Bild: Rudolf A. Blaha

Ganz genau!

Zentimetergenaue Positionsbestimmung mit Satelliten

Dass man mit Satellitensystemen wie GPS Positionen auf einige Meter genau bestimmen kann, ist nichts Neues. Fürs autonome Fahren, für Lieferdrohnen und anderes braucht man aber mehr Genauigkeit.

Von Dirk Koller und Michael Link

Für die Jogging-Runde, die Routenberechnung und das Loggen von Fotostandorten reicht die übliche Genauigkeit von einigen Metern aus, die satellitengestützte Positionsbestimmungssysteme wie GPS, Glonass und Galileo liefern. Dienste, die eine Ortsbestimmung per Satellit ermöglichen, fasst man eigentlich mit dem Summenkürzel GNSS (Global Navigation Satellite Systems) zusammen. Weil aber Nichtfachleute das Kürzel nicht kennen, benutzen diese öfter das Kürzel GPS, auch wenn sie sich per Galileo oder anderen Satelliten lokalisieren lassen.

Während fürs Joggen ein paar Meter Genauigkeit reichen, sieht es beispielsweise im sogenannten Precision Farming in der Landwirtschaft anders aus. Dort müssen Mähdrescher zentimetergenau fahren, damit nicht abgemäht wird, was stehen bleiben soll, etwa Grünstreifen. Wenn Landmaschinen autonom fahren, braucht man eine hohe Präzision mindestens im Dezimeterbereich. Ähnliches gilt für Lieferdrohnen, denn das ersehnte Paket soll ja nicht in Nachbars Birnbaum landen.

Noch genauer muss es bei der Vermessung zugehen, Positioniergenauigkeiten von einem Zentimeter und weniger sind gefragt. Hier stehen die Positionsbestimmungs- und Vermessungsmöglichkeiten per Satellit in Konkurrenz zu bewährten, aber arbeitsintensiven Geräten wie Tachymeter und Theodolit.

Die Vermessung der Welt

Genauigkeiten im Zentimeterbereich waren auf große Distanz lange Zeit undenkbar. Entfernungsangaben zwischen zwei Punkten in Europa und Amerika

Trilateration

GPS basiert wie andere Satellitennavigationssysteme auf dem Prinzip der Trilateration, nutzt also nicht wie bei der Triangulation Winkel, sondern Entfernungen.

Das Signal eines GPS-Satelliten braucht trotz Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit einen Moment, bis es bei einem GPS-Empfänger auf der Erde ankommt. Diese Laufzeit des Signals macht man sich zunutze. Die Laufzeit wird auf der Erde aus der Differenz zwischen dem Zeitstempel beim Losschicken des Signals und der Zeit des Eintreffens am Empfangsort ermittelt. Weil sich Funkwellen mit Lichtgeschwindigkeit (299.792,458 km/s) ausbreiten, muss man nur die Laufzeit damit multiplizieren und heraus kommt die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger.

Das ist zwar noch nicht die Position, aber ein wichtiges Zwischenergebnis. Nun kann man nämlich schon mal vom Satelliten aus eine Kugelschale mit dem Radius der ermittelten Entfernung konstruieren. Der Empfänger muss sich auf irgendeinem Punkt dieser Kugelfläche befinden. Wenn man annehmen darf, dass der Empfänger auf der Erdoberfläche ist, kann man auch einfach schauen, wo sich die Kugeloberfläche mit der Erdoberfläche schneidet. Diese Schnittlinie ergibt eine Kreislinie, auf der sich der Empfänger befindet. Zieht man die Laufzeitberechnung eines weiteren empfangenen Satellitensignals hinzu, ergibt sich auch daraus wieder ein Kreis möglicher Orte des Empfängers auf der Erdoberfläche. Beide Kreise schneiden sich an zwei Punkten. Erst mit dem dritten Kreis, also dem Signal eines weiteren Satelliten, bleibt nur noch ein einziger Schnittpunkt übrig – der Ort des GPS-Empfängers. Soweit zur nackten Ortsberechnung. Interessant ist aber auch, wie die Signale der Satelliten übermittelt und verarbeitet werden.

