Vom Satellitensignal bis zur Positionsbestimmung auf der Karte : Teil 2 : Bezugs- und Koordinatensysteme

Autor(en): **Zogg-Weber, Jean-Marie**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 9

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902069

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Im ersten Teil dieses zweiteiligen Beitrags wurden die Grundlagen des GPS-Verfahrens vorgestellt. Es wurde gezeigt, wie eine Position aus den Signalen von vier Satelliten berechnet werden kann. Im zweiten und letzten Teil steht die für präzise Messungen notwendige Koppelung geodätischer Daten mit den ebenen Landeskoordinaten im Vordergrund der Betrachtung. Anschliessend wird besprochen, wie die Messresultate noch wesentlich verbessert werden können, das heisst, wie die Genauigkeit vom 100-m-Bereich in den beispielsweise für die Messung von Staumauerbewegungen massgeblichen Millimeterbereich vorangetrieben werden kann.

Vom Satellitensignal bis zur Positionsbestimmung auf der Karte

Teil 2: Bezugs- und Koordinatensysteme

■ Jean-Marie Zogg-Weber

Um die Funktionsweise von GPS zu verstehen, muss man sich mit den Grundzügen der «Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche», der Geodäsie, befassen. Ohne Grundkenntnisse ist es schwer verständlich, weshalb in günstigen tragbaren GPS-Empfängern aus über 100 verschiedenen Kartenbezugssystemen (Datum) und aus ungefähr zehn verschiedenen Gitternetzformaten (Grid) die richtige Kombination ausgewählt werden muss. Wird die falsche Wahl getroffen, so kann der Positionsfehler auf mehrere hundert Meter ansteigen.

Geoid

Dass die Erde kugelförmig ist, wissen wir spätestens seit Kolumbus. Aber wie rund ist sie tatsächlich? Es war schon immer eine schwierige Wissenschaft, die Form des blauen Planeten exakt zu beschreiben. Zu diesem Zweck wurde im Lauf der Jahrhunderte auf verschiedene Arten versucht, die «wahre» Körpergestalt der Erde so genau wie möglich zu beschreiben. Eine Annäherung an die Form der Erde ist das Geoid.

Die Oberfläche des ruhenden Meeres bildet bei entsprechender Idealisierung einen Teil einer Niveaufläche, die Oberfläche der Erde im geometrischen Sinn. In Anlehnung an das griechische Wort für Erde wird diese Fläche als Geoid (Bild 8) bezeichnet. Das Geoid lässt sich nur mit begrenzter Genauigkeit und nicht ohne

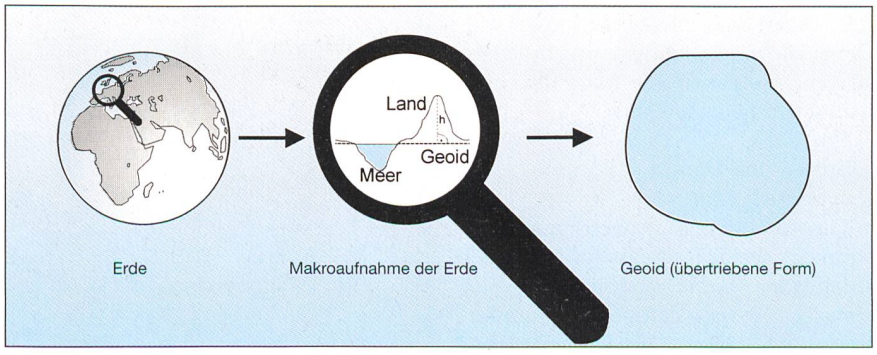


Bild 8 Das Geoid als Annäherung der Erdoberfläche

Adresse des Autors
Jean-Marie Zogg-Weber, Dipl. Ing. HTL
Dozent Ingenieurschule HTL Chur
Ringstrasse, 7004 Chur
Email zoggjean@htlchur.ch

