



Jean-Marie Zogg-Weber

ICs für GPS-Empfänger

Integrierte Bausteine

vom HF-Teil bis zum Korrelator - eine Übersicht

Mit dem Global Positioning System (GPS, satellitengestütztes Verfahren zur Positionsbestimmung) kann überall auf der Erde jeder Standort mit einer Genauigkeit im Bereich von 100 m bis zu ca. 1 m und darunter (Differential-GPS) bestimmt werden. Obschon ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt, werden GPS-Empfänger zunehmend für den zivilen Bereich (Fahrzeugnavigation, Vermessung, Freizeitsport) verwendet. Im folgenden finden Sie neben den GPS-Grundlagen auch einen Überblick über die neuesten Entwicklungen bei GPS-ICs, die in Zukunft immer kompaktere

Empfänger-Designs erlauben.

Zur Zeit umkreisen 25 aktive Satelliten in einer Höhe von 20 180 km auf sechs verschiedenen Bahnen die Erde. Die Bahnebenen sind um 55° zur Äquator-Ebene geneigt, womit von jedem Punkt der Erde eine Funkverbindung zu mindestens vier Satelliten gewährleistet wird. Jeder Satellit umkreist die Erde in ca. 12 Stunden und trägt vier Atomuhren an Bord. Auf einer Frequenz von 1575,42 MHz (Band L1) sendet jeder Satellit seine genaue Bordzeit, seinen Status und die Bahnkoordinaten (Almanach) von sämtlichen Satelliten. Dank der Bahnkoordinaten ist zu jedem Zeitpunkt von jedem Satelliten die genaue Position bekannt.

Das gesamte System steht unter der Obhut des amerikanischen Verteidigungsministeriums und bietet für militärische Anwender weitergehende Möglichkeiten, auf welche hier nicht eingegangen wird. Der erste Satellit wurde übrigens am 22. Februar 1978 in seine Umlaufbahn gebracht.

GPS: viele Möglichkeiten auch im Freizeitbereich

Mit einem GPS-Empfänger können die geografische Länge, Breite und Höhe sowie die genaue Weltzeit (Universal Time Coordinated, UTC) ermittelt werden. Von diesen Größen werden Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung eines Beobachters abgeleitet. Das GPS wird heutzutage vor allem in der Navigation (Luft, Land und See), in der Fahrzeugführung [1], für den Freizeitsport, die Vermessung und für die exakte Zeitbestimmung eingesetzt.

Die Kosten für GPS-Empfänger reichen von einigen 10 000 DM für Vermessungsgeräte mit einer Präzision von einigen Millimetern bis zu ca. 400 DM für Allzweckempfänger mit einer Berechnungs-Genauigkeit von ca. 100 m.

Prinzip der Positionsbestimmung

Hat ein Beobachter Funkkontakt zu einem Satelliten, kann er durch Vergleichen der Empfängerzeit mit der Satellitenzeit die Signallaufzeit messen. Allerdings ist diese Messung fehlerbehaftet, da die Empfängeruhr nicht die gleiche Präzision wie die Atomuhr des Satelliten aufweist. Dieser Uhrenfehler muß in der Berechnung ebenfalls berücksichtigt werden. Um die ganze Berechnung in ein lineares Gleichungssystem zu überführen, wird zuerst eine Position angenommen. Die Entfernung zu den Satelliten kann aus der Laufzeit und der Lichtgeschwindigkeit ermittelt werden. Für einen Beobachter ergeben sich vier unbekannte Größen: tatsächliche Position (drei Größen: X, Y, Z) und der Uhrenfehler (δ) [2]. Durch Funkkontakt zu vier verschiedenen Satelliten kann der Beobachter vier unabhängige Messungen durchführen und somit die vier unbekanntes Größen berechnen (siehe *Bild 1* und *Kasten* «Positionsbestimmung mit GPS»).

