

GPS

Global Positioning System

Positionsbestimmung

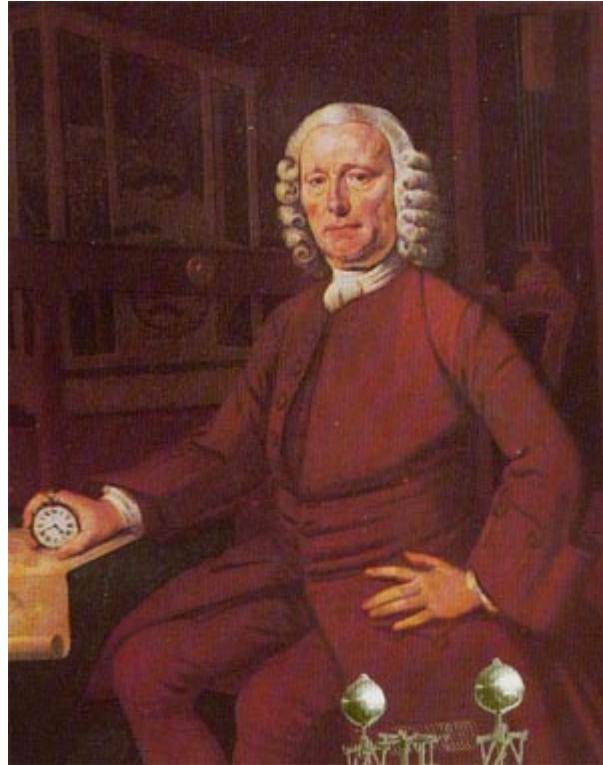


Bis zum 18. Jahrhundert war die Navigation auf den Weltmeeren weitgehend dem Zufall überlassen. Nur der Erfahrung der Kapitäne war es zu verdanken, daß die Schiffe ihren Bestimmungsort erreichten. Zu damaliger Zeit war wohl der Breitengrad bekannt, jedoch nicht der Längengrad.

Konnte die Breite anhand der Position der Sonne ermittelt werden, so musste jeder Kapitän passen, wenn es um die Bestimmung des Längengrades ging. Zu seiner Ermittlung wäre es notwendig gewesen, die genaue Uhrzeit des Heimathafens zu kennen um anhand dessen die Position endgültig bestimmen zu können.

Selbst Christopher Columbus segelte bei seiner Entdeckung Amerikas immer am Breitengrad entlang.

Positionsbestimmung früher



Als im Jahr 1714 das englische Parlament eine Belohnung von 20000 Pfund (heute wären das mehrere Millionen Euro) für denjenigen aussetzte, dem es zuerst gelänge, den Längengrad korrekt zu ermitteln, konstruierte Harrison eine Uhr, die auch an Bord eines Schiffes und in verschiedenen klimatischen Zonen präzise die Zeit anzeigen sollte.

Die Bestimmung des Längengrades mit Hilfe einer korrekten Zeitmessung erwies sich als die beste Lösung. Viele Kapitäne seiner Zeit kauften sich auf eigene Kosten diese genau gehende Uhr, um besser navigieren zu können.

Positionsbestimmung heute

Mit Hilfe der Satellitennavigation können Längengrad, Breitengrad, Höhe und Zeit bestimmt werden. Mit dem Global Positioning System (GPS, seit 1973 von den Amerikanern entwickelt und betrieben) werden überall auf der Erde folgende zwei Werte vermittelt:



1. Der genaue Standort
(Koordinaten: geographische Länge, Breite und Höhe) mit einer Genauigkeit im Bereich von 20 m bis zu ca. 1mm
2. Die genaue Zeit
(Weltzeit: Universal Time Coordinated, UTC) mit einer Genauigkeit im Bereich von 60ns bis zu ca. 5ns.

Aus den Koordinaten und der Zeit können Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung (Kurs) abgeleitet werden. Koordinaten und Zeit werden mittels 29 Satelliten bestimmt, welche die Erde umkreisen.

