt über ein oder maximal zwei Hardwarekanäle empfangen.

⁹Die gegenwärtige Satellitenzusammenstellung kann über <ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt> abgerufen werden (Stand 28.07.2003).

¹⁰vgl. (PETERSEN 1990)

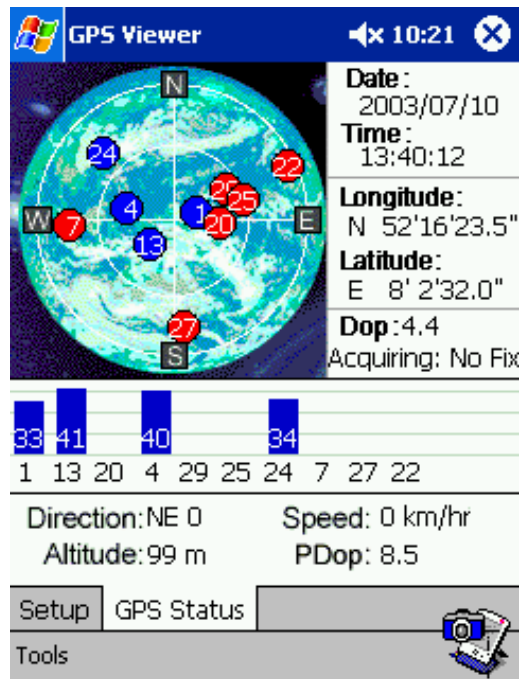


Abbildung 4: Screenshot der Software „GPS Viewer“

- ◆ **Multiplexempfänger**

Bei dieser Form eines GPS-Empfängers wird wie bei Sequentiellen Empfänger nur ein Hardwarekanal verwendet. Dieser wechselt jedoch in einem Multisekudentakt die Satellitensignale, wodurch eine Pseudo-Mehrkanalfunktionalität erreicht wird.

- ◆ **Mehrkanalempfänger**

Beim Mehrkanalempfänger werden mit Hilfe von bis zu zwölf Kanälen die Signale der Satelliten synchron und in Echtzeit empfangen.

In Bezug auf die Daten- und Signalverarbeitung lassen sich die codeabhängigen Empfänger, die nur Signale empfangen können, dessen Code sie kennen (z.B. den ungenauen C/A-Code), von den codefreien Empfänger, die auch verschlüsselte Signale auswerten können, unterscheiden.

Ein Beispiel für die Informationsfähigkeit eines GPS-Empfängers stellt der Screenshot eines Pocket-PCs dar (Abb. 4).

Es lassen sich die folgenden Information entnehmen:

- ◆ Datum und Zeit,
- ◆ Longitude (Längengrad),

- ◆ Latitude (Breitengrad),
- ◆ Richtung und Geschwindigkeit,
- ◆ Höhe und
- ◆ (P)Dop (Dilution of precision; Faktor zur Kennzeichnung der Unsicherheit einer (3D)GPS-Position)

3.2 Signale und Codes

Übertragungsfrequenzen

Um eine Abstandsmessung zwischen User Segment und Space Segment verstehen zu können, ist die Kenntnis der Signalstrukturen notwendig. Jeder Satellit sendet Navigationssignale, Navigations- und Systemdaten aus. Zur Übertragung der Informationen werden zwei recht hohe Sende- oder Trägerfrequenzen verwendet:¹¹

- ◆ $L_1 = 1575,43$ MHz (Wellenlänge = 19,05 cm)
- ◆ $L_2 = 1227,60$ MHz (Wellenlänge = 24,45 cm)

Zu den Informationen, die an das User-Segment übertragen werden, gehören

- ◆ Koordinaten der Positionen der Satelliten im Moment der Ausstrahlung der Mitteilung,
- ◆ Ephemeriden der Satelliten (Bahnparameter),
- ◆ Korrekturwerte für die Satellitenuhren,
- ◆ Korrekturwerte für die Wellenausbreitung in der hohen Atmosphäre und
- ◆ Almanach (Sammlung von Daten sämtlicher Satelliten, nach denen der Nutzer die Wahl der jeweils günstigsten Satelliten treffen kann).¹²

Für die Wahl der Frequenzen im L-Band sprechen fünf Gründe:¹³

- ◆ Frequenzen über 2 GHz machen den Einsatz von Richtantennen in der Empfangseinheit notwendig.