Alle Satelliten senden gleichzeitig und stets ein pseudozufälliges Rauschen (**P**seudo **R**andom **N**oise), das aus bekannten Generatorpolynomen gebildet wird. Auf das jeweilige Trägersignal wird ein kodierter Datenstrom moduliert, der die Position und die Kennung des Satelliten sowie einen Zeitstempel hochgenauer Atomuhren an Bord und Statusmeldungen enthält.

Für zivile Nutzer senden GPS-Satelliten auf 1542,42 Megahertz – oft als L1 benannt – den sogenannten C/A-Code („Coarse Acquisition"). Seit 2005 wird dieser auch auf 1227,60 Megahertz als L2C-Signal übertragen, aber nur von Zweifrequenzempfängern aufgenommen. Für militärische Nutzer sendet das GPS-System auf L1 sowie auf 1227,60 Megahertz (L2) den P(Y)-Code, der in Verbindung mit einer erhöhten Übertragungsrate eine noch genauere Ortsbestimmung ermöglicht. Das P in der Abkürzung steht für „Precise Positioning", das Ypsilon für einen geheimen und bei Bedarf zuschaltbaren Code zum Verschlüsseln. Seit 2010 rüsten die US-Behörden als Betreiber des GPS-Systems neu in den Orbit gebrachte Satelliten mit einem weiteren Kanal auf 1176,45 Megahertz aus, L5 genannt. Diese Signale dienen vorrangig der Luftfahrt und Rettungsdiensten. Sie sollen für mehr Robustheit gegenüber Funkstörungen sowie in schwierigen Empfangslagen sorgen, doch auch Sportuhren nutzen L5 schon.

Die Satellitenuhren gehen zwar atomzeitgenau, die der Empfänger aber nicht – wer will schon eine Atomuhr im GPS-Empfänger mitnehmen? Es sind also nicht nur die Koordinaten gesucht, auch die Zeit im Empfänger muss mit der in den Satelliten synchronisiert werden. Daher nimmt man ein weiteres Signal eines vierten Satelliten in ein Gleichungssystem mit vier Unbekannten auf. Bis die Uhren synchronisiert sind, werden nur grobe, sogenannte Pseudo-Entfernungen berechnet, die nach und nach in einem iterativen Prozess durch die Zeitsynchronisation genauer werden. Daher „wandert" ein Navi-Pfeil kurz nach dem Einschalten.

Bei Smartphones und anderen Geräten, die außer GPS auch noch Signale weiterer Satellitennavigationssysteme verarbeiten, werden die Entfernungsberechnungen verschiedener Systeme so zusammengeführt, als kämen die Berechnungen allein von einem System. Die Chipsätze der Smartphones berücksichtigen zuerst Signale von GPS- und den russischen Glonass-Satelliten. Auch wenn schon weniger Satelliten wie beschrieben zur Positionsbestimmung reichen: Erst wenn damit keine neun Signale zusammenkommen, sucht das Smartphone auch nach Galileo- sowie den chinesischen Beidou-Satelliten.

Die Ortsbestimmung ist eigentlich eine Laufzeitmessung. Mit drei Signalen exakt gleicher Laufzeit und mit einem Signal zum Zeitvergleich als vierter Komponente ist eine Position bestimmt.

schwankten üblich um mehr als 100 Meter. Die genaueste geodätische Methode, die Triangulation, überwand nun mal keine Ozeane, weil die Eckpunkte sich wegen der großen Entfernungen außer Sicht befinden.

Satellitennavigationssysteme haben eine recht lange Vorgeschichte. Schon seit der Mitte der Neunzigerjahre ist das bekannteste, das GPS, voll funktionsfähig. Jeweils vier Satelliten bewegen sich dabei auf sechs Hauptorbits, auf einigen Bahnen gibt es weitere als Reserve. Sie sind gegenüber dem Äquator um 55 Grad geneigt und befinden sich in 20.200 Kilometern Höhe. Mit dieser Konstellation umlaufender Satelliten ist es unter freiem Himmel in der Regel möglich, die Funksignale von mindestens vier, oft aber mehr GPS-Satelliten zu empfangen. Mithilfe ihrer Signale vollzieht der Empfänger die eigentliche Positionsbestimmung.