Das Prinzip - ein Uhrenvergleich

- Ein Zeitsender sendet im fortlaufenden Takt ein Zeitsignal aus.
- In diesem Signal sind das Datum und die genaue Uhrzeit des Senders enthalten.
- Ein entfernter Empfänger vergleicht dieses Zeitsignal mit seiner internen Uhr, die mit der des Senders genau synchronisiert ist.
- Das Signal braucht je nach Strecke eine gewisse Zeitspanne, bis es beim Empfänger angekommen ist („Blitz und Donner“).
- Diese Zeitspanne „ Δt “ ermittelt der Empfänger, indem er die Senderzeit von seiner aktuellen Zeit abzieht. Da die Zeitsignale mit Lichtgeschwindigkeit „c“ übermittelt werden, kann er seine Entfernung „s“ vom Sender bestimmen:

$$s = c \cdot \Delta t$$

(abgeleitet aus: Geschwindigkeit = Weg / Zeit)

Das Prinzip



Strecke „s“



$$s = c \cdot \Delta t$$



Ausbreitungs-
geschwindigkeit „c“



Zeitdifferenz „Δt“



Ohne eigene Uhr

- Da die Zeitinformation mit Lichtgeschwindigkeit gesendet wird (300000 km/s), sind die zu messenden Zeitdifferenzen sehr klein:
- So braucht das Licht für 1 km nur $1 / 300000$ Sekunden !
- Um diese kleinsten Zeiten zu messen, braucht man absolut genau gehende Atomuhren.
- Im Sender steckt eine solche Atomuhr, aber für den Autofahrer wäre das viel zu teuer. Deshalb verwendet man einen Trick:
- Es wird ein zweiter Sender installiert, der genau wie der erste sein Zeitsignal aussendet.
- Weiterhin ist auch bekannt, wie weit die beiden Sender voneinander entfernt sind.
- Mit diesen Informationen kann nun der Empfänger die Entfernung von den Sendern - seine Position - bestimmen, ohne eine eigene Atomuhr an Bord zu haben.

Zwei genaue Zeitsender

Abstand „A“ der Sender



Strecke „s1“

Strecke „s2“

Zeitinfo „t1“
vom Sender 1



Zeitinfo „t2“
vom Sender 2



Sender 1

Die beiden Zeitinfos kommen
im Auto zur Zeit „t0“ an



Sender 2



Beobachtungen

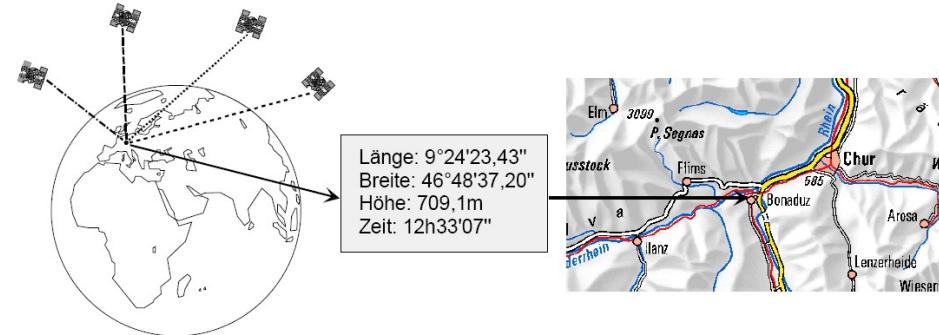
- Die empfange Uhrzeit des Senders, der weiter weg ist, liegt auch weiter in der Vergangenheit.
- Da die beiden Zeiten t_1 und t_2 im Auto zur Zeit t_0 ankommen, gilt für die jeweiligen Entfernungen der Sender vom Auto:

$$s_1 = c \cdot (t_0 - t_1) \quad s_2 = c \cdot (t_0 - t_2)$$

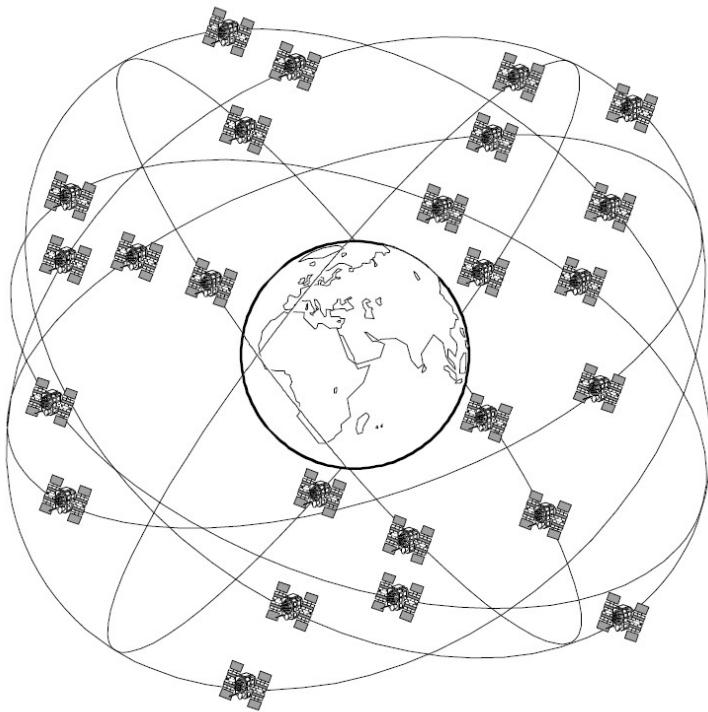
- Die Entfernung der beiden Sender voneinander ist $A = s_1 + s_2$
- Mit diesen Informationen kann nun der Empfänger die Entfernung von einem der Sender - und damit seine Position - bestimmen:
 $s_1 + s_2 = A \rightarrow s_1 = A - s_2 \rightarrow s_1 + s_1 = A - s_2 + s_1 \rightarrow 2 \cdot s_1 = A + s_1 - s_2$
 $s_1 = (A + s_1 - s_2) / 2 = (A + c \cdot (t_0 - t_1) - c \cdot (t_0 - t_2)) / 2$
 $s_1 = (A + c \cdot (t_2 - t_1)) / 2$
- Im letzten Ausdruck für s_1 tauchen nur noch die bekannte Entfernung A und die von den Sendern übermittelten Zeiten auf - die Bordzeit t_0 wird nicht gebraucht.

Folgerungen

- Um die Positionsbestimmung für eine eindimensionale Strecke durchzuführen, sind in der Realität also zwei Zeitsender notwendig.
- Dann braucht man keine eigene Atomuhr und es genügt, die Zeitdifferenzen der Sender auszuwerten.
- Für die zweidimensionale Ebene wären es folglich $2+1=3$, für den dreidimensionalen Raum $3+1=4$ Sender.
- Mit 4 Satelliten, die als Zeitsender ausgerüstet sind, lässt sich die eigene Position in Länge, Breite und Höhe bestimmen.



Die Sender des GPS



Beim Global Positioning System kreisen 29 Satelliten auf einer Höhe von 20180 km um die Erde. Auf 6 verschiedenen, zum Äquator um 55° geneigten Bahnen, umlaufen diese Satelliten in 11 Stunden und 58 Minuten die Erdkugel.

Jeder dieser Satelliten führt bis zu vier Atomuhren mit sich. Atomuhren sind zur Zeit die präzisesten Zeitgeber.

Jeder Satellit sendet auf einer Frequenz von 1575,42 MHz seine genau bekannte Position und seine exakte Bordzeit mit Lichtgeschwindigkeit zur Erde.