¹¹vgl. (ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000), S. 1.4

¹²(SCHUMANN o.J.b)

¹³vgl. (HARTL UND THIEL 1984)

- Die gleichzeitige Auswertung von zwei Trägerfrequenzen mit einem Wellenlängenabstand von etwa 20% bietet die Möglichkeit, das Verzögerungsverhalten in der Ionosphäre zu erfassen und damit Störungskorrekturen durchzuführen.
- In den Bereichen unter 100 MHz und über 10 GHz sind die ionosphärischen Verzögerungen besonders hoch. Durch die Verwendung der ausgewählten Frequenzen wird diesem Phänomen Rechnung getragen.
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen weicht um so stärker von der Lichtgeschwindigkeit ab, je geringer ihre Frequenz ist.
- Für die Code-Modulation auf die Trägerfrequenz benötigen PRN-Codes eine große Bandbreite (C/A-Code 2 MHz, P-Code 20 MHz).

Codemodulation

Die Trägerfrequenzen werden mit einer Folge positiver (+1) und negativer (-1) Impulse, einem sogenannten quasi-zufälligen Signal oder PRN-Code (Pseudo Random Noise) moduliert.¹⁴ Es lassen sich verschiedene Codes unterscheiden:¹⁵

C/A-Code: (Clear Access / Coarse Acquisition (grobe Erfassung)). Diese Codierung ist allgemein zugänglich, jedermann wird die Auswertung des GPS-Signals bei eingeschränkter Genauigkeit ermöglicht. Der C/A-Code hat eine Sequenz von 1023 Bits und wiederholt sich nach jeweils 1 ms. Die Länge eines Bits beträgt 293 Meter. Jeder Satellit sendet seine eigene Code-Sequenz aus. Der C/A-Code wird nur auf den Träger L_1 aufmoduliert.

P-Code (Protected / Precise). Der P-Code wiederholt sich erst nach 266,5 Tagen (rund $2,35 \cdot 10^{14}$ bits). Jedoch wird in der Praxis lediglich ein siebentägiges Fragment pro Satellit ausgesandt. Die Bit-Länge beträgt 29,3 Meter, wodurch genauere Messungen möglich sind als beim C/A-Code. Der P-Code wird auf L_1 sowie auf L_2 gesendet.

Navigation Message Informationen für den Systembenutzer (auf L_1 und L_2 vorhanden).

Nicht autorisierte (nicht militärische) GPS-Nutzer haben lediglich Zugang zum C/A-Code (Standard Positioning System). Die Nutzung des P-Code ist den amerikanischen Militärs vorbehalten (Precise Positioning System).

¹⁴vgl. (BAUER 2003), S. 162

¹⁵vgl. (ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000), S. 1.4

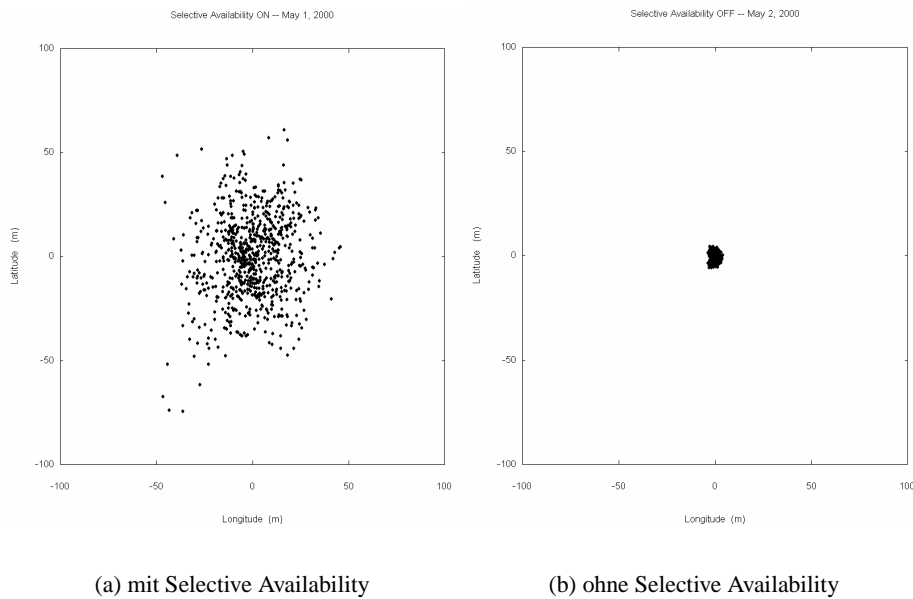


Abbildung 5: Selective Availability

Künstliche Verschlechterung der Signale

Das Department of Defense (DoD) hat zwei Mechanismen implementiert, die die Genauigkeit bei der zivilen Nutzung des GPS beeinflussen: Selective Availability (SA) und Anti-Spoofing (AS). Die im System verfügbare hohe Genauigkeit steht aus Gründen der Sicherheit lediglich den amerikanischen Militärs zur Verfügung.¹⁶