Die Atomuhren des Satelliten weisen eine Stabilität von besser als $2 \cdot 10^{-13}$ auf [3]. Aus der Resonanzfrequenz einer der

vier Atomuhren wird im Satelliten die Grundfrequenz von 10,23 MHz abgeleitet, aus dieser Grundfrequenz wiederum werden die Trägerfrequenz, die Datenfrequenz und der Takt für die Erzeugung einer Pseudozufallsfolge (Pseudorandom-noise, PRN), der C/A-Code (Coarse/Acquisition-Code), erzeugt. Da alle 25 Satelliten auf der gleichen Frequenz von 1575,42 MHz senden, wird das CDMA-Verfahren (Code-Division Multiple-Access) angewendet. Die Daten werden nach einer DSSS-Modulation (Direct Sequence-Spread Spectrum) gesendet [4]. Der C/A-Code-Generator weist eine Frequenz von 1,023 MHz und eine Periode von 1023 Schritten (Chips) auf, was einer Zeit von 1 ms entspricht. Der verwendete C/A-Code, welcher einer Gold-Folge entspricht und somit günstige Korrelationseigenschaften aufweist, wird durch rückgekoppelte Schieberegister erzeugt. Die gesendeten Daten (z.B. Zeit, Bahndaten und Status) kommen mit einer Taktfrequenz von 50 Hz; diese mit dem C/A-Code modulierten Daten modulieren im Bi-Phase-Shift-Keying-Modulator (BPSK-Modulator) nochmals den Träger (*Bild 2*).

Noch genauer: Differential-GPS (DGPS)

Die Grundgenauigkeit der Positionsbestimmung von zivilen Empfängern beträgt ca. 100 m in horizontaler und ca. 150 m in vertikaler Richtung. Fehlerursachen sind Ungenauigkeiten der Satellitenbahnen und der Zeitmessung, Verzögerung der Signale durch Ionosphäre und Troposphäre, das Empfängergeräuschen und hauptsächlich eine durch den Betreiber, das US-Verteidigungsministerium, eingeführte künstliche Verschlechterung (Selective Availability, S/A) von ca. 60 m [3]. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung kann allerdings durch eine Differentialmessung wesentlich gesteigert werden. Dazu wird ein Referenzempfänger verwendet. Dieser befindet sich auf einer genau vermessenen Position auf der Erde und empfängt die Satellitensignale. Durch Vergleich seiner aus den Satellitendaten berechneten und der präzise terrestrisch vermessenen Empfängerposition kann der Referenzempfänger die Differenz zwischen gemessener und tatsächlicher Entfernung zu allen sichtbaren Satelliten ermitteln. Diese Soll-Ist-Abweichungen gelten mit hinreichender Genauigkeit ebenfalls für alle sich in einem Umkreis von bis zu 200 km befindlichen Empfänger. Der Referenzempfänger sendet diese Abweichungen (Korrekturwerte) nach einem standardisierten Format RTCM-104 (Radio Technical Commission for Maritime) über eine geeignete Strecke (z.B. Funk, LW, GSM, FM-RDS) aus. Alle Empfänger, welche über einen RTCM-Eingang verfügen, können ihre Position bis auf eine Genauigkeit von ca. 1 m bestimmen. Für noch höhere Genauigkeiten (bis in den mm-Bereich) werden zusätzlich zum Differential-signal Phasenmessungen des Trägersignals und längere Beobachtungszeiten benötigt.

Grundprinzip von GPS-Empfängern

Die Schaltung eines GPS-Empfängers (*Bild 3*) läßt sich grundsätzlich in HF-Stufe, GPS-Korrelator/Signalverarbeitung und Bedienerchnittstelle/Stromversorgung unterteilen.

Die HF-Stufe

Um die unter dem thermischen Rauschen liegenden Antennensignale (ca. -130 dBm) zu verstärken, sollte diese Stufe nach dem Antenneneingang einen rauscharmen Verstärker (Low Noise Amplifier, LNA) enthalten. Die Eingangsfrequenz von 1575,42 MHz wird über eine bis drei Stufen auf eine im Bereich von 2 bis 50 MHz liegende Zwischenfrequenz heruntergemischt. Das Zwischenfrequenzsignal wird in der Regel mit einer Breite von 2 Bit (Vorzeichen und Amplitude) mit einem A/D-Umsetzer digitalisiert. Um eine Übersteuerung der Verstärker zu vermeiden, wird die Verstärkung von einzelnen Stufen geregelt (Automatic Gain Control, AGC). Vom Referenz-Oszillator werden alle Synchronisationssignale und die Frequenzen für die Mischstufen abgeleitet.