Das erste GPS-Gerät, das Macrometer V-1000 aus dem Jahr 1982, hatte die Abmessungen eines Kühlschranks und ermöglichte Positionsbestimmungen mit einer Unsicherheit von mehreren Metern. Aus den sündhaft teuren und riesigen Klötzen sind preisgünstige, in winzige Chips integrierte Funktionen geworden. Bei der Genauigkeit hat sich grundsätzlich aber nicht viel verändert, auch wenn sich das für zivile Nutzer mit Wegfall der absichtlichen Verschlechterung des GPS-Signals (Selective Availability) ab 2000 durchaus anders anfühlen mag.

Herkömmliche Satellitennavigationsgeräte aktualisieren die errechnete Position einmal pro Sekunde, einige wenige Modelle auch häufiger. Wie weit die von den vom GPS-Gerät berechneten Positionen streuen, wird mit der englischsprachigen Prägung „Dilution of Precision" ausgedrückt, abgekürzt DOP. Sie steht nicht pauschal für die Ungenauigkeit der Messung, sondern für die Streuung der Messwerte infolge der vom Empfänger aus betrachteten geometrischen Position der Satelliten zueinander.

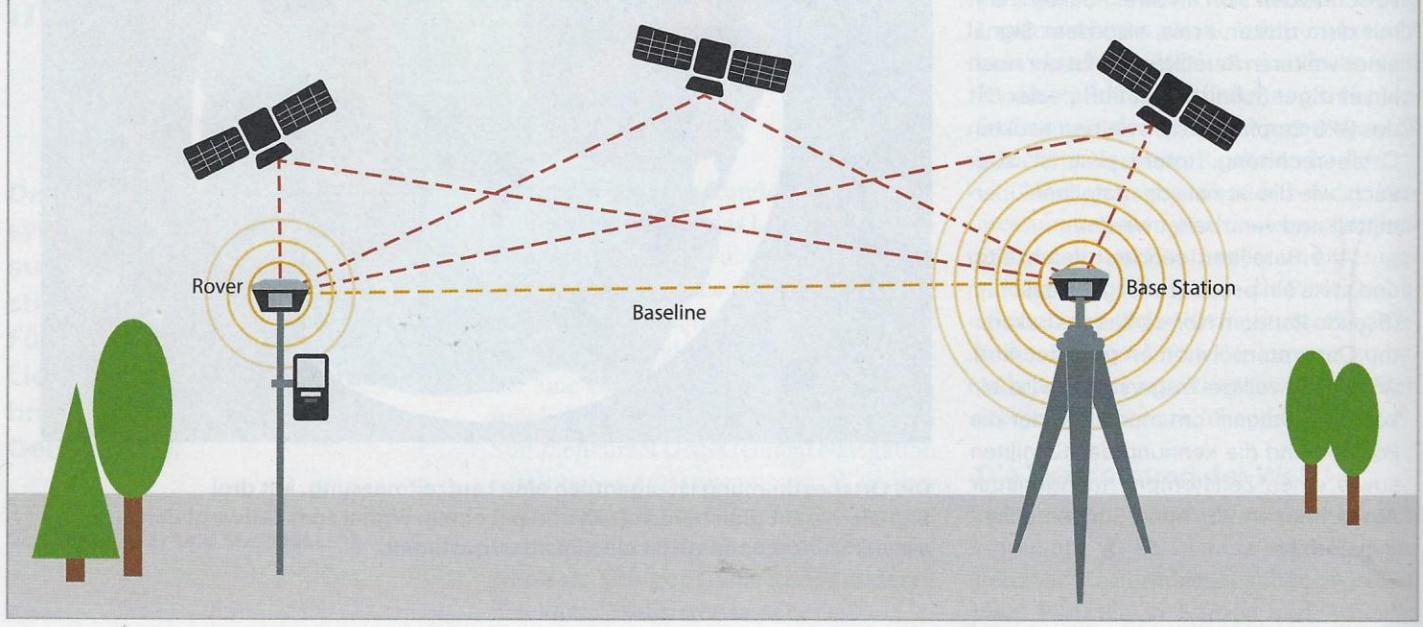
Stehen die Satelliten eng zusammen oder erscheinen sie im Extremfall fast wie in einer Perlenkette aufgereiht, attestiert das GPS-Gerät dafür einen höheren DOP-Wert, weil sich die Schnittlinien zur Positionsberechnung (siehe Kasten) in einem ungünstigen flachen Winkel treffen und somit schleifende Schnitte wahrscheinlicher werden. Erscheinen die Satelliten über einen weiten Bereich des Himmels, treffen die Schnittlinien für die Positionsberechnung in einem günstigeren Winkel aufeinander, oft sogar fast senkrecht. Der DOP-Wert wird somit kleiner und die Streuung der Positionen geringer.