Weitere Positionierungs-Systeme

- Zur Zeit funktioniert nur das amerikanische System „GPS“ im vollem Umfang. Dieses System ist auch - mit gewissen Einschränkungen - für den zivilen Bereich freigegeben.
- Russland unterhält das System „GLONASS“, = Global Navigation Satellite System, das aber nicht vollständig ausgebaut ist und in erster Linie militärischen Zwecken dient.
- Europa möchte mit dem System „GALILEO“ ein eigenes militärisch/ziviles System etablieren, um vom amerikanischen GPS unabhängig zu werden.
- China hat angekündigt, ebenfalls ein globales Navigationssystem in Betrieb zu nehmen, das Beidou-2 (Kompass), bestehend aus 35 Satelliten. Der erste Satellit wurde am 2. Februar 2007 gestartet.

Systeme zur Ergänzung

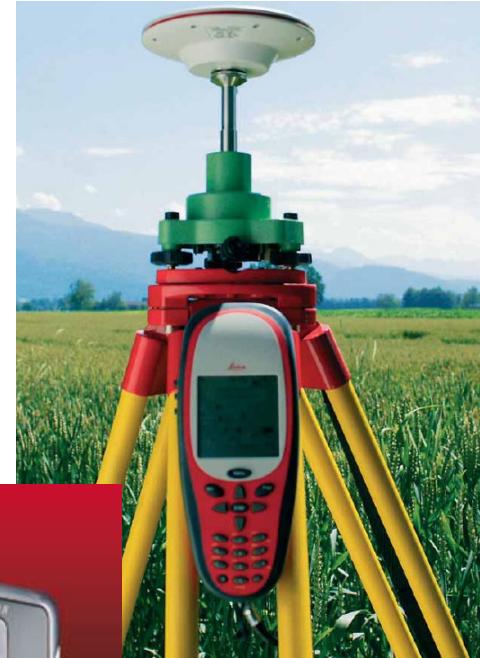
- WAAS = „Wide Area Augmentation System“ ist ein Teil des Erweiterungssystems (Satellite Based Augmentation System, SBAS) zur Verbesserung des bestehenden US-Amerikanischen GPS. WAAS-Signale werden durch einzelne Zusatzzsatelliten auf den gleichen Frequenzen wie GPS gesendet und dienen der Aufbereitung der (relativ ungenauen) GPS-Positionsangaben. WAAS wird derzeit von zwei bis drei Satelliten über dem Gebiet der USA ausgesendet und ist für alle anderen Erdregionen nicht erreichbar.
- EGNOS = „European Geostationary Navigation Overlay Service“ ist ein europäisches satellitengestütztes Erweiterungssystem zur Satellitennavigation. Seit seiner Fertigstellung 2006 steigert es über Europa die Positionsgenauigkeit der Systeme GPS und GLONASS von 10-20 Meter auf 1-3 Meter.

Einige Anwendungen des GPS

- Navigation zu Land, zur See und in der Luft
- Positionierung: Lokalisierung von Fahrzeugen, Landwirtschaft
- Landesvermessung
- Geodynamik/Geophysik: Plattentektonik, Gezeiten, Erdbeben, ...
- Überwachung von Bauwerken, Vulkanen, ...
- Bahnbestimmung von tieffliegenden Satelliten, die mit einem GPS-Empfänger ausgerüstet sind
- Erdrotationsstudien
- Informationen über die Atmosphäre: Wasserdampfgehalt in der Troposphäre, freie Elektronen in der Ionosphäre, ...

Die Empfänger des GPS

- Für Fahrzeuge
- Zum Radfahren / Wandern
- Für professionelle Messaufgaben

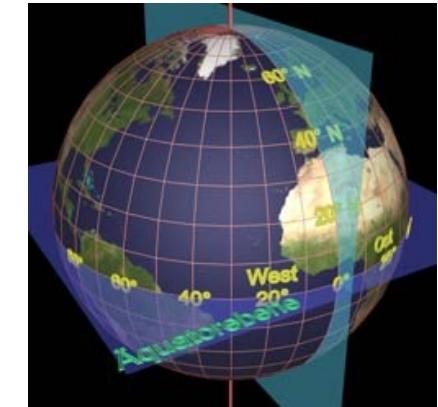


Koordinatensysteme

- Um die empfangenen Informationen auch in Orte, Wege und Richtungen umsetzen zu können, braucht man ein so genanntes „Koordinatensystem“.
- Ein Koordinatensystem hat einen festen Bezugspunkt, von dem aus in festgelegten Einheiten gemessen wird.
- Für die Positionsbestimmung gibt es sehr viele verschiedene Koordinaten- und Bezugssysteme.
- Im folgenden soll als ein fundamentales Beispiel für ein Koordinatensystem die Ortsangabe in Form von Breiten- und Längengraden betrachtet werden.

