

## Gewusst wo

**Das Global Positioning System ermöglicht weltweit eine einfache und zuverlässige Navigation auf Straßen, zu Wasser und in der Luft. Die genauesten Angaben bleiben dabei nicht mehr nur den Militärs vorbehalten.**

Eine klassische Situation: Man ist mit dem Auto unterwegs, der Beifahrer vertieft sich in den Straßenatlas und schreckt hin und wieder auf, um seine plötzlichen Eingebun-



**Auch Reinhold Messner vertraut bei seinen Expeditionen auf GPS. (Quelle: GPS GmbH Gräfelfing)**

gen wie „da vorne, glaube ich, rechts“, „oder sind wir gar nicht an dieser Kreuzung?“ usw. zum Besten zu geben. Wer dem entgegen will, leistet sich mittlerweile ein modernes Navigationssystem. Was noch vor einigen Jahre eher belächelt wurde, gehört heute zur Grundausstattung von gehobenen Mittelklassewagen (Abb. 1). Solche Geräte nutzen das Global Positioning System (GPS), das – 1973 vom amerikanischen Verteidigungsministerium initiiert – inzwischen zu einem verlässlichen Instrument für alle möglichen Navigationsaufgaben, also auch auf Schiffen, in Flugzeugen, in der Landvermessung etc., herangereift ist.

### Ein Gleichungssystem im Weltraum

GPS ermöglicht es seinen Benutzern, mithilfe von Satelliten ihre genaue Position festzustellen, ausgedrückt beispielsweise in Längengrad, Breitengrad und Höhe. Die Grundlage dieser Ortsbestimmung liefern Entfernungsbestimmungen zu den Satelliten. Um zu verstehen, wieviele Satelliten man benötigt, stellt man sich die Szenerie zu einem bestimmten Zeitpunkt quasi „eingefroren“ vor. Jeder Satellit hat dann eine Raumkoordinate, bezogen auf den Erdmittelpunkt, die sich aus dem empfangenen Signal

berechnen lässt. Besäße der Empfänger, definiert durch seine (noch unbekannt) Koordinaten auf der Erdoberfläche, eine exakt auf die GPS-Zeit abgestimmte Uhr, wäre er in der Lage, aus der Laufzeit des Satellitensignals dessen Abstand zu ihm auszurechnen. Demnach würden drei Satelliten ausreichen: Die Distanzen zwischen den Satelliten und dem Empfänger definieren drei Kugeloberflächen jeweils um den Satelliten, in deren gemeinsamem Schnittpunkt sich der Empfänger befindet. Mathematisch ausgedrückt: Die drei Abstände zu den Satelliten definieren drei Gleichungen zur Bestimmung von drei Unbekannten, nämlich den Koordinaten des Empfängers.

Nun hat aber beispielsweise ein Wanderer wenig Lust, eine Atomuhr mit sich herumzuschleppen, um jederzeit präzise über die GPS-Zeit Bescheid zu wissen; vielmehr möchte er ein leichtes Gerät, in das eine handelsübliche Quarzuhr eingebaut ist. Diese Uhr misst nur ungefähr die GPS-Zeit, woraus folgt, dass die errechnete Entfernung Empfänger-Satellit (der so genannte Pseudoabstand) von der wahren Distanz etwas abweicht.

Eine vierte Unbekannte, die Differenz zwischen dem tatsächlichen Abstand und dem Pseudoabstand bzw. der Unterschied in den Uhren, gesellt sich also hinzu. Dafür wird eine vierte Gleichung und damit ein vierter Satellit gebraucht (Abb. 2). Geometrisch drückt sich die neue Lösung unseres Gleichungssystems durch eine Kugeloberfläche aus, die tangential zu den vier durch die Pseudoabstände definierten Sphären liegt und deren Radius der Abstands Korrektur entspricht.

Obwohl die GPS-Satelliten in erster Linie dazu gedacht sind, den Empfänger mit einer genauen Ortsbestimmung zu beglücken, lässt sich mit ihrer Hilfe auch dessen Geschwindigkeit bestimmen. Dazu nutzt man den Doppler-Effekt<sup>1)</sup>, der auch für Radiosignale gilt und aufgrund der relativen Bewegung zwischen Satellit und Empfänger eine Doppler-Verschiebung des Signals induziert, die proportional zu dieser Relativgeschwindigkeit ist (genauer: zu ihrer Radialkomponente). Da man die Geschwindigkeiten der Satelliten kennt, kann man aus der Doppler-Verschiebung die Geschwindigkeit des Empfängers ableiten. Auch hierzu werden vier Satelliten benötigt, denn zusätzlich

zu den drei unbekannt) Geschwindigkeitskomponenten muss ein unbekannter Frequenzfehler in Kauf genommen werden.