Um die Richtung der Streuung einzugrenzen, erhalten DOP-Werte Bezeichner: Die PDOP (Position Dilution of Precision) beziffert dabei den Gesamtfehler, der sich aus der horizontalen Ungenauigkeit (HDOP) und der vertikalen Ungenauigkeit (VDOP) errechnen lässt: $PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2$. Für Anwendungen als Zeitnormal kommt auch eine zeitliche (temporale) Unschärfe zum Tragen, die sich im TDOP-Wert ausdrückt. Da der vertikale Fehler außer bei der Luftfahrt und bei einigen Vermessungsaufgaben weniger interessiert, ist der Begriff HDOP bekannter. Die DOP-Werte sind Geräte-Logs, die sogenannte NMEA-Daten enthalten, und zwar unter dem Bezeichner $GPGGA.

Selbst wenn DOP-Werte anzeigen, dass die Satellitenkonstellation günstig ist, erhält man oft größere Abweichungen. Ein gewisses Maß an Abweichung ist eingeplant. Nach den Spezifikationen der US-Regierung darf der Fehler bei handelsüblichen GPS-Geräten 7,8 Meter während 95 Prozent der Zeit betragen. Den größten Anteil daran haben Fehler durch Beugungs- und Dämpfungseffekte der Signale beim Durchqueren der Ionosphäre: Befindet sich ein Satellit vom Empfänger aus gesehen nah am Horizont, müssen seine Signale eine längere Strecke durch die Ionosphäre zurücklegen als Satelliten, die quasi direkt über dem Empfänger stehen. Daraus ergibt sich eine zeitliche Verzögerung, die einen Messfehler von fünf Me-

So funktioniert Real Time Kinematic (RTK)

Bei der RTK-Vermessung ist die Messung zentimetergenau. Sie benutzt sowohl die Entfernungsbestimmung über die Trägerphase als auch die Korrektursignale von Referenzstationen und ähnelt daher dem etablierten Differential-GPS.



tern und damit den Löwenanteil aus dem besagten Fehlerbudget bewirken kann. Zum Vergleich: Ein Uhrenfehler von 1 Nanosekunde im Satelliten bewirkt einen Ortsfehler von nur rund 30 Zentimeter.

Auch Brechungseffekte in der Wetterschicht, in der Atmosphäre sowie Signalausbreitungsfehler durch Reflexion der GPS-Signale an Gebäuden oder nassen Blättern verschlechtern die Genauigkeit. Sogar gerätebezogene Ursachen spielen eine Rolle, etwa Empfängerfehler wie das frequenzabhängige thermische Messrauschen oder hardwarebedingte Verzögerungen. Bei Feld-Wald-Wiesen-GPS-Empfängern, die lediglich die Signale auf einer einzigen Frequenz empfangen, nämlich die auf 1575,42 Megahertz, summieren sich die Effekte in der Praxis auf eine durchschnittliche Genauigkeit von rund 5 Metern.

Optimiert und korrigiert

Verschiedene Techniken sollen Fehler ausbügeln. Eine davon: Korrektursignale von weiteren Satelliten, wie etwa der Wide-Area Augmentation Service (WAAS) beziehungsweise der europäischen Variante European Geostationary Navigation Overlay Service (Egnos). Korrekturdaten müssen aber nicht zwangsläufig von Satelliten kommen. Sie können auch vom Smartphone übers Mobilfunknetz empfangen werden.