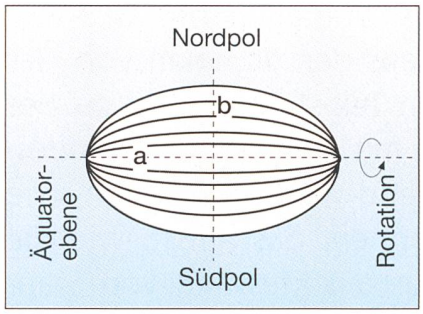


Bild 9 Entstehung des Rotationsellipsoids

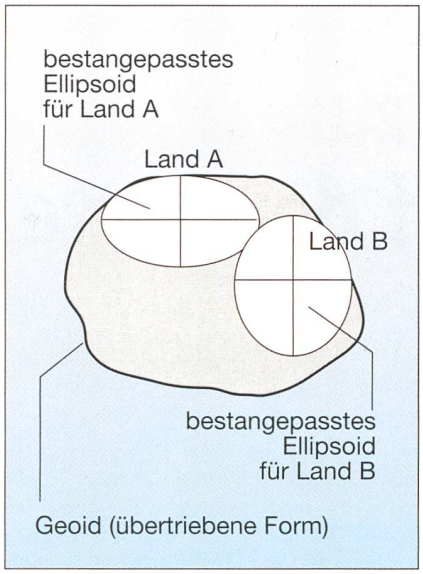


Bild 10 Bestangepasste lokale Referenzellipsoide

willkürliche Annahmen als mathematische Figur definieren, weil aufgrund ungleichmässiger Erdmasseverteilung die Niveauflächen der Ozeane und Meere nicht auf der Oberfläche einer geometrisch definierbaren Form liegen und somit angenähert werden müssen.

Ein Geoid ist ein von der tatsächlichen Erdgestalt abweichender theoretischer Körper, dessen Oberfläche die Feldlinien der Schwerkraft überall im rechten Winkel schneidet.

Das Geoid dient oft als Bezugsfläche für Höhenmessungen. Der Referenzpunkt für Höhenmessungen in der Schweiz ist der Repère Pierre du Niton (RPN, 373,600 m) im Hafenbecken von Genf. Diese Höhe stammt aus Anschlussmessungen zum Hafen von Marseille (mittlere Meereshöhe: 0,00 m).

Ellipsoid und Datum

Rotationsellipsoid

Das Geoid kann rechnerisch schlecht behandelt werden, so dass für die täglich anfallenden Vermessungsarbeiten eine einfachere, besser definierbare Form erforderlich ist. Eine solche Ersatzfläche ist das Rotationsellipsoid. Lässt man die Fläche einer Ellipse über ihre Symmetrieachse ***a*** rotieren, so entsteht ein Rotationsellipsoid (Bild 9).

Das Rotationsellipsoid ist bestimmt durch die grosse Halbachse ***a*** und die kleine Halbachse ***b***. Das Mass für die Abweichung von der idealen Form der Kugel wird Abplattung ***f*** (Flattening) genannt.

Lokale bestangepasste Referenzellipsoide und Datum

$$f = \frac{a-b}{a} \qquad (16)$$

Lokale Referenzellipsoide: Beim Rotationsellipsoid ist zu beachten, dass die natürliche Lotrichtung in einem Punkt nicht senkrecht auf das Ellipsoid trifft, sondern auf das Geoid. Ellipsoidnormale und natürliche Lotrichtung fallen somit nicht zusammen, sie unterscheiden sich durch die sogenannte Lotabweichung (Bild 11) voneinander, das heisst, Punkte der Erdoberfläche werden falsch projiziert. Um diese Abweichung so klein wie möglich zu halten, hat jedes Land sein eigenes bestangepasstes nichtgeozentrisches Rotationsellipsoid als Bezugsfläche für Vermessungsaufgaben entwickelt (Bild 10). Die Halbachsen ***a*** und ***b*** und der Mittelpunkt sind so gewählt, dass Geoid und Ellipsoid im Landesgebiet möglichst genau übereinstimmen.

Datum, Kartenbezugssystem: Als Datum werden nationale oder internationale Kartenbezugssysteme bezeichnet, welche auf bestimmten Ellipsoiden beruhen. Je nach verwendeter Karte ist bei der Navigation mit GPS-Empfängern darauf zu achten, dass das zugehörige Kartenbezugssystem in den Empfänger eingegeben wird.

Beispiele für Kartenbezugssysteme aus einer Auswahl von über 120 Systemen: CH-1903 für die Schweiz, WGS-84 als Weltstandard, NAD83 für Nordamerika usw.