### Überall und jederzeit

Um an jedem Punkt der Erde zu jeder Zeit eine Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung per GPS durchführen zu können, muss der Empfänger also permanent zu mindestens vier Satelliten Verbindung haben. Während der Planungszeit des GPS wurden verschiedene Szenarien durchgespielt, bis sich ein System mit 24 gleichmäßig um die Erde verteilten Satelliten als optimale (sprich: billigste) Lösung herausstellte. Jeweils ein Satelliten-Quartett umkreist in einer von sechs Umlaufbahnen in etwa 20200 km Höhe alle 12 Stunden einmal den Globus, wobei jede Umlaufbahn um 55 Grad gegen die Äquatorebene geneigt ist. Bei diesen Umkreisungen ergeben sich immer wieder Perioden, in denen mehr als vier Satelliten für den Empfänger elektronisch sichtbar sind; sie werden zu Spezialmessungen genutzt, wenn man es ganz genau wissen will.

Die ersten GPS-Satelliten wurden 1978 in ihre Umlaufbahn gebracht; von diesen Prototypen ist jedoch heute keiner mehr im Ein-

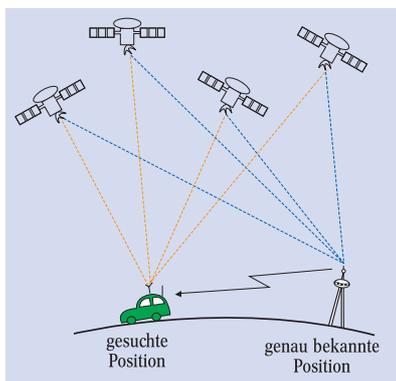


**Abb. 1:** Mittlerweile kann man sich per GPS auch durch den Stadtverkehr lotsen lassen. (Quelle: GPS GmbH Gräfelfing)

satz. Die aktuellen Satellitengenerationen II, IIA und IIR unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch den Zeitraum, in dem sie unabhängig operieren können. Jeder dieser Satelliten hat jeweils zwei Cäsium- und zwei Rubidium-Atomuhren mit einer Frequenzstabilität von  $10^{-13}$  an Bord. Die Kontrolle der Satelliten auf der Erde übernehmen insgesamt neun Bodenstationen, die bei Bedarf die Satelliten mit neuen Informationen über ihre genaue Position etc. versorgen.

1) vgl. Physik Journal, Mai 2003, S. 64

Jeder Satellit sendet auf zwei Frequenzen L1 (1575,42 MHz) und L2 (1227,60 MHz), die aus der Grundfrequenz 10,23 MHz der Atomuhr abgeleitet werden, mehrere für ihn charakteristische Signale zur Erde, die dem Trägersignal als Folge von Nullen und Einsen aufmoduliert werden. Die L1-Frequenz trägt sowohl den unverschlüsselten C/A-Code („Coarse/Acquisition“, auf deutsch etwa „Groberfassung“) für die zivile Nutzung als auch den verschlüsselten P/Y-Code („Precision/encrypted“) sowie eine Navigationsnachricht, die L2-Frequenz trägt nur den P/Y-Code. Die Navigationsnachricht überträgt als 50-



**Abb. 2:** Prinzipiell benötigt man vier Satelliten für die GPS-Navigation: drei für die Ortsbestimmung und ein vierter, um die eigene Zeit mit der GPS-Zeit abzugleichen.

Hz-Signal wichtige Daten wie die Satellitenbahnen, Korrekturen, den Zustand des Satelliten, das Datum, die Identifikationsnummer usw. Sie ist 1500 bit lang, die Übertragung benötigt also 30 Sekunden. Normalerweise speichert ein GPS-Empfänger die Daten „seiner“ Satelliten und hat sie nach dem Einschalten sofort zur Verfügung, was eine Positionsbestimmung innerhalb einiger Sekunden ermöglicht.

Nur nach langem Ausschalten müssen sämtliche Daten erneuert werden, zunächst der so genannte Almanach, der die notwendigen Bahnparameter aller Satelliten enthält. Das dauert 12,5 Minuten.

### Erlaubte Genauigkeit

Ursprünglich gingen die amerikanischen Militärs davon aus, dass der C/A-Code höchstens auf 400 Meter genau ist. Überraschenderweise lag der Navigationsfehler in der Praxis jedoch deutlich darunter, sodass das Verteidigungsministerium beschloss, die Genauigkeit für zivile Nutzer künstlich zu ver-

schlechtern, z. B. durch Schwankungen der Satelliten-Zeit. Diese Politik der „selective availability“ (SA), die die Horizontalgenauigkeit eines GPS-Empfängers auf 100 Meter einschränkte, wurde am 2. Mai 2000 nach Intervention des Weißen Hauses wieder aufgehoben, nicht zuletzt deshalb, weil inzwischen andere Möglichkeiten entwickelt wurden, in Krisenzeiten und -gebieten das GPS unzugänglich zu machen.