GPS-Korrelator und Signalverarbeitung mittels DSP

Um die Satellitendaten zu rekonstruieren, wird das digitalisierte Signal mit dem gleichen C/A-Code wie im entsprechenden Satelliten korreliert. Nur wenn der C/A-Code des Empfängers mit dem C/A-Code des Satelliten übereinstimmt, erscheint das Datensignal decodiert. Alle anderen Datensignale bleiben undecodiert [4]. Damit eine vollständige Decodierung möglich ist, müssen Phasenlage und Verlauf des C/A-Codes übereinstimmen. Die Phasenlage des C/A-Codes wird im Empfänger variiert, bis die Autokorrelation ein Maximum ergibt. Die dabei notwendige Zeitverschiebung wird verwendet, um die Laufzeit vom Satelliten zum Empfänger zu bestimmen. Wird dieser Abstimmungsvorgang für vier oder mehr verschiedene Satelliten durchgeführt, sind genügend Dateninformationen vorhanden, um die Position und die Weltzeit zu berechnen. Sind mehr als vier Satellitensignale decodierbar (bis zu zwölf Satelliten können sichtbar sein) wird ein guter Empfänger diejenigen Satelliten auswählen, welche aufgrund ihrer Geometrie zur optimalen Positionsbestimmung führen. Die Korrelation mit den verschiedenen Satellitensignalen kann entweder sequentiell oder parallel erfolgen (von fünf bis zu zwölf Satelliten). Je nach Ausführung verfügen die Bausteine über einen Eingang für Differentialsignale (DGPS) im RTCM-Format, um die entsprechenden Korrekturen durchzuführen. Das Ausgangssignal wird in der Regel nach dem normierten NMEA-0183-Protokoll (National Marine Electronics Association) ausgegeben. Ein Baustein bietet die Möglichkeit, intern die Position in verschiedenen geläufigen Koordinatensystemen zu berechnen.

Bedienerchnittstelle, Tastatur, Anzeige und Stromversorgung

Die berechnete Position (Länge, Breite und Höhe) muß dem Benutzer präsentiert werden. Dies kann entweder mit einer 7-Segment-Anzeige oder auf einem Bildschirm in einer aufprojizierten Karte erfolgen. Die ermittelten Positionen können gespeichert werden, womit sich ganze Routen aufzeichnen lassen. Der Anwender kann über eine Tastatur wählen, welches Koordinatensystem er verwenden will und welche Parameter (z.B. Anzahl der sichtbaren Satelliten) angezeigt werden sollen. Diese Stufen werden hier nicht weiter erläutert.

Details zu den HF-Stufen für GPS-Empfänger

Die HF-Stufe muß in der Lage sein, Frequenzen von 1575,42 MHz rauscharm zu verarbeiten. Dabei wird z.T. die BiCMOS- oder Gallium-Arsenid-Technologie verwendet. Die einzelnen Schaltungen unterscheiden sich im wesentlichen durch die Gehäuseform, den Stromverbrauch und die technischen Eigenschaften. *Tabelle 1* gibt eine Übersicht über die gebräuchlichsten Hochfrequenz-ICs.

GPS-Korrelator und Signalverarbeitung per DSP

Die Schaltungen unterscheiden sich in der Anzahl der verarbeiteten Korrelations-Kanäle, in der Eigenschaft, ob sie einen normierten DGPS-Eingang aufweisen, und im benötigten Aufwand für die Präsentation der Daten in verschiedenen Koordinaten-Systemen. Die Hersteller bieten Evaluationsboards bzw. OEM-Boards an, um die HF-Stufe mit der Korrelator-Stufe problemlos zu testen bzw. in einem eigenen Gerät einzubauen. Auf den benötigten Aufwand, um die gesuchten Größen wie Position und Zeit zu erhalten, wird hier nicht weiter eingegangen. *Tabelle 2* gibt auch hierzu eine Übersicht.

Zukunftsansichten für den GPS-Anwender

Seitdem die amerikanische Regierung am 29. März 1996 offiziell verkündet hat, sie werde den Zugang für zivile GPS-Anwender auf längere Zeit weiter aufrechterhalten, keine Gebühren für diesen Dienst verlangen und innerhalb von vier bis zehn Jahren die künstliche Verschlechterung S/A abschalten, ist eine weitere Zunahme der Anwendung von GPS-Geräten zu erwarten [8]. Daß es die amerikanische Regierung mit ihrem Versprechen ernst meint, beweist sie mit dem Start einer neuen Satellitengeneration ab Ende 1996. Diese Block-IIR-Satelliten können von der Erde aus umprogrammiert werden und ihre Umlaufbahnen während 180 Tagen ohne Funkkontakt zu Kontrollstationen einhalten.