Selective Availability (SA): Durch die sogenannte Selective Availability werden die GPS-Signale künstlich verfälscht. Die hierdurch bedingte Positionsungenauigkeit kann hierbei zwischen 30 Meter und 100 Meter betragen. Es werden zwei Mechanismen der Veränderung der Navigationsmitteilung unterschieden:¹⁷

- ✦ **Epsilon-Mechanismus**

Die Bahninformation (Ephemeriden) in der Navigation Message wird fehlerhaft gemacht. Dieser Fehler geht direkt in die gemessenen Pseudo-Entfernungen ein.

- ✦ **Dithering**

Beim Dithering wird die Satellitenuhr manipuliert. Da bei der Berech-

¹⁶vgl. (MANSFELD 1998)

¹⁷vgl. (ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000), S. 1.5

nung der Position des Empfängers die Satellitenuhrzeit und die Empfängeruhrzeit notwendig sind, können durch das Dithering Messungenauigkeiten von bis zu 60 Metern hervorgerufen werden.

In Abb. 5 werden die Messgenauigkeiten bei Verwendung von Selective Availability und bei einer verfälschungsfreien Positionsberechnung verglichen.¹⁸

Am 2. Mai 2000 wurde SA offiziell ausgeschaltet.

Anti Spoofing (AS): Der P-Code wird mit dem sogenannten W-Code zusätzlich verschlüsselt. Der sich hieraus ergebende P(y)-Code lässt sich lediglich von autorisierten Nutzern (z.B. der Nato) entschlüsseln. Dieser Schutzmechanismus verhindert, dass irgend jemand vorgetäuschte GPS-Signale aussenden kann, die dann von einem Empfänger fälschlicherweise zur Positionsberechnung verwendet werden. Durch die Anwendung verschiedener algorithmischer Verfahren ist es jedoch mit modernen GPS-Empfängern möglich, trotz Anti-Spoofing eine präzise Code-Messung in nahezu P-Code-Qualität durchzuführen.¹⁹

3.3 Grundprinzip der GPS-Positionsbestimmung

Das GPS-System basiert auf dem Prinzip der Absolutpositionierung. Auf jedem Punkt der Erde ist eine Positionsbestimmung in x-, y- und z-Richtung jederzeit möglich. Die Position eines Empfängers lässt sich berechnen aus den Laufzeiten der verschiedenen codierten Signale der GPS-Satelliten. Aus den Laufzeiten lassen sich aufgrund der in den Signalen enthaltenen Informationen die Distanzen zwischen dem GPS-Empfänger und der für die Positionsbestimmung verwendeten Satelliten berechnen.

Für die Positionsbestimmung sind grundsätzlich die Signale von drei verschiedenen Satelliten notwendig. In Abb. 6 ist das Prinzip der Absolutpositionierung graphisch dargestellt.²⁰ Zu einem bestimmten (Mess-)Zeitpunkt kann die stellare Position der Satelliten durch die Ephemeriden ihres Orbits (Umlaufbahn) berechnet werden. Diese Position wird immer aktuell von den Satelliten in einem permanenten Signal in Richtung Erde gesendet. Abhängig von der Position des Empfängers haben die Satelliten-Signale unterschiedlich lange Laufzeiten hinter sich, wenn sie den Empfänger erreichen. Der Empfänger erzeugt ein Signal mit gleicher Kennung

¹⁸http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/compare/HTV1.htm

¹⁹vgl. (ROTHACHER UND ZEBHAUSER 2000), S. 1.5

²⁰vgl. (KUMM 1997)

und kann dieses dann mit den empfangenen Signalen synchronisieren. Hierbei ist es wichtig, dass die Satellitenuhren gleichgeschaltet sind, da im anderen Falle eine sogenannte Phasenverschiebung auftritt, welche das Messergebnis verfälscht. Bei der Betrachtung eines einzelnen Satelliten und eines GPS-Empfängers auf der Erdoberfläche lässt sich bei Bekanntheit der Entfernung zwischen Satellit und GPS-Empfänger eine kreisförmige Standlinie gleicher Empfangszeiten bestimmen (a). Auf einem Punkt dieser Standfläche befindet sich der Empfänger.