Ein Rotationsellipsoid eignet sich sehr gut, um die Lagekoordinaten, Längengrad und Breitengrad eines Punktes zu beschreiben. Höhenangaben werden entweder auf das Geoid oder auf das Referenzellipsoid bezogen. Die Abweichung zwischen der gemessenen orthometrischen (auf das Geoid bezogenen) Höhe ***H*** und der ellipsoidischen (auf das Referenzellipsoid bezogenen) Höhe ***h*** wird als Geoidondulation ***N*** bezeichnet (Bild 11).

Schweizer Datum, das Bessel-Ellipsoid CH-1903

Das heute in der Schweiz offiziell gültige Referenzsystem für vermessungstechnische Anwendungen wird als CH-1903 bezeichnet. Das ihm zugrundeliegende nichtgeozentrische Ellipsoid ist das Bessel-Ellipsoid (Tabelle II), welches in der alten Sternwarte von Bern gelagert wurde. Als Ausgangsparameter für das Bessel-Ellipsoid wurden die zehnstelligen dekadischen Logarithmen der Halbachsen ***a*** und ***b*** mit den in Tabelle II angegebenen Zahlenwerten vereinbart.

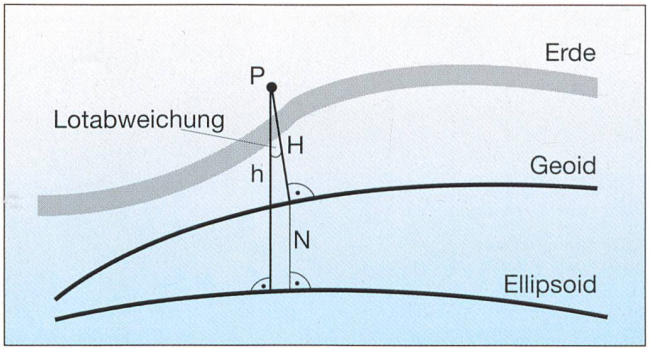
Weltweites Referenzellipsoid WGS-84

Die Angaben und Berechnungen eines GPS-Empfängers beziehen sich primär auf das Referenzsystem WGS-84 (World Geodetic System 1984). Das WGS-84-Koordinatensystem ist geozentrisch gelagert und nimmt an der Drehung des Erdkörpers teil. Im Englischen wird ein solches System als ECEF (Earth Centered Earth Fixed) bezeichnet. Das WGS-84-Koordinatensystem ist ein dreidimensionales rechtsdrehendes kartesisches Koordinatensystem mit dem Koordinatenursprungspunkt im Massezentrum (=geozentrisch) eines der gesamten Erdmasse angenäherten Ellipsoids (Tabelle III).

Tabelle II Parameter des Bessel-Ellipsoids

Grosse Halbachse *a*	Kleine Halbachse *b*
log (a) = 6,8046434637 ***a*** = 6 377 397,16 m	log (b) = 6,8031892839 ***b*** = 6 356 078,96 m