Unabhängige Experten erwarten für das Jahr 2000 ein Marktpotential von ca. 10 Mrd. \$, was einer Steigerung um das Achtfache seit 1995 entspricht. Positiv wird sich die Tatsache auswirken, daß immer mehr Luftämter den Einsatz von GPS-Empfängern in der Luftfahrt erlauben. Der Umsatz von

militärischen Anwendungen wird auf unter 5% des gesamten Marktpotentials sinken. Markttrenner werden vor allem Anwendungen der terrestrischen Fahrzeugnavigation sein. Die prognostizierte Marktzunahme wird zur Folge haben, daß weitere Produzenten von GPS-Komponenten sich weltweit etablieren werden.

Integrierte Schaltungen für GPS-Empfänger werden also mit Sicherheit weiterentwickelt: Um batteriebetriebenen Geräten eine längere Betriebsdauer zu bieten, wird der Stromverbrauch der einzelnen Stufen sinken. Dies ist kein leichtes Unterfangen, müssen doch die Schaltungen Frequenzen im GHz-Bereich verarbeiten. Es ist anzunehmen, daß die derzeitigen drei Hauptstufen in nächster Zukunft zu einer Einheit, inklusive OFW-ZF-Filter (Oberflächenwellen-ZF-Filter), vereint werden. Dabei wird sich der externe Aufwand an Datenverarbeitung immer mehr zugunsten von On-chip-Lösungen verschieben. Daß vollständige GPS-Empfänger auf PCMCIA-Karten integriert werden können, hat die Industrie bereits bewiesen. Es ist eine Anpassung an den neuen PC-Card-Standard zu erwarten.

Durch die Verknüpfung von GPS mit dem Glonass-System, entwickelt und betrieben von den GUS-Staaten mit ähnlichen Eigenschaften wie das amerikanische GPS, kann eine erhöhte Integrität der Messung, wichtig vor allem in der Luftfahrt, gewährleistet werden. Zur Zeit arbeitet eine Kommission an

einem Projekt, welches ein von der europäischen Gemeinschaft getragenes Satelliten-Navigations-System zum Ergebnis haben soll.

Immer mehr private und staatliche Betreiber bieten mittlerweile die Dienste von Referenzstationen für den DGPS-Empfang an. Derzeit läßt allerdings noch die weltweite Flächendeckung und die uneinheitliche Übertragungsart zu wünschen übrig. Im Laufe der weiteren Verbreitung von GPS wird bestimmt auch diese Schwachstelle ausgemerzt werden. Sicher ist auf jeden Fall: Noch vor der Jahrtausendwende werden Mobil-Telefone und Armbanduhren [8] mit einer Positionsgenauigkeit von unter einem Meter erhältlich sein. *ha*

Literatur

- [1] Hascher, W.: Neues auf dem GPS-Markt. *Elektronik* 1996, H. 7, S. 50 bis 52.
- [2] Schrödter, F.: GPS-Satelliten-Navigation. Franzis-Verlag, Feldkirchen.
- [3] Parkinson, B.; Spilker, J.: Global Positioning System, Volume 1. AIAA-Inc.
- [4] Lemme, H.: Schnelles Spread-Spectrum-Modem auf einem Chip. *Elektronik* 1996, H. 15, S. 38 bis 45.
- [5] Produktspezifikation der einzelnen Hersteller.
- [6] Informationen aus dem World Wide Web (WWW).
- [7] IEEE International Solid-State Circuits Conference, Feb. 8 - 10, 1996, Paper 17.2.
- [8] Hascher, W.: GPS: bald überall. *Elektronik* 1997, H. 1, S. 26 bis 29.