Die Korrekturdatenlieferanten arbeiten nach ähnlichen Prinzipien. Das Egnos-System beispielsweise betreibt drei geostationäre Satelliten und ein Netz von Bodenstationen. Die Satelliten senden Entfernungsmesssignale aus, die denen der Navigationssatelliten ähneln. Empfänger können sie also wie herkömmliche GNSS-Signale benutzen. Wichtiger sind weitere Daten, die den Empfängern aktuelle Informationen zum Maß und der räumlichen Verteilung der Elektronendichte in der Ionosphäre liefern. Diese hat Einfluss auf die Laufzeiten der Satellitensignale, was sich wie beschrieben sehr stark auf die berechnete Entfernung zum Satelliten auswirkt.

Während Dienste wie Egnos und WAAS Korrekturdaten liefern, leistet das vielfach bekanntere Assisted-GPS (A-GPS) etwas völlig anderes. Es stellt dem GNSS-Empfänger in Form eines Almanachs eine Art längerfristigen Fahrplan über die Bahnverläufe sowie ein paar Fehlerkorrekturen bereit. Beides wird auch von den Satelliten selbst gesendet, doch A-GPS-Daten helfen beim schnelleren GPS-Fix einer Position. Ohne Almanachdaten oder mit veralteten Werten braucht ein Empfänger weitaus länger, bis er aus dem Signalbrei die Satellitendaten extrahieren kann: Das komplette GPS-Datensignal setzt sich aus 37.500 Bit zusammen. Bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 50 Bit pro Sekunde dauert eine vollständige Übermittlung also 12,5 Minuten. Sie lässt sich verkürzen, wenn man die Daten als A-GPS-Daten übers Internet lädt und damit den Empfangschip füttert.

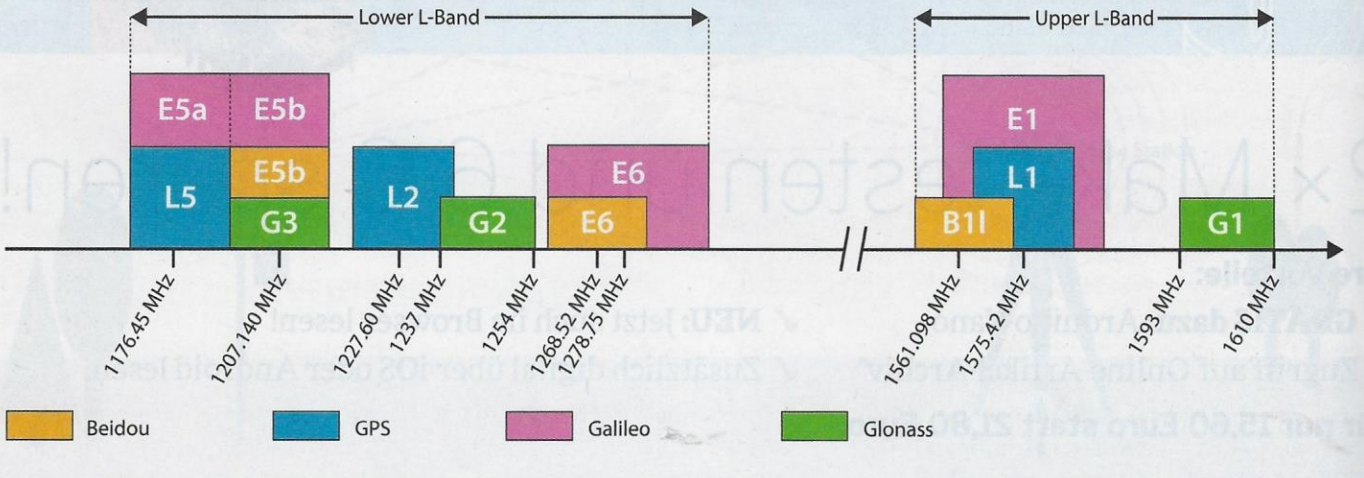
Ein anderer Ansatz nutzt Phasenbeobachtungen der übertragenden Funkwellen zur Ermittlung der Entfernung zu den Satelliten (Precise Point Positioning, kurz PPP) mit Genauigkeiten zwischen 20 und 50 Zentimetern. Dazu benötigt man präzise Bahndateninformationen sowie eine sehr exakte Uhrzeit und andere Korrekturparameter, etwa solche, die Phasendrehungseffekte durch die Rotation der Satelliten ausgleichen oder Effekte der Sonnen- und Mondanziehung auf den Erdkörper wegrechnen. Die wichtigste Zutat ist ein Mehrfrequenzempfänger, die weiter unten noch erläutert werden, und sehr viel Zeit für die Phasenbeobachtungen, die beim PPP das wichtigste Instrument darstellen. Die nötigen Korrekturdaten und Bahndaten als Vergleichsnormal kann man zum Beispiel vom International GNSS Service kostenlos beziehen.