Wird ein weiterer Satellit hinzugezogen, ergibt sich für diesen ebenfalls eine Standlinie auf der Erdoberfläche (b). Die gemeinsamen Schnittpunkte der beiden Satellitensignal-Standlinien bestimmen nun die beiden möglichen Standorte des Empfängers.

Eine theoretisch endgültige Positionsbestimmung kann nun unter Einbeziehung eines dritten Satelliten und seiner Standlinie auf der Erdoberfläche durchgeführt werden. Ist eine absolute Zeitsynchronisation aller drei Satelliten und des Empfängers vorhanden, so schneiden sich die drei Standlinien in genau einem Punkt, welcher dann der Standort des Empfängers ist.

Ist dies nicht der Fall, so treten hieraus Genauigkeitsunterschiede bzgl. der Zeitmessung auf, welche durch das Dreieck in (c) schematisch dargestellt sind. Dieser Zeitunterschied wird als „Bias“ bezeichnet. Eine Korrektur des Bias kann durch Hinzunahme des Signals eines vierten Satelliten durchgeführt werden, mit dem eine Zeitsynchronisation ermöglicht wird.

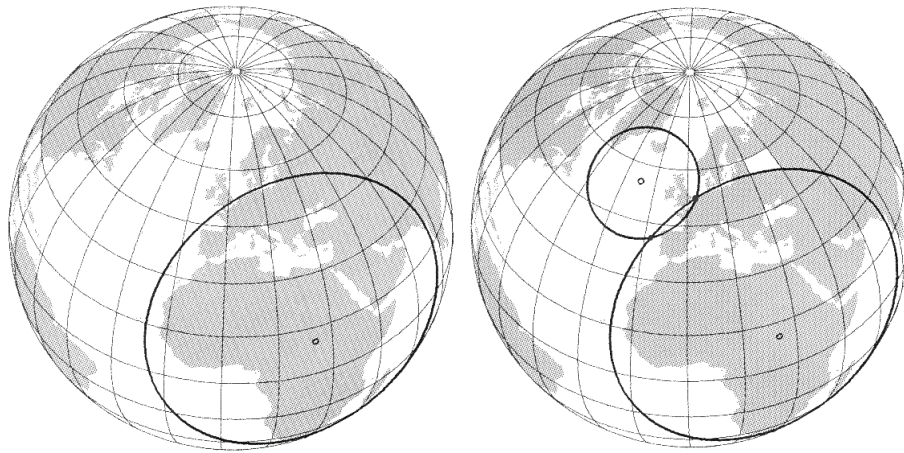
3.4 Fehlereinflüsse

Neben den in Kapitel 3.2 beschriebenen künstlichen Verfälschungen der Satellitensignale lassen sich weitere - systembedingte - Faktoren beschreiben, die die Ortungsgenauigkeit beeinflussen können.²¹

Satelliten- und Empfängeruhrfehler: Sowohl die Satelliten als auch die GPS-Empfänger sind mit hochpräzisen Uhren ausgestattet. Die in den Satelliten enthaltenen Atomuhren können jedoch im Laufe der Zeit mit einem Zeitfehler von bis zu 60 Nanosekunden - gleichbedeutend mit einem Messfehler von bis zu 18 Metern - versehen sein. Die Quarzuhren im GPS-Empfänger sind sogar noch ungenauer. Hier liegt der potenzielle Zeitfehler bei 20 Mikrosekunden, welches einen Messfehler von bis zu 6.000 km zur Folge haben kann.