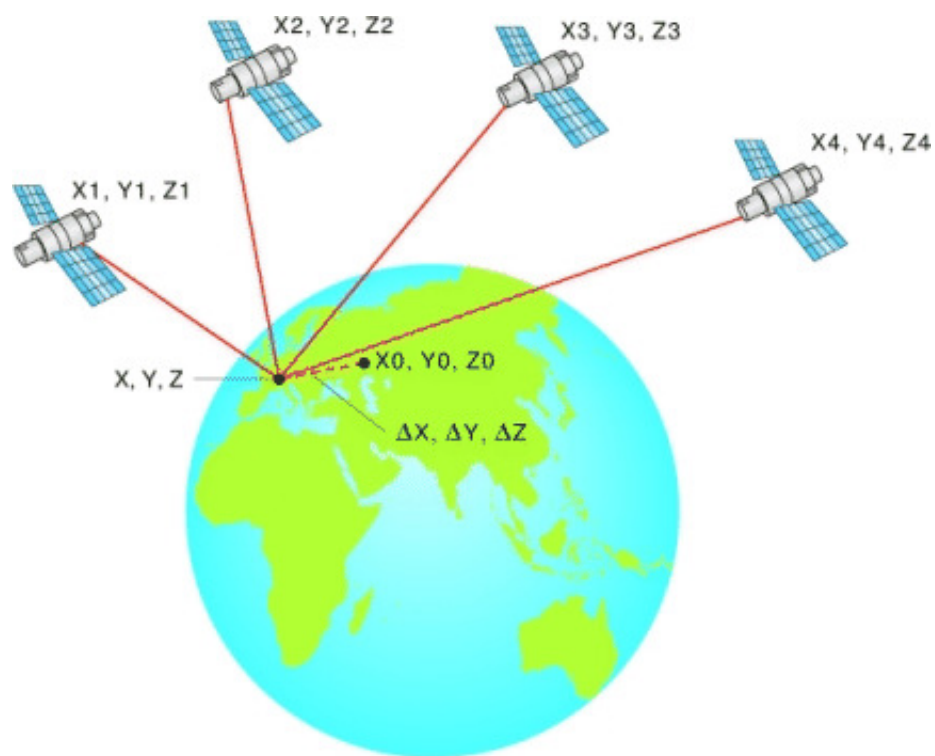


Bild 1. Zur Bestimmung der Position werden im Normalfall vier Satelliten herangezogen.

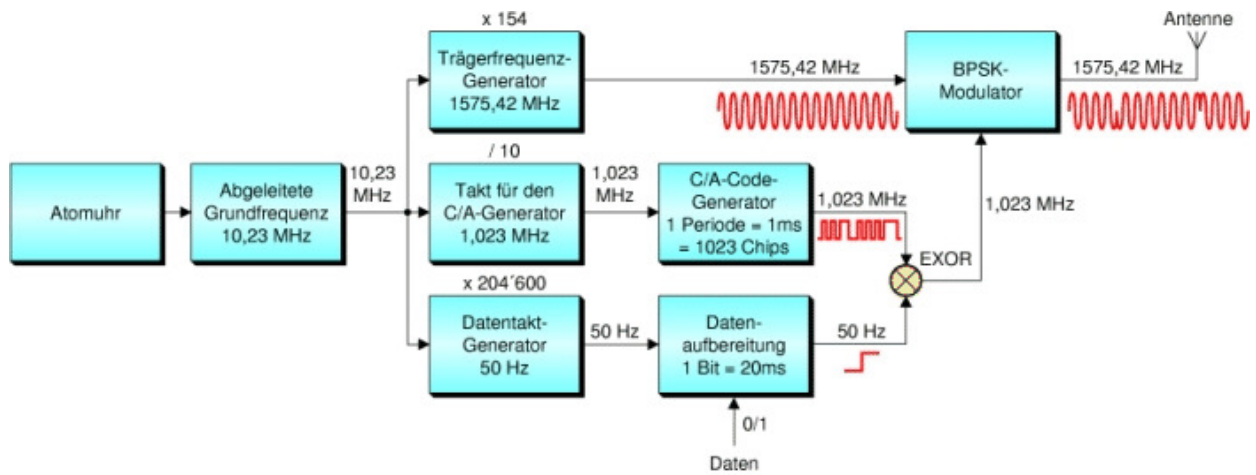


Bild 2. Vereinfachtes Blockschema eines GPS-Satelliten.