Einen Schritt weiter geht man beim Differential Global Positioning System (DGPS). Um Genauigkeiten von zwei bis fünf Zentimeter zu erreichen, arbeitet es mit Referenzstationen: Man ermittelt die Position für eine eingemessene Station zu einer gegebenen Zeit und überträgt die dabei aufgetretene Abweichung auf die eigentlich zu messende Position, den sogenannten Rover. Das kann per Funk oder via Internet geschehen. Die Entfernung zwischen Basis und Rover bezeichnet man als Baseline und sie sollte nicht größer als zehn Kilometer sein.

Die Korrektur der Position mit den Referenzdaten lässt sich auch im Nachgang der Messung erledigen; man spricht dann von Postprocessing. Das bietet sich an, wenn zwar genaue Positionen erwünscht sind, diese aber nicht in Echtzeit benötigt werden, zum Beispiel, wenn man nachträglich Fotos aus einem Drohnenflug vermessen will. In anderen Situationen

Benennungen der Frequenzbänder

Die Frequenzen der Satellitensysteme werden üblicherweise mit Kürzeln bezeichnet.



wird aber die exakte korrigierte Position in Echtzeit gebraucht, beispielsweise beim bereits erwähnten Mähdrescher oder bei der Paketdrohne.

Real Time Kinetics

Das derzeit leistungsfähigste Korrekturverfahren nennt sich Real Time Kinetics (RTK). Es reduziert Messungenauigkeiten auf weniger als einen Zentimeter in der Horizontalen. Erreicht wird dies durch die Kombination zweier Optimierungen: RTK nutzt sowohl die Entfernungsbestimmung über die Trägerphase als auch die Korrektursignale von Referenzstationen. Voraussetzung ist ein Empfänger, der nicht nur eine Position über eine Schnittstelle ausgibt, sondern Zugriff auf die Rohdaten hat.

Die auftretenden Phasenmehrdeutigkeiten zur sogenannten RTK-Fix-Position sind nur mit recht komplexen mathematischen Verfahren herauszurechnen. In Verbindung mit der Open Source-Software RTKLIB (www.rtklib.com) lassen sich aber schon mit herkömmlichen günstigen Einfrequenzempfängern zentimetergenaue GPS-Auflösungen erzielen. Die erforderlichen Referenzdaten könnte man sich selbst erzeugen, indem man einen zweiten Empfänger an einer exakt bestimmten Position aufstellt, also ganz ähnlich wie beim Differential-GPS.

In der Praxis hat man solche exakt vermessenen Positionen allerdings selten da, wo man sie braucht. Und weil ein zweiter Empfänger mit Kosten verbunden ist, bietet sich an, die Korrekturdaten eines kommerziellen Anbieters zu nutzen. Für Deutschland sind solche Referenzdaten flächendeckend vorhanden und in einigen Bundesländern dank Sapos, dem Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessungen, sogar kostenlos.

Sapos unterhält ein Netzwerk von Referenzstationen und ermöglicht es, die Daten der nächstgelegenen Station als Download für die Korrektur im Postprocessing oder per Internet live als NTRIP-Stream zu beziehen. Die Abkürzung steht für „Networked Transport of RTCM via Internet Protocol“, wobei das RTCM wiederum ausgeschrieben „Radio Technical Commission for Maritime Services“ bedeutet. NTRIP ist ein vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie und der Universität Dortmund entwickeltes Verfahren, mit dem man Korrekturdatenströme via Internet bereitstellt. Außerdem unterstützt Sapos virtuelle Referenzstationen (VRS), bei denen die Daten mehrerer Referenzstationen zu einer fiktiven Station an der ungefähren Position des Nutzers gemittelt werden.