Bild 11 Unterschied zwischen Geoid und Ellipsoid



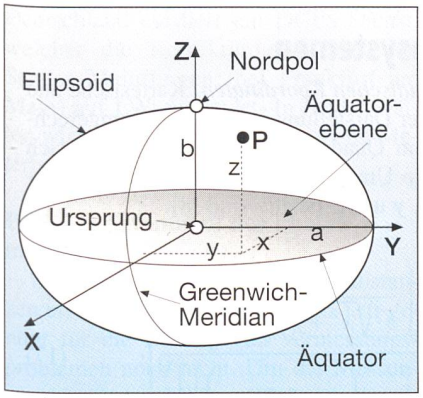


Bild 12 Bezeichnung der kartesischen Koordinaten

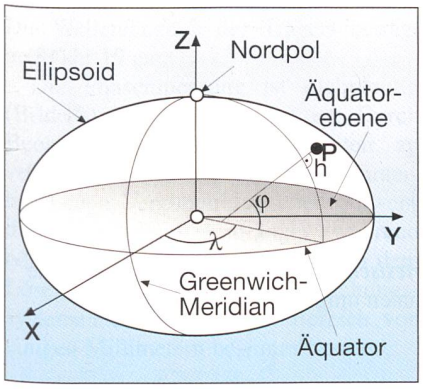


Bild 13 Bezeichnung der ellipsoidischen Koordinaten

Grosse Halbachse a (m)	Kleine Halbachse b (m)
6 378 137,00	6 356 752,31

Tabelle III Parameter des WGS-84-Referenzellipsoids

Die positive X-Achse des Ellipsoids (Bild 12) liegt auf der Äquatorebene (diejenige gedachte Fläche, welche vom Äquator eingeschlossen wird) und geht vom Massezentrum aus durch den Schnittpunkt von Äquator und Greenwich-Meridian (0-Meridian). Die Y-Achse liegt ebenfalls in der Äquatorebene und ist 90° östlich versetzt zur X-Achse. Die Z-Achse wiederum steht senkrecht auf der X- und der Y-Achse und geht durch den geographischen Nordpol.

Anstelle von kartesischen Koordinaten (X, Y, Z) werden in der Regel zur Weiterverarbeitung ellipsoidische Koordinaten (φ, λ, h) verwendet (Bild 13). φ entspricht dabei dem Breitengrad (Latitude), λ dem Längengrad (Longitude) und h der ellipsoidischen Höhe, das heisst der Länge des Lotes des Punktes P bis zum Ellipsoid.

Transformation von lokalen in weltweite Referenzellipsoide

Geodätisches Datum: In der Regel handelt es sich bei den Bezugssystemen um lokale und nicht um geozentrische Ellipsoide. Die Beziehung zwischen einem solchen lokalen (z.B. CH-1903) und einem globalen, geozentrischen System (z.B. WGS-84) heisst geodätisches Datum. Falls die Achsen des lokalen und des globalen Ellipsoids parallel sind oder für kleinräumige Anwendungen als parallel betrachtet werden können, genügen für den Datumsübergang drei Verschiebungsparameter, die sogenannten Datumshiftkonstanten ΔX, ΔY, ΔZ.

Eventuell müssen noch drei Rotationswinkel φ_x, φ_y, φ_z und ein Massstabsfaktor m (Bild 14) hinzugefügt werden, so dass die vollständige Transformationsformel sieben Parameter enthält. Das geodätische Datum legt die Lage eines lokalen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems bezüglich des globalen Systems fest.

Transformation des Datums: Eine Transformation des Datums bedeutet definitionsgemäss die Transformation eines räumlichen kartesischen Koordinatensystems (z.B. WGS-84) in ein anderes (z.B. CH-1903) mittels räumlicher Verschiebung, Drehung und Streckung. Um die Transformation durchzuführen, muss das geodätische Datum bekannt sein. Die umfangreichen Transformationsformeln können der Fachliteratur, zum Beispiel [6], entnommen werden, oder die Transformation kann direkt über das Internet durchgeführt werden [7]. Ist die Transformation erfolgt, können die kartesischen Koordinaten in ellipsoidische Koordinaten umgerechnet werden (Kasten S. 28).

Ebene Landeskoordinaten, Projektion

Üblicherweise wird in der Landesvermessung die Lage eines Punktes P der

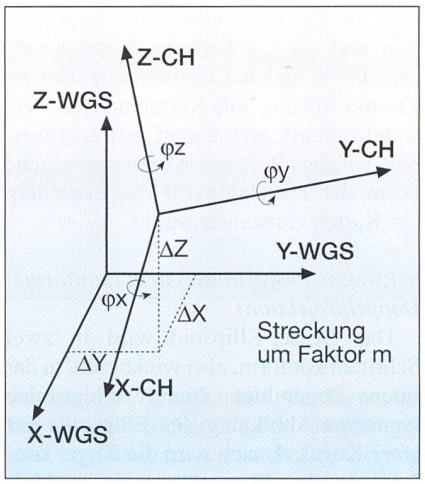


Bild 14 Geodätisches Datum

Erdoberfläche durch die ellipsoidischen Koordinaten Breite λ und Länge φ (bezogen auf das Referenzellipsoid) und die Höhe (bezogen auf Ellipsoid oder Geoid) beschrieben (Bild 13).

