

Alltagshilfe aus dem All

Der erste experimentelle GPS-Satellit wurde 1978 durch die USA in Umlauf gebracht. Das für militärische Zwecke entwickelte Positionssystem wurde vor 20 Jahren für zivile Anwendungen freigegeben und kontinuierlich weiterentwickelt. Die heutigen 31 Satelliten wurden alle ab 1990 in Betrieb genommen. Das GPS-System ist im Verkehr auf Land, Wasser und in der Luft nicht mehr wegzudenken. Ebenso wichtige Dienste leistet es in der Vermessung und zur Synchronisation der Sender des mobilen Telefonnetzes.

Alle GPS-Satelliten umkreisen die Erde einmal pro siderischem Halbtage, also in 11 Stunden und 58 Minuten. Jeder Satellit passiert so immer dieselben Punkte auf der Erdoberfläche zur selben Sternzeit. Der Tagesablauf der Satellitenbedeckung verändert sich deshalb nur um 4 Minuten pro Tag. Alle Satelliten bewegen sich mit knapp 4 Kilometern pro Sekunde auf Kreisbahnen in einer Höhe von rund 20 000 Kilometern über der Erde. Die 31 Satelliten sind auf 6 Ebenen verteilt, die alle einen Winkel von 55 Grad zur Äquatorebene bilden und gegeneinander um je 60 Grad um die Erdachse gedreht sind.

Die Anzahl Satelliten, die zu jeder Zeit über der Schweiz sichtbar sind, schwankt zwischen etwa 8 und 14. Da nicht dauernd alle Satelliten in Betrieb sind und wenn durch Gebäude oder Berge kein Sichtkontakt vorhanden ist, sind normalerweise weniger Satelliten zur Navigation verfügbar. Auch atmosphärische Störungen wie Gewitter oder starker Regen beeinträchtigen den Empfang der Signale und die Genauigkeit der Ortsbestimmung, die bei guten Verhältnissen rund 5 Meter beträgt. Mit speziellen Empfängern zusammen mit einem Referenzgerät mit bekannter Position kann sie jedoch bis in den Zentimeterbereich gesteigert werden.

Mindestens vier Satelliten

Das Prinzip der Ortsbestimmung besteht darin, die Distanzen zu mehreren Satelliten zu messen, um daraus die geografische Länge und Breite sowie die Höhe über Meer zu berechnen. Zur Bestimmung der drei Unbekannten wären also drei Distanzmessungen zu drei Satelliten notwendig.

Mit Hilfe zusätzlicher, redundanter Messungen kann die Genauigkeit verbessert werden.

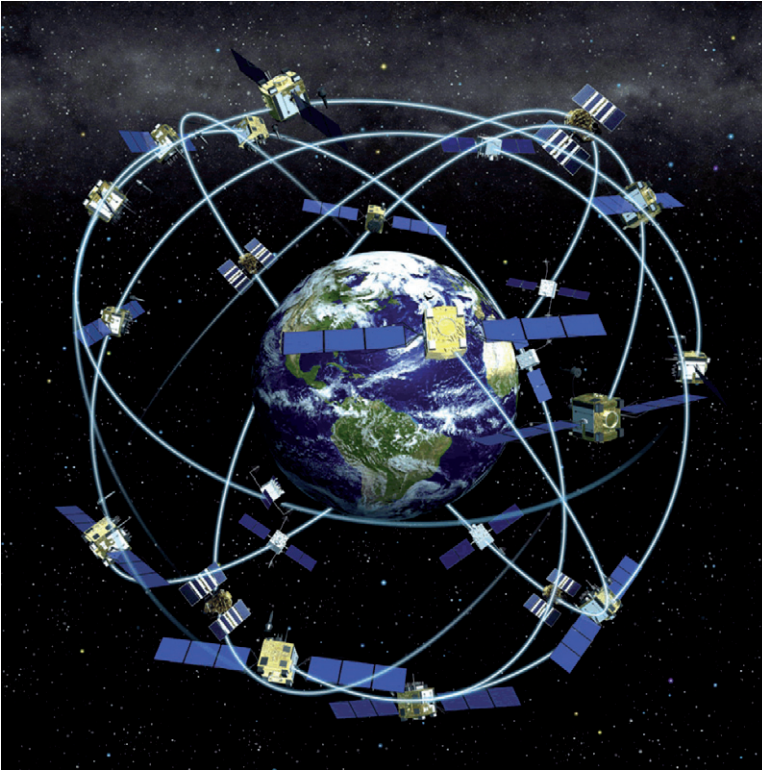
So einfach wäre die Ortsbestimmung jedoch nur, wenn die Lichtgeschwindigkeit unendlich groß wäre. Das Radiosignal braucht vom Satelliten zur Erde rund 75 Millisekunden, wobei sich die Satelliten um 300 Meter von ihrer Sendeposition fortbewegen. In den Satelliten befinden sich Atomuhren, die alle untereinander und mit Referenzstationen auf der Erde auf wenige Nanosekunden genau synchronisiert sind. In jeder Satellitenmeldung ist die daraus abgeleitete exakte Zeit des Meldeanfangs enthalten.