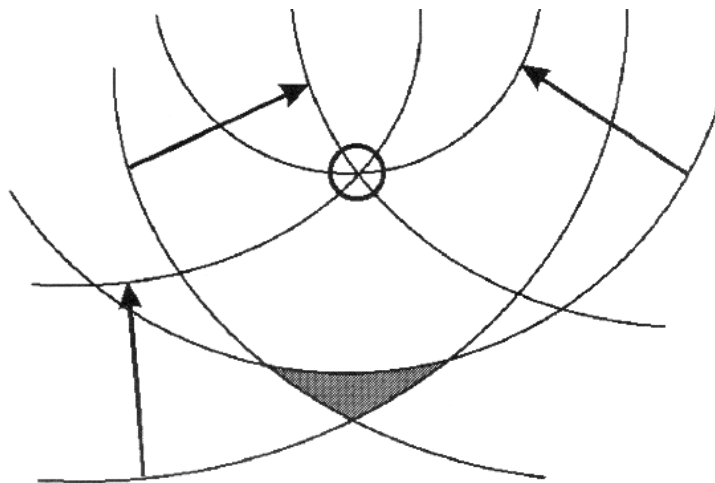
Satellitenbahnfehler: Zwischen der vorausgerechneten und der tatsächlichen Umlaufbahn der Satelliten gibt es geringfügige Abweichungen, den sogenannten

²¹vgl. (FUSSENEGGER 1997)



(a) ...einem Satelliten

(b) ...zwei Satelliten



(c) ...drei Satelliten

Abbildung 6: Möglicher Empfängerstandort bei Vorliegen von Entfernungsmessungen zu...

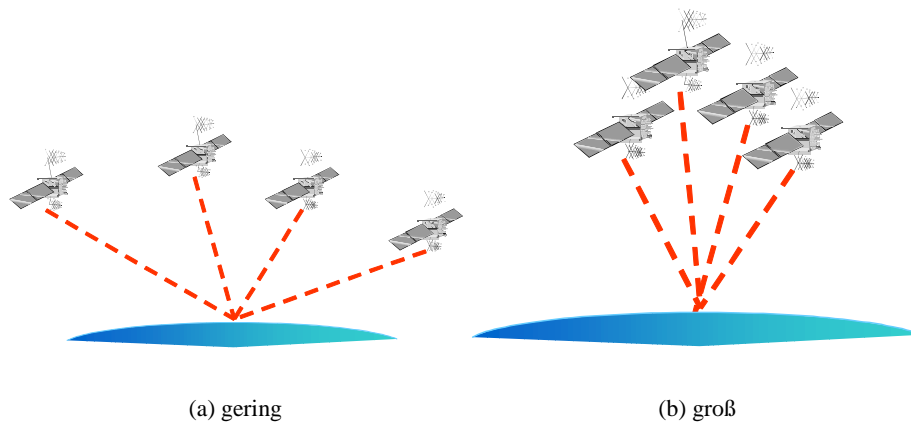


Abbildung 7: Satellitenbahnfehler

Ephemeridenfehler. Bedeutend sind hier die Positionen der Satelliten, welche die Güte des ermittelten Empfängerstandortes bestimmen. Je weiter die Winkel sind, in denen die Satelliten zueinander stehen, desto geringer ist der Satellitenbahnfehler. Abb. 7 verdeutlicht diesen Effekt grafisch.

Ionosphärische / Troposphärische Refraktion: Die vom Satelliten ausgesandten Signale durchqueren die Ionosphäre, wodurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale gehemmt wird. Die Ionenkonzentration in der Ionosphäre ist jedoch abhängig von der Tageszeit, der Jahreszeit, der Sonnenaktivität, der geographischen Breite des Empfängers und von der Höhe und Richtung des Satelliten. Die ionosphärische Refraktion kann einen Messfehler von bis zu zwölf Metern zur Folge haben. Wendet man jedoch das sogenannte Zweifrequenzverfahren an - Empfang der beiden Trägerwellen L_1 und L_2 -, kann der Messfehler beseitigt werden.

Auch die Troposphäre beeinflusst die Ausbreitung der Satellitensignale. Entscheidend sind hier die Wetterlage, der Luftdruck und die Temperatur in der troposphärischen Schicht. Der Messfehler beträgt hier bis zu 3 Metern. Durch empirisch gewonnene Korrekturmodelle kann dieser Messfehler jedoch auch minimiert werden.