Da geodätische Berechnungen (z.B. Abstand zwischen zwei Gebäuden) auf dem Ellipsoid numerisch unbequem sind, benutzt man in der vermessungstechnischen Praxis Abbildungen (Projektionen) ellipsoidischer Koordinaten der Referenzellipsoide der Landesvermessungen in eine Rechenebene. Dies führt zu ebenen rechtwinkligen Landeskoordinaten X und Y. Auf den meisten Landeskarten befinden sich Gitternetze (engl. Grids), welche die einfache Lokalisierung eines Punktes im Gelände ermöglichen. Die Abbildung des Ellipsoids in eine Ebene ist ohne Verzerrungen nicht möglich. Man kann jedoch die Abbildung so wählen, dass die Verzerrungen gering bleiben. Übliche Projektionsverfahren

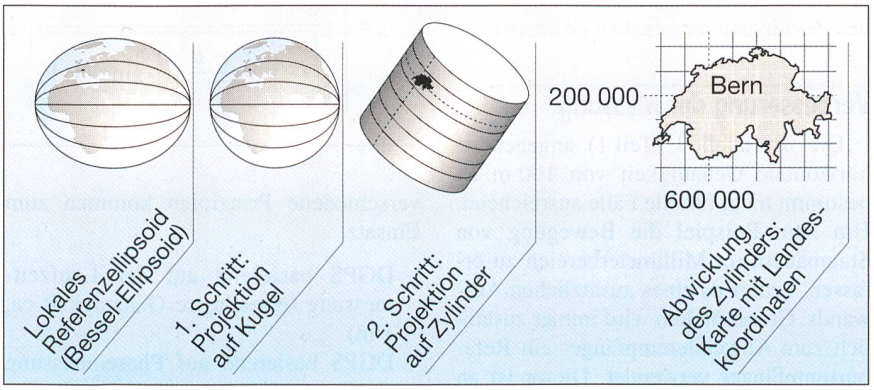


Bild 15 Prinzip der Doppelprojektion

Bild 16 Vom Satelliten bis zur Position

sind die Zylinder- oder Mercatorprojektion und die Lambertsche Schnittkegelprojektion. Werden Positionsangaben im Zusammenhang mit Kartenmaterial verwendet, muss also darauf geachtet werden, welches Referenzsystem und welche Form der Projektion für die Erstellung der Karten verwendet wurde.

Schweizer Projektionssystem (konforme Doppelprojektion)

Das Bessel-Ellipsoid wird in zwei Schritten konform, also winkeltreu, in der Ebene abgebildet. Zuerst erfolgt eine konforme Abbildung des Ellipsoids auf einer Kugel, danach wird die Kugel konform in der Ebene über eine schiefachsige Zylinderabbildung abgebildet. Dieses Verfahren wird sogenannte Doppelprojektion genannt (Bild 15). Ein Hauptpunkt auf dem Ellipsoid (alte Sternwarte von Bern) wird bei der Abbildung des Ursprungs (mit Offset: Y_{Ost} = 600 000 m und X_{Nord} = 200 000 m) des Koordinatensystem in der Ebene gelagert.

Auf der Landeskarte der Schweiz (z.B. Massstab 1:25 000) befinden sich zwei verschiedene Koordinatenangaben:

1. die auf die Ebene projizierten Landeskoordinaten (***X*** und ***Y*** in Kilometern) mit zugehörigem Gitternetz und
2. die geographischen Koordinaten (Länge und Breite in Grad und Sekunde) bezogen auf das Bessel-Ellipsoid.

Zusammenfassung:
Vom Satelliten bis zur Position

Bis zur Ausgabe der Positionskoordinaten müssen die Laufzeiten von vier Satelliten bekannt sein. Erst dann wird über umfangreiche Be- und Umrechnungen die Position in den schweizerischen Landeskoordinaten ausgegeben (Bild 16).

Umrechnung von Koordinatensystemen

Umrechnung von kartesischen zu ellipsoidischen Koordinaten: Kartesische und ellipsoidische Koordinaten können von einer Darstellung in die andere umgerechnet werden. Die Umrechnung ist aber vom Quadranten, in welchem man sich befindet, abhängig. Als Beispiel sei hier die Umrechnung für Mitteleuropa angegeben; dies bedeutet, dass die Werte von ***x, y*** und ***z*** positiv sind [8].