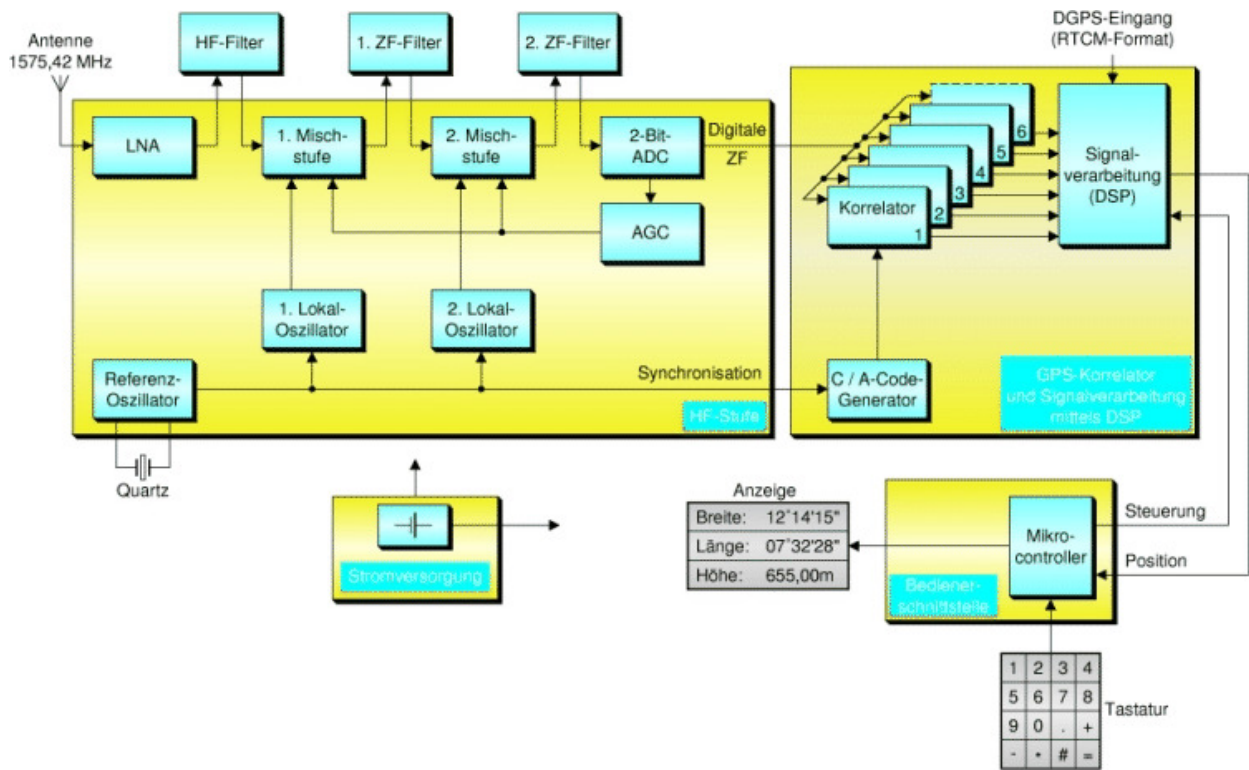


Bild 3. Vereinfachtes Blockschema eines GPS-Empfängers.

Positionsberechnung mit GPS

Die Entfernung S^j von einem Beobachter zum Satellit Nr. j läßt sich folgendermaßen bestimmen (siehe hierzu auch Bild 1):

$$S^j = \sqrt{(X - X^j)^2 + (Y - Y^j)^2 + (Z - Z^j)^2} = c \cdot \Delta t^j + c \cdot \delta$$

S^j :	Entfernung des Beobachters zum Satelliten Nr. j
X, Y, Z :	tatsächliche Position des Beobachters
X^j, Y^j, Z^j :	Position des Satelliten Nr. j
c :	Lichtgeschwindigkeit
Δt^j :	fehlerbehaftete, gemessene Laufzeit des Signals vom Satelliten j zum Beobachter
δ :	Uhrenfehler des Beobachters