In der Abb. 8 wird der Unterschied zwischen durchgeführter und nicht korrigierter Ionosphärenkorrektur verdeutlicht.²²

Mehrwegeeffekte: Dieser Effekt tritt auf, wenn das Signal auf seinem Weg zum Empfänger von reflektierenden Flächen umgeleitet wird. Solche Mehrfach-

²²http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/iono/

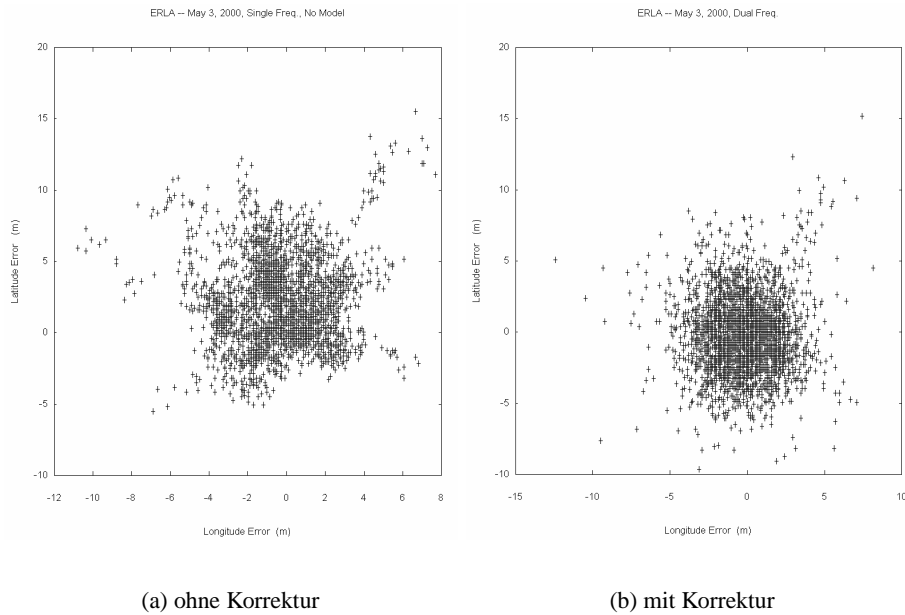


Abbildung 8: Ionosphärenkorrektur

reflexionen können die Messergebnisse um mehrere Zentimeter verfälschen. Reflektierende Flächen sind beispielsweise Hochhäuser und Gebirge. Aber auch elektrische Anlagen wie Hochspannungsleitungen und Oberleitungen können diesen Effekt bewirken. Als Lösung wird hier die Verwendung spezieller Antennen oder die Wahl eines alternativen Standortes empfohlen.

Abschattungen der Signale durch Horizontüberhöhung: Unter belaubten Bäumen oder unter überhängenden Felswänden kann der gleichzeitige Empfang von vier verschiedenen Satellitensignalen erschwert werden. Dann ist keine Positionsbestimmung mehr möglich. Auch hier sollte ein alternativer Standort gewählt werden.

3.5 Einsatzgebiete / Anwendungsbereiche

In den vergangenen Jahren haben sich für das Global Positioning System mannigfaltige Anwendungsgebiete entwickelt. Nahezu jede wirtschaftliche oder industrielle Branche, aber auch die Wissenschaft und Forschung sowie in einem hohen Maße der Privatanwender kann aus der Nutzung der GPS-Technologie profitieren. In Tabelle 2 werden einige Anwendungsgebiete aufgeführt.²³

²³vgl. auch (BARTH o.J.) und (HOFMANN-WELLENHOF 1997)

- Routenplaner
- Navigation
- Mobile Datenerfassung
- Militär
- Wissenschaft und Forschung
 - Archäologie
 - Geologie
 - Kartographie
 - Luft- und Raumfahrtwissenschaften
 - ...
- Wirtschaft und Industrie
 - Flächennutzung und -planung
 - Schädlingsbekämpfung
 - ...
- Touristik
 - Routenplanung und Punktselektion besonderer Bedeutung (Stadtführung, Denkmäler, ...)
 - Outdoor- und Trecking-Branche
 - ...

Tabelle 2: Anwendungsgebiete für das GPS

4 Differentielles Global Positioning System

Für viele der heutigen GPS-Anwendungen reicht die garantierte Positionsgenauigkeit von 10 bis 15 Metern nicht mehr aus. So benötigen zum Beispiel großmaßstäbliche Karten eine Genauigkeit von kleiner als drei Metern und im geodätischen Bereich sind Genauigkeiten im Millimeterbereich notwendig.