$$\varphi = \operatorname{atan}\left[\frac{z+\left[\left(\frac{a^2-b^2}{b^2}\right)\cdot b\cdot\left[\sin\left\{\operatorname{atan}\left(\frac{z\cdot a}{b\cdot\sqrt{x^2+y^2}}\right)\right\}\right]^3\right]}{\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)-\left(\frac{a^2-b^2}{a^2}\right)\cdot a\cdot\left[\cos\left\{\operatorname{atan}\left(\frac{z\cdot a}{b\cdot\sqrt{x^2+y^2}}\right)\right\}\right]^3}\right] \tag{17}$$

$$\lambda = \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \tag{18}$$

$$h = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\cos(\varphi)} - \frac{a}{\sqrt{1-\left(\frac{a^2-b^2}{a^2}\right)\cdot\sin^2(\varphi)}} \tag{19}$$

Umrechnung von ellipsoidischen zu kartesischen Koordinaten: Ellipsoidische Koordinaten können in kartesische Koordinaten umgerechnet werden.

$$x = \left[\frac{a}{\sqrt{1-\left(\frac{a^2-b^2}{a^2}\right)\cdot\sin^2(\varphi)}}+h\right]\cdot\cos(\varphi)\cdot\cos(\lambda) \tag{20}$$

$$y = \left[\frac{a}{\sqrt{1-\left(\frac{a^2-b^2}{a^2}\right)\cdot\sin^2(\varphi)}}+h\right]\cdot\cos(\varphi)\cdot\sin(\lambda) \tag{21}$$

$$z = \left[\frac{a}{\sqrt{1-\left(\frac{a^2-b^2}{a^2}\right)\cdot\sin^2(\varphi)}}\cdot\left(1-\left(\frac{a^2-b^2}{a^2}\right)\right)+h\right]\cdot\sin(\varphi) \tag{22}$$

Verbesserung der Messung

Die in Tabelle I (Teil 1) angegebene horizontale Genauigkeit von 100 m ist bestimmt nicht für alle Fälle ausreichend. Um zum Beispiel die Bewegung von Staumauern im Millimeterbereich zu erfassen, bedarf es eines zusätzlichen Aufwands. Grundsätzlich wird immer zusätzlich zum Anwenderempfänger ein Referenzempfänger verwendet. Dieser ist an einem genau ausgemessenen Referenzpunkt (d.h. die Koordinaten sind bekannt) lokalisiert. Durch ständigen Vergleich zwischen Anwender- und Referenzempfänger können viele Fehler (auch diejenigen der künstlichen Verschlechterung) eliminiert werden, denn es entsteht eine Differenzmessung, genannt differentielles GPS (Differential GPS, DGPS). Zwei verschiedene Prinzipien kommen zum Einsatz:

- DGPS basierend auf der Laufzeitmessung (erreichbare Genauigkeit ca. 1 m)
- DGPS basierend auf Phasenmessung des Trägersignals (erreichbare Genauigkeit ca. 1 cm)

DGPS basierend auf der Laufzeitmessung bzw. Pseudodistanz

Der Referenzempfänger empfängt die Satellitensignale und kann sofort die Differenz zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Distanz berechnen. Diese Differenz wird über eine geeignete Kommunikationsstrecke (LW, KW, UKW, Funk, Natel, Satellitenkommunikation usw.) an alle umliegenden Anwenderempfänger weitergeleitet. Wenn der Anwenderempfänger die Korrekturdaten verwendet, kann dieser den gemessenen Abstand zu allen Satelliten um den Differenzbetrag korrigieren. Auf diese Weise kann der Einfluss der künstlichen Verschlechterung SA (Selective Availability) und der Iono- bzw. Troposphäre massiv reduziert werden. Die schweizerische Landestopographie bietet in Zusammenarbeit mit der Swisscom einen solchen DGPS-Dienst an. Die Korrekturdaten werden über das UKW-Netz gesendet. In

Deutschland existiert ein DGPS-Dienst, welcher die Korrekturdaten über den Sender Mainflingen (bei Frankfurt am Main) auf LW aussendet. In beiden Fällen wird eine Genauigkeit bis in den Meterbereich erreicht.

DGPS basierend auf der Phasenmessung des Trägers

Die bei Messungen der Pseudodistanzen erreichbare Genauigkeit von 1 m genügt für die Lösung von Vermessungsproblemen noch nicht. Um die Messungen bis in den Millimeterbereich durchführen zu können, muss die Trägerphase des Satellitensignals ausgewertet werden. Die Wellenlänge λ des Trägers beträgt ungefähr 19 cm.