Damit obige Gleichung mit einem linearen Gleichungssystem gelöst werden kann, bedarf es vier verschiedener Gleichungen, d.h. vier Messungen zu vier verschiedenen Satelliten, und der Annahme einer geschätzten Position. Dann läßt sich das folgende lineare Gleichungssystem aufstellen:

$$\begin{bmatrix} \left(-\frac{X^1 - X_0}{\rho_0^1} \right) \left(-\frac{Y^1 - Y_0}{\rho_0^1} \right) \left(-\frac{Z^1 - Z_0}{\rho_0^1} \right) (-c) \\ \left(-\frac{X^2 - X_0}{\rho_0^2} \right) \left(-\frac{Y^2 - Y_0}{\rho_0^2} \right) \left(-\frac{Z^2 - Z_0}{\rho_0^2} \right) (-c) \\ \left(-\frac{X^3 - X_0}{\rho_0^3} \right) \left(-\frac{Y^3 - Y_0}{\rho_0^3} \right) \left(-\frac{Z^3 - Z_0}{\rho_0^3} \right) (-c) \\ \left(-\frac{X^4 - X_0}{\rho_0^4} \right) \left(-\frac{Y^4 - Y_0}{\rho_0^4} \right) \left(-\frac{Z^4 - Z_0}{\rho_0^4} \right) (-c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c \cdot \Delta t^1 - \rho_0^1) \\ (c \cdot \Delta t^2 - \rho_0^2) \\ (c \cdot \Delta t^3 - \rho_0^3) \\ (c \cdot \Delta t^4 - \rho_0^4) \end{bmatrix}$$

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$:	Abweichung der tatsächlichen Position des Beobachters zur angenommenen Position
X^j, Y^j, Z^j ($j = 1 \dots 4$):	Position des Satelliten Nr. j
Δt^j ($j = 1 \dots 4$):	fehlerbehaftete gemessene Laufzeit vom Satelliten Nr. j zum Beobachter
X_0, Y_0, Z_0 :	angenommene, geschätzte Position des Beobachters
ρ_0^j ($j = 1 \dots 4$):	berechnete Distanz von der angenommenen Position zum Satelliten Nr. j

Sind die Zwischengrößen $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ und δ berechnet, können die tatsächliche Position des Beobachters (X, Y, Z) und die wahre Zeit (UTC) bestimmt werden:

$$X = X_0 + \Delta X, Y = Y_0 + \Delta Y, Z = Z_0 + \Delta Z$$

$$UTC = t_{\text{Beobachter}} + \delta - T$$

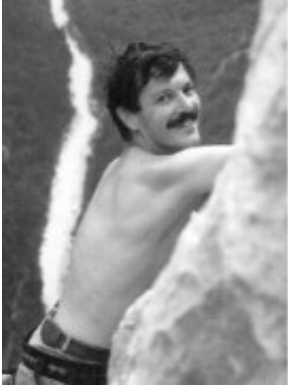
$t_{\text{Beobachter}}$: gemessene Zeit beim Beobachter
T: bekannte Differenz zwischen Satelliten-Bordzeit und UTC (in 1996 ca. 11 s)

Hersteller	Typ	Anzahl LNA	Anzahl ZF-Stufen	AGC	Referenz- Oszillator	ADC
Asulab SA [7]	GPS IC	1	3	X	X	X
California Eastern Laboratories [6]	UPB1004GS	-	2	X	X	X
GEC Plessey [5]	GP 2010 oder GP 2015	-	2	X	X	X
Motorola [5]	SC64041	1	2	X	X	X
Philips Semiconductors [5]	SA1570	2	2	X	X	X
Rockwell Semiconductor Systems [5]	Gemini und Pisces	1	2	X	X	X
SiRF Technology [5]	GRF1	1	1	X	X	X
Sony [5]	CXA1951Q	-	2	X	X	X

Tabelle 1. HF-Stufen für GPS-Empfänger

Hersteller	Typ	Korrelations-Kanäle	Parallel/Seriell	DGPS-Eingang	Koordinaten-Umrechnung	Evaluations- bzw. OEM-Board
GEC Plessey [5]	GP2021	12	P	-	extern	GPS Builder-2.1
Philips Semiconductors [5]	SC1575	8	P	X	extern	Exact
Rockwell Semiconductor Systems [5]	Scorpio	12	P	X	durch On-chip-Prozessor	Jupiter
SiRF Technology [5]	GSP1	12	P	-	extern	SiRFstar

Tabelle 2. GPS-Signalverarbeitungs-ICs



Dipl.-Ing. Jean-Marie Zogg-Weber ist als Dozent für Elektrotechnik und Elektronik an der Abteilung «Telecom» der Ingenieurschule HTL Chur (Schweiz) tätig, wo er sich intensiv mit den Grundlagen und Anwendungen von GPS beschäftigt.