Um diese Anforderungen bedienen zu können, wurde das GPS-Ursprungssystem durch geringfügige Modifikationen zum sogenannten DGPS - Differentielles GPS - ausgebaut. Mit Hilfe von DGPS erreicht ein für diese Technologie ausgestatteter GPS-Empfänger eine Ortungsgenauigkeit, die unter 1 Meter liegen kann.²⁴

Die Grundidee beim DGPS liegt darin, die in Kapitel 3.4 beschriebenen Fehlereinflüsse zu umgehen.²⁵ Genutzt wird hierbei die Tatsache, dass zwei verschiedene örtlich relativ nahe Empfänger den selben Fehlereinflüssen unterliegen. Aus diesem Grund wird beim DGPS auf sogenannte Referenzsender zurückgegriffen, die betriebsseitig unabhängig von dem GPS im engeren Sinne sind, das heißt, dass

²⁴vgl. <http://www.hr-tews.de/GPS/dgps.htm>

²⁵vgl. (SCHUMANN o.J.a)

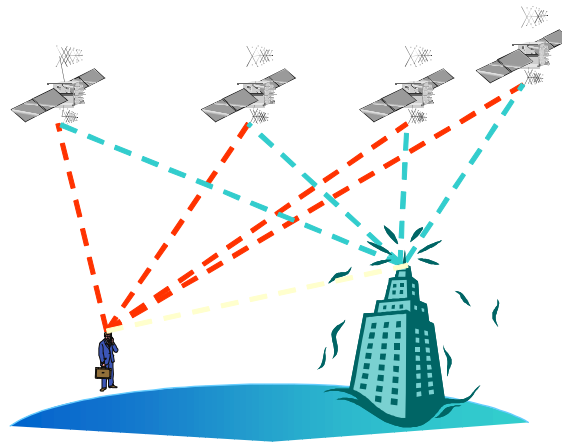


Abbildung 9: Differentielles GPS

die Referenzsender geodätisch fest eingemessen sind und damit ihre genaue Position kennen. Ein Referenzsender kann somit mit Hilfe der bekannten Position das empfangene GPS-Signal bewerten und ein Signal mit der notwendigen Differenz zur Korrektur der Geländedaten aussenden.

Ein in der Nähe befindlicher GPS-Empfänger kann nun das empfangene Satellitensignal mit der von der Referenzstation empfangenen Differenz kombinieren und erhält damit eine genauere Ortungsposition. Abb. 9 verdeutlicht dieses Vorgehen graphisch.

Die Übertragung der Differenzen vom Referenzsender zu den GPS-Empfängern kann auf verschiedene Art und Weise geschehen:

- ✦ Lang- und Mittelwellensender
- ✦ Seefunkfeuer
- ✦ Flugfunkfeuer
- ✦ Mobilfunknetze
- ✦ Satelliten-Subsysteme
- ✦ ...

5 GALILEO - das europäische GPS-Projekt

1999 wurde ein Vorschlag der Europäischen Union zur Entwicklung eines eigenständigen - von GPS unabhängigen - Satellitennavigationssystem mit dem Namen

Zeitraum	
	Vorschlag der EU zur Entwicklung eines Satellitennavigationssystems GALILEO
bis 2000	Definitionsphase für GALILEO
Mai 2000	Reservierung der Frequenzen für GALILEO auf der World Radio Conference (WRC)
26.03.2002	Bewilligung der Finanzierung der Entwicklungsphase von GALILEO
2002-2005	Entwicklung und Validierung in der Umlaufbahn - Abstimmung der Missionsziele - Entwicklung von 3-4 Satelliten sowie von Bodenkomponenten - Nachweis der Funktionst. des Systems in der Umlaufbahn - 1. Satellit im September 2005 in den Weltraum
2006-2007	Errichtung - Fertigstellung und Start der übrigen 27-28 Satelliten - Errichtung des gesamten Bodensegments
ab 2008	Kommerzieller Betrieb

Tabelle 3: Zeitkarte GALILEO

GALILEO eingereicht. GALILEO soll - im Gegensatz zu GPS - ausschließlich zivile Dienste erfüllen. Laut Aussage der Entwickler bietet das europäische System eine größere Genauigkeit gegenüber dem jetzigen GPS und eine höhere Zuverlässigkeit in allen geographischen Breiten. Darüber hinaus sollen die zivilen öffentlichen Dienstleistungen mit garantierter Kontinuität angeboten werden sowie Such- und Rettungsdienste beinhalten.²⁶

Tabelle 3 stellt den Zeitplan für die Errichtung des GALILEO-Systems dar.

GALILEO beruht auf einer Konstellation von 30 Satelliten, die sich auf drei verschiedenen Kreisbahnen - 10 Satelliten pro Bahn mit einem Satelliten als aktive Reserve - um die Erde bewegen. Die auf einer Höhe von 23.616 Kilometern und einer Bahnneigung von 56° zum Äquator positionierten Satelliten benötigen 14 Stunden pro Erdumdrehung und wiegen ca. 700 Kilogramm.