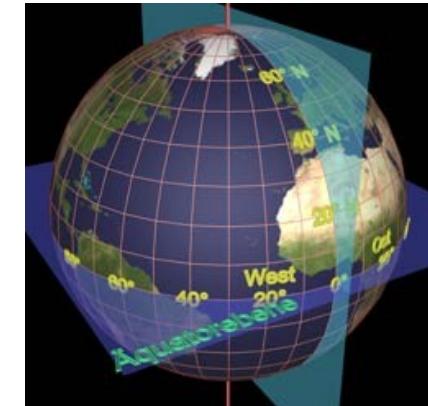
Breitengrade

- Die Erdkugel dreht sich in genau 24 Stunden einmal um ihre eigene Achse, die durch den Nord- und Südpol geht.
- In der Mitte zwischen Nordpol und Südpol befindet sich die Äquatorebene, die senkrecht zur Erdachse steht. Diese Ebene „halbiert“ sozusagen die Erdkugel.
- Die Schnittpunkte der Äquatorebene mit der Erdkugel bilden den 1. Breitenkreis.
- Ausgehend hiervon misst man den Winkel in Graden nach Norden und Süden jeweils bis 90° und gibt dies als nördliche bzw. südliche Breite an.
- Die Breitengrade haben immer den gleichen Abstand zueinander. 1° nach Norden oder Süden entspricht dabei 111 km auf der Erdoberfläche.
- Eine Bogenminute, also $1/60$ eines Breitengrades entsprechen dann 1,85 km. Dies ist gerade eine Seemeile!



Längengrade

- Für die Einteilung in Längengrade wird die Erdkugel „längs“ geschnitten - es ist so, als ob man eine Orange schält.
- Die Schnitte bilden Kreise auf der Erdkugel, die sich in den Polen treffen - die so genannten „Meridiane“.
- Da alle Meridiane - anders als bei den Breitenkreisen - gleichberechtigt sind, muss ein „Nullmeridian“ festgelegt werden. Dieser läuft historisch durch die alte Sternwarte in Greenwich, England.
- Die Längengrade werden in östlicher und westliche Richtung ausgehend vom Nullmeridian gemessen, reichen also von 180° Ost bis 180° West.
- Nur am 1. Breitengrad, dem Äquator, entspricht 1° Länge nach Osten oder Westen 111 km auf der Erdoberfläche. Geht man auf einem anderen Breitengrad 1° nach Osten oder Westen, verringert sich die Entfernung auf der Erde abhängig vom Breitengrad.