Die Phasenmessung ist mehrdeutig (Bild 17), da N unbekannt ist. Durch Beobachtung mehrerer Satelliten zu verschiedenen Zeiten und durch ununterbrochenen Vergleich zwischen Anwender- und Referenzempfänger (während oder nach der Messung) kann nach dem Lösen von umfangreichen Gleichungssystemen die Position im Bereich von einigen Millimetern bestimmt werden.

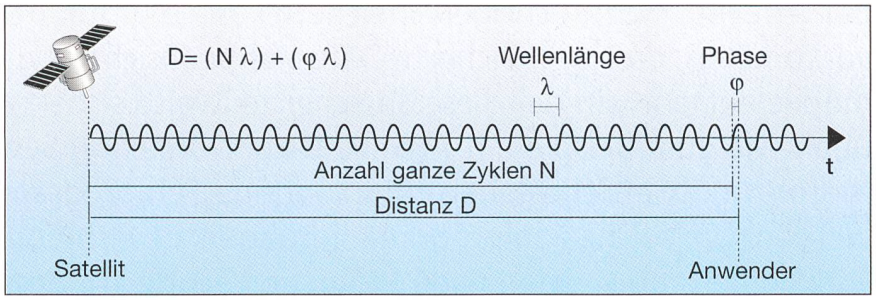


Bild 17 Prinzip der Phasenmessung

Ausblick

Am 12. August 1997 erklärte Rodney E. Slater, Sekretär des US Department of Transportation, dass Präsident Clinton die Wichtigkeit von GPS für zivile und militärische Anwender anerkenne und dass es das Ziel sei, GPS als Weltstandard zu etablieren. Aufgrund der immensen Verbreitung von GPS kann davon ausgegangen werden, dass GPS über längere Zeit zuverlässig seinen Dienst tun wird. Im Laufe der nächsten Jahre wird das US Department of Defense die künstliche Verschlechterung SA abschalten.

Es bestehen konkrete Absichten, GPS zu erweitern. In einigen Jahren werden wir von GNSS (Global Navigation Satellite System) sprechen. GNSS wird dem Anwender zahlreiche Erweiterungen zu GPS bieten, wobei GPS ein Bestandteil des gesamten Systems bleiben wird. Die USA, die Europäische Staatengemeinschaft und Japan werden GPS (und das russische Glonass) mit zusätzlichen Monitorstationen, weiteren Satelliten und DGPS-Stationen erweitern. Dadurch werden die Verfügbarkeit, die Genauigkeit und die Sicherheit der satellitengestützten Navigation und Positionierung markant verbessert.

Literatur

[6] *B. Hofmann-Wellenhof:* GPS in der Praxis, Springer-Verlag, Wien 1994, ISBN 3-211-82609-2.

[7] Bundesamt für Landestopographie: http://www.swisstopo.ch.

[8] *Elliott D. Kaplan:* Understanding GPS, Artech House, Boston 1996, ISBN 0-89006-793-7.

Du signal de satellite au positionnement sur la carte géographique

2e partie: Systèmes de référence et de coordonnées

La première partie du présent article était consacrée à une présentation de la méthode GPS, expliquant la manière dont la position est calculée à partir des signaux émis par quatre satellites. La seconde partie est consacrée avant tout à la combinaison des données géodésiques aux coordonnées géographiques, qui est indispensable pour assurer des mesures précises. On verra ensuite comment les résultats de mesure peuvent être encore largement améliorés, c'est-à-dire comment la précision peut être amenée de quelques centaines de mètres à l'ordre de grandeur de quelques millimètres, indispensable par exemple dans la mesure des mouvements de barrages.

Korrigendum zu Teil 1, Heft 3, Seite 13: Leider wurde Gleichung 10 im Druck nicht korrekt wiedergegeben. Sie lautet richtig:

$$PSR_i = R_{Ges_i} + \frac{\partial\left(R_{Ges_i}\right)}{\partial x}\cdot\Delta x + \frac{\partial\left(R_{Ges_i}\right)}{\partial y}\cdot\Delta y + \frac{\partial\left(R_{Ges_i}\right)}{\partial z}\cdot\Delta z + c\cdot\Delta t_0$$