Für GALILEO sollen in Europa zwei Kontrollzentren installiert werden, denen die folgenden Aufgaben zuzuordnen sind:

- ◆ Konstellation der Satelliten
- ◆ Synchronisierung der Atomuhren

²⁶vgl. (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT o.J.), (WILSON 2002), (EUROPÄISCHE KOMMISSION - GENERALDIREKTION ENERGIE UND VERKEHR 2002)

- ◆ Steuerung der Integrität der Signalverbreitung
- ◆ Steuerung der Datenverarbeitung sämtlicher internen und externen Elemente

Diese Kontrollzentren werden zusammen mit 20 Sensorstationen und 15 Funkstationen (Uplink-Stationen) zum GALILEO-Kommunikationsnetz verknüpft.

6 Ausblick

Die satellitengestützte Navigation hat in den letzten Jahren und wird in der Zukunft immer mehr an Bedeutung und wirtschaftlichem Potenzial gewinnen. Immer mehr auch zivile Anwendungsbereiche nutzen die GPS-Technologie und mit dem zusätzlichen Angebot von GALILEO wird dieser Trend noch ausgebaut. Durch die fortschreitende Software- und Hardware-Entwicklung werden Navigations- und Ortungssysteme auf Basis der Satellitentechnik in einigen Jahren zum Alltag gehören.

Literatur

- BARTH, H. (o.J.): GPS, online verfügbar unter <http://www.muella.de/stammtische/heimstetten/gps.ppt>, Abruf am 28.07.2003.
- BAUER, M. (2003): Vermessung und Ortung mit Satelliten - GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 5., neu bearbeitete und erweiterte Aufl., Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.
- BRINKKOETTER-RUNDE, K. (1995): Untersuchung zur Nutzbarkeit der satellitengestützten Positionierung für die digitale Erfassung raumbezogener Daten im Gelände, Diplomarbeit, Institut für Geoinformatik Münster.
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (o.J.): Galileo - Europäisches Satellitennavigationssystem - Das Programm, online verfügbar unter http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/programme/index_%de.htm, Abruf am 28.07.2003.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION - GENERALDIREKTION ENERGIE UND VERKEHR (2002): Galileo - Der Countdown läuft, online verfügbar unter http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/doc/galileo_pres%skit_april2002_de.pdf, Abruf am 28.07.2003.
- FUSSENEGGER, K. (1997): Global Positioning System (GPS), online verfügbar unter http://www.cslg-pfabe.de/mobile/gps/gps_einfuehrung.htm, Abruf am 28.07.2003.
- HARTL, P., THIEL, K. (1984): Das NAVSTAR Global Positioning System, Schriften R 15, HSBw.
- HOFMANN-WELLENHOF, B. (1997): Global Positioning System: theory and practice, Wien: Springer.
- KUMM, W. (1997): GPS - Global Positioning System, Bielefeld: Delius Klasing Verlag.
- MANSFELD, W. (1998): Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme, Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- PETERSEN, L. (1990): GPS - Ein neues Satellitennavigationssystem, Bulletin 81, SEV/VSE, Bern.
- ROTHACHER, M., ZEBHAUSER, B. (2000): Einführung in GPS - Tutorial zum 3. SAPOS-Symposium 2000 in München, IAPG / FESG 8, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Fachgebiet Geodätische Raumverfahren, TU München.

- SCHÄFER, M. (2001): Einführung in das NAVSTAR GPS, online verfügbar unter <http://www.tu-bs.de/institute/geodae/studium/vertiefer/gps.pdf>, Abruf am 28.07.2003.
- SCHUMANN, T. (o.J.a): Das Grundprinzip des DGPS, online verfügbar unter http://www.toralf-schumann.de/html/dgps_prz.html, Abruf am 28.07.2003.
- SCHUMANN, T. (o.J.b): Das Grundprinzip des GPS, online verfügbar unter http://www.toralf-schumann.de/html/gps_prz.html, Abruf am 28.07.2003.
- WILSON, A. (2002): Galileo - Das europäische Programm für weltweite Navigationsdienste, online verfügbar unter http://web05:8088/comm/dgs/energy_transport/galileo/doc/galileo_brochur%e_september2002_de.pdf, Abruf am 28.07.2003.