Beispiele für Ortsangaben

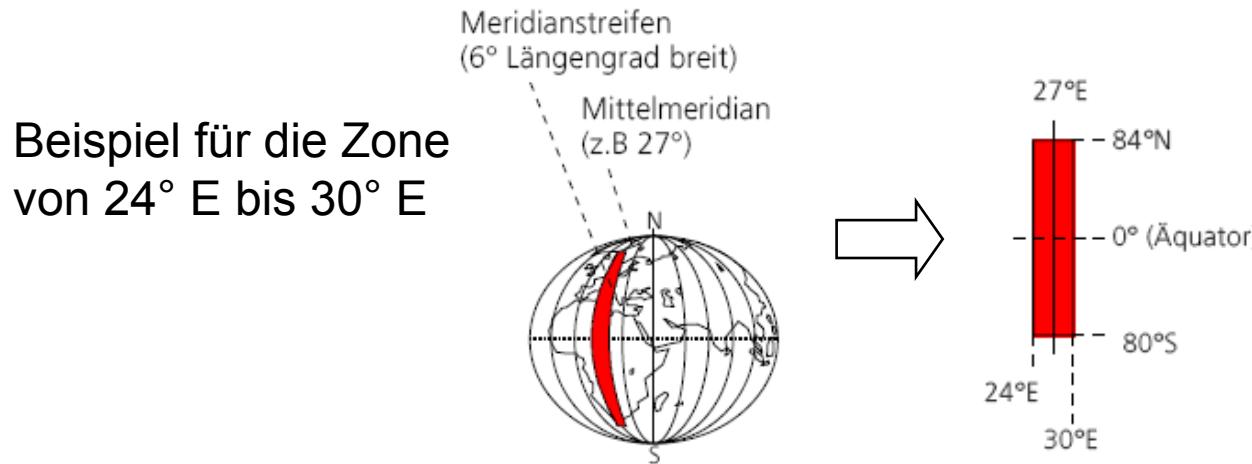
- Koordinaten von München:
48° 9' nördliche Breite, 011° 35' östliche Länge (Stadtmitte)
- Koordinaten von San Francisco:
37° 46' nördliche Breite, 122° 25' westliche Länge (Stadtmitte)
- Koordinaten von Derendingen:
48° 30' nördliche Breite, 009° 03' östliche Länge (Rathaus)

Kartensysteme

- Normalerweise führen wir auf einer Reise keine kleinen Weltkugeln mit uns, sondern faltbare Karten aus Papier oder Kartenansichten, die in elektronischen Geräten wie Handys, PDA- oder GPS-Geräten abgespeichert sind.
- Es besteht dabei nun das grundsätzliche Problem, die räumliche Weltkugeloberfläche auf ein ebenes Kartenmaterial umzusetzen. Es ist in etwa so, als ob man die Haut eines geplatzten Luftballons eben und ohne Falten auslegen wollte.
- Um die Angaben von Breiten- und Längengraden auf die Karten umzusetzen, gibt es mehrere Möglichkeiten, die Kugel auf eine Fläche zu projizieren.
- Am gebräuchlichsten sind die Mercator-Projektionen Gauss-Krüger und UTM (Universal Transversal Mercator), beides transversale Zylinderprojektionen.

UTM = Universal Transversal Mercator

- Mit der UTM-Projektion wird zunächst fast die gesamte Erdoberfläche auf 60 ebene Streifen abgebildet.
- Dabei wird die Welt in 6° breite Longitudinal-Zonen entlang den Meridianen geteilt, die von 1-60 durchnummeriert sind. Sie beginnen bei 180° W (West) und enden bei 180° E (Ost).
- Der Mittelmeridian der 1. Zone ist dann z.B. 180° W - 3° = 177° W.
- Da zu den Polen hin die Verzerrungen immer grösser werden, sind diese ausgespart.