Bild: ublox

Das ublox-Modul ZED-F9P ist mit 170 Euro einigermaßen erschwinglich. Es gibt dafür auch fertige Entwickler-Boards, einige andere integrieren das Modul bereits ebenfalls.

Mehrfrequenzempfänger

Eine wichtige Möglichkeit zur Fehlerminimierung ist es, direkt im GPS-Empfänger ein besseres Signal zu bekommen. Besonders bei großen dämpfenden Abschattungen in mehrere Richtungen etwa durch Gebäude, Berge oder Bäume haben die üblichen Einfrequenzempfänger, die nur das L1-Signal empfangen, selbst dann Schwierigkeiten, die nötige Anzahl an GNSS-Satelliten ins Sichtfeld zu bekommen, wenn sie Signale mehrerer Navigationssysteme verarbeiten könnten. Zudem brauchen sie recht lange für ihren Job. Bessere Antennen könnten Abhilfe schaffen, doch die benötigen etwas Platz. Das gilt besonders für Helix-Antennen, wie man sie etwa als markanten Stummel auf den Garmin-Handgeräten der GPSMAP-60-Reihe findet.

Auch ohne aufwendige Antennen geht es besser: Profis verwenden überwiegend Mehrfrequenzempfänger. Diese empfangen beispielsweise die GPS-Signale auf L1 (1575,42 MHz) und L2C (1227,60 MHz). Das hilft, die Berechnungsfehler zu verringern, die beim Durchqueren der Ionosphäre entstehen, weil die Ionosphäre auf Signale unterschiedlicher Frequenz verschieden einwirkt und sich Laufzeitenunterschiede von gleichen Satelliten somit herausrechnen lassen.

Nebenbei verkürzt dies die sogenannte Time-to-fix, also die Zeit, bis eine Position ermittelt ist. Zudem kann die Baseline für Differentialverfahren bei Mehrfrequenzempfängern auf rund 100 Kilometer verlängert werden. Nachteil: Mehrfrequenzempfänger waren bislang sehr teuer – deutlich im vierstelligen Bereich.

Doch die Technik könnte nun erschwinglicher werden: Der Schweizer Chiphersteller ublox stellte 2020 das Modul ZED-F9P vor, das im Hinblick auf Mehrfrequenzempfang Möglichkeiten zu einem auch für nichtprofessionelle Wünsche noch akzeptablen Preis (170 Euro) bringt. Es empfängt GPS, das russische Glonass, das europäische Galileo sowie Chinas Beidou auf den Bändern L2OF, L2C, E1B/C, B2I, E5b, L1C/A, L1OF und B1I.

Für Bastler interessanter ist das Entwickler-Board CO99-F9P (ab 210 Euro). Man darf sich darunter kein benutzerfreundliches Endgerät in robustem Gehäuse mit Bedienungsanleitung und Antennenstab vorstellen, sondern einen Rohbau mit der vollen Funktionalität des Chips – die man dem Gerät aber per Software selbst entlocken muss. Das Board ist mit USB-, I2C- (SDA, SCL), SPI- und UART-Anschlüssen ausgestattet.

Man benötigt zusätzlich eine Mehrfrequenzantenne wie etwa die TW 3870 von Tallysman – sie empfängt Signale von GPS auf L1/L2, Glonass auf G1/G2, Beidou auf B1 sowie Galileo im Bereich E1. Insgesamt kosten alle Bauteile knapp 450 Euro. Dafür erhalten Bastelwillige ein GNSS-System mit Empfangseigenschaften eines Geräts aus der Oberliga. Hinweise zum Start eines solchen Projektes finden sich unter ct.de/y5dq.

Auf den Punkt

Ob man nun Ländergrenzen vermessen will oder die Lieferdrohne exakt führen möchte: Vom Profi bis zum Laien kann heute jedermann Satellitendaten zur Positionsbestimmung nutzen. Mit Bastelprojekten kann man preiswert zentimetergenau messen, sodass man mit Profis mithalten kann. *(mil@ct.de)* c't

RTKlib-Software, Bauvorschläge und Bezugsquellen: ct.de/y5dq