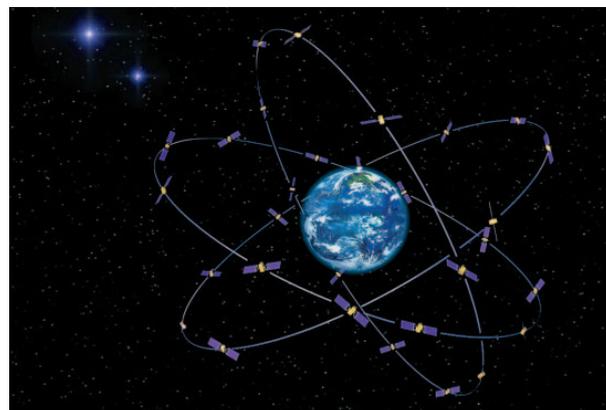
Der C/A-Code besitzt eine Taktfrequenz von 1,023 MHz und ist 1023 pseudozufällig angeordnete „chips“ lang (ein „chip“ ist im Wesentlichen ein „bit“, nur ohne Information), sieht also wie eine zufällige Folge von Nullen und Einsen aus, die sich jede Millisekunde wiederholt, ist aber ein eindeutig für jeden Satelliten festgelegtes Signal, das auch dem Empfänger bekannt ist. Dieser vergleicht mit einem geschickten Algorithmus (Kreuzkorrelation) den gespeicherten mit dem empfangenen C/A-Code, ermittelt ihre zeitliche Verschiebung und berechnet daraus die Entfernung zum Satelliten. Da ein chip 300 Meter „lang“ ist und ein moderner GPS-Empfänger in der Lage ist, die Signalverschiebung bis auf 1 % der Chiplänge zu bestimmen, lässt sich im Idealfall die Entfernung zum Satelliten auf 3 Meter genau angeben.

Mehrere Faktoren stehen allerdings dem Idealfall im Wege. Zum einen gibt es ungünstige Satellitengeometrien, d. h. Konstellationen, bei denen alle vier Satelliten vom Empfänger aus etwa in einer Richtung liegen. Vor allem aber beeinflussen atmosphärische Effekte die Signalausbreitung. Elektromagnetische Wellen werden in dispersiven Medien wie der Ionosphäre umgekehrt proportional zum Quadrat ihrer Frequenz verlangsamt, d. h. die Laufzeit erhöht sich. Zivil genutzte GPS-Empfänger korrigieren diesen Fehler, indem sie abgespeicherte Geschwindigkeitsabweichungen für typische Bedingungen heranziehen. Militärs wollen es genauer und nutzen die Tatsache, dass beide Trägerfrequenzen L1 und L2 ihren P/Y-Code übertragen und, auf bestimmte Weise linear kombiniert, (fast) keinen Ionosphärenanteil mehr enthalten.

### Relativistische Effekte

Da die Zeit bei der GPS-Navigation einen kritischen Faktor darstellt, ist es nicht verwunderlich, dass relativistische Effekte (bewegte

Systeme!) nicht unbeachtet bleiben können – Einsteins Relativitätstheorie macht Systeme wie GPS überhaupt erst möglich.<sup>2)</sup> Die spezielle Version sagt eine Zeitdilatation voraus, die auch die Satellitenuhren – von der Erde aus gesehen – langsamer gehen lässt, nach der allgemeinen Theorie hingegen – und das ist der größere Effekt – geht die Satellitenuhr, da sie einem schwächeren Gravitationsfeld ausgesetzt ist, etwas schneller. Als Nettoeffekt resultiert eine Erhöhung der Atomuhrfrequenz um  $4,57 \times 10^{-3}$  Hz, die dadurch kompensiert wird, dass der Satellit von vornherein bei einer entsprechend geringeren Frequenz sendet.



<sup>2)</sup> Vgl. Physik Journal, Januar 2002, S. 99

Summa summarum bieten typische GPS-Empfänger heutzutage eine Genauigkeit von etwa 10 Metern. Durch bestimmte Methoden lässt sich diese noch steigern, beispielsweise eine zusätzliche Korrektur durch eine stationäre GPS-Station, deren Position genau bekannt ist (Differential GPS, DGPS). Diese Technik wird vor allem in der Seefahrt angewandt. Nutzer in Nordamerika können die Genauigkeit mithilfe des Wide Area Augmentation System (WAAS, zu Deutsch etwa weiträumiges Erweitungssystem) verbessern, in dem geostationäre Satelliten dem GPS-Empfänger ein Korrektursignal zur Verfügung stellen. Das europäische Pendant EGNOS ist für kommenden Jahr geplant.

Überhaupt wollen die Europäer unabhängig von den USA werden und haben deswegen ihr eigenes Satellitensystem GALILEO (Abb. 3) aus der Taufe gehoben. GALILEO soll in 90 % der Zeit bis auf weniger als 6 Meter genau sein, im Verbund mit GPS sollen es sogar unter 4 Meter werden. Geplanter Start des ehrgeizigen Projekts: 2008.

ULRICH KILIAN

**Abb. 3:** Bei GALILEO, dem europäischen Pendant zum amerikanischen GPS, sollen insgesamt dreißig Satelliten für eine noch präzisere Navigation weltweit sorgen. (Quelle: Astrium)

Dr. Ulrich Kilian,  
science & more  
redaktionsbüro,  
uk@science-and-  
more.de