Zusätzlich sendet jeder Satellit seine Bahndaten, die durch Bodenstationen jeden Tag aktualisiert werden. So kann ein Empfänger die Position jedes Satelliten für den Zeitpunkt des Meldeanfangs berechnen. Hätte der Empfänger ebenfalls eine mit den Satellitenuhren synchrone Atomuhr, wären die Zeitdifferenzen und damit die Distanzen zu den Satellitenpositionen berechenbar. Um auch Empfänger mit weniger genauen und nicht mit den Satelliten synchronisierten Uhren benutzen zu können, wird die Differenz zwischen der Zeit des Empfangsgerätes und der Satellitenzeit als vierte Unbekannte betrachtet, die berechnet werden kann, wenn mindestens vier Satelliten empfangen werden können.

Langsame Satellitenübertragung

Im Zeitalter der Übertragungsraten von Mega- und Gigabits pro Sekunde erscheint die Rate der GPS-Satelliten von nur 50 Bits pro Sekunde als völlig veraltet: Eine Meldung mit Bahndaten und Zeit ist 30 Sekunden lang, und ein Auto fährt in dieser Zeit typischerweise 500 Meter weit. Weshalb bewegt sich die angezeigte GPS-Position dennoch kontinuierlich?

Das GPS-Empfangsgerät enthält ein mathematisches Interpolationsmodell und täuscht damit eine kontinuierliche Ortsmessung vor. In neueren Autos ist das eingebaute GPS mit dem ABS-System gekoppelt und wertet die Umdrehungszahl von linken und rechten Rädern aus, um den zwischen zwei Ortsmessungen zurückgelegten Weg inklusive Richtungsänderungen und Geschwindigkeit zu berechnen. So werden sogar Kurven in Gebäuden ohne GPS-Empfang richtig angezeigt!



GPS-System mit 24 Satelliten auf 6 Umlaufbahnen, wie es um etwa 2012 bestückt war. Die jeweils 4 Satelliten sind auf der entsprechenden Kreisbahn unregelmässig verteilt, um über dicht besiedelten Gebieten eine optimale Abdeckung zu erreichen. Die neuesten Satelliten der Serie IIF mit weit ausgedehnten Solarzellenflächen wurden ab 2010 gestartet. Heute sind von den total platzierten 66 Satelliten noch 31 funktionsfähig im Umlauf.

Der Empfänger kann sich auf einen bestimmten Satelliten «konzentrieren»

Die langsame Datenrate von 50 Bits pro Sekunde hat interessante technische Gründe: Um die Übertragung vor Störungen zu schützen, um Interferenzen zwischen Satelliten zu vermeiden (alle Satelliten senden auf demselben Frequenzband) und um zu verhindern, dass ein an einem Gebäude reflektiertes Signal das direkte Signal auslöscht, wird die sogenannte Breitbandtechnologie benützt. Das bei einer Frequenz von etwas über 1 Gigahertz gesendete Trägersignal wird nicht einfach mit den Daten moduliert (wie bei einer Radiostation), wodurch ein wenige 100 Hertz breites Frequenzband mit hoher Energiedichte entstehen würde. Die einzelnen Bits werden vielmehr durch eine von der Atomuhr abgeleiteten Frequenz von 1023 Kilohertz in je $20 \times 1023 = 20460$ sogenannte Chips zerhackt. Dadurch entsteht ein mehrere Megahertz breites Frequenzband mit ähnlichen Eigenschaften, die wir von der Sprachübertragung her kennen: Viele Personen können sich auf demselben Frequenzband (100 bis 10 000 Hertz) in einer lärmigen Umgebung verständigen, ohne von Interferenzen gestört zu werden. Die Energiedichte auf dem breiten Frequenzband ist so klein, dass die

Satellitensignale nicht aus dem Hintergrundrauschen herausgehört werden können. Der Empfänger kann sich aber trotzdem auf einen bestimmten Satelliten «konzentrieren», weil er die Sequenzen von Nullen und Einsen der Chips kennt. Diese Reihenfolge kann auf sehr einfache Art in den Satelliten und Empfängern erzeugt werden und hat eine Länge von $2^{10} - 1 = 1023$, die für jedes Bit 20 mal wiederholt wird. Die nach **Robert Gold (1967)** benannten Sequenzen haben hervorragende Eigenschaften: Sie können von Rauschen nicht ohne Kenntnis des Erzeugungsprozesses unterschieden werden, stören sich nicht gegenseitig und alle Satelliten können mit verschiedenen Gold-Codes im gleichen Frequenzband senden. Eine geniale Umsetzung unserer Sprachkommunikation!

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.

LITERATUR

Gold, R. 1967. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing. *IEEE Trans. on Information Theory* 13(4): 619-621

Ausführlicher Artikel in Wikipedia «Global Positioning System»