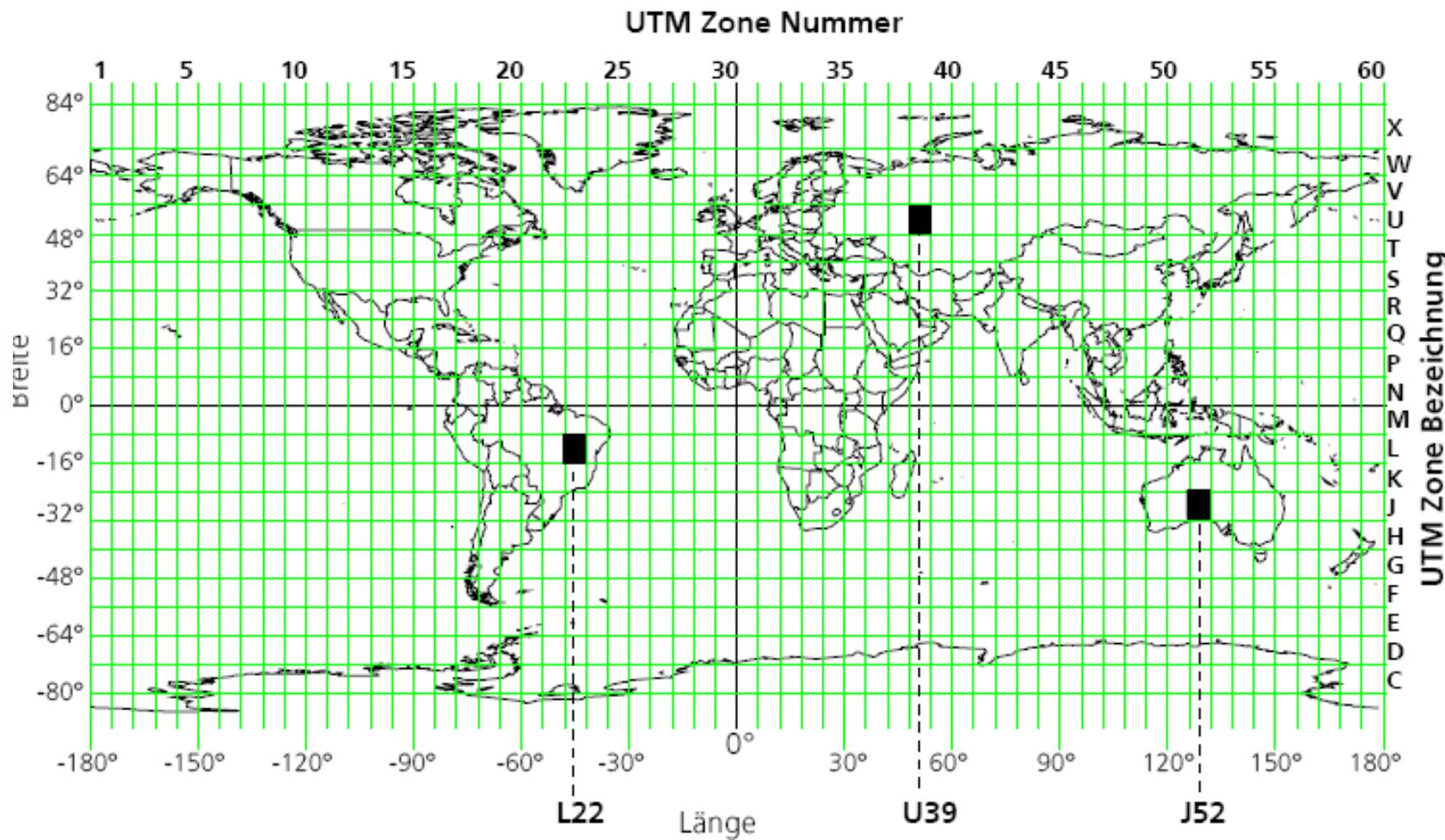
UTM Zonen

- Vom Süd- zum Nordpol werden die Längsstreifen mit einer Ausnahme in 8° Breitenstreifen unterteilt und mit Buchstaben versehen, die bei C beginnen.
- Insgesamt wird nur das Gebiet zwischen 80° Süd bis 84° Nord zugelassen. Der Breitenstreifen von 80° Süd bis 72° Süd wird „C,“ der von 72° Süd bis 64° Süd „D“ usw. genannt. Die Ausnahme bildet der Breitenstreifen X zwischen 72° Nord und 84° Nord. Er ist 12° breit.
- Damit wird ein Längsstreifen in 20 Teilstücke der Breite nach geteilt, so dass im UTM-Netz insgesamt $20 \cdot 60 = 1200$ Felder entstehen.
- Der Süd-Nord- Wert wird als Abstand des Punktes vom Äquator in Metern gemessen, wobei auf der Südhalbkugel $10'000'000$ m hinzuaddiert werden, um negative Werte zu vermeiden. Die West-Ost-Werte sind der Abstand vom Mittelmeridian, welcher den Wert $500'000$ m bekommt, zum Beispiel:

Breite/Länge (WGS 84): N $46,86074^{\circ}$ E $9,51173^{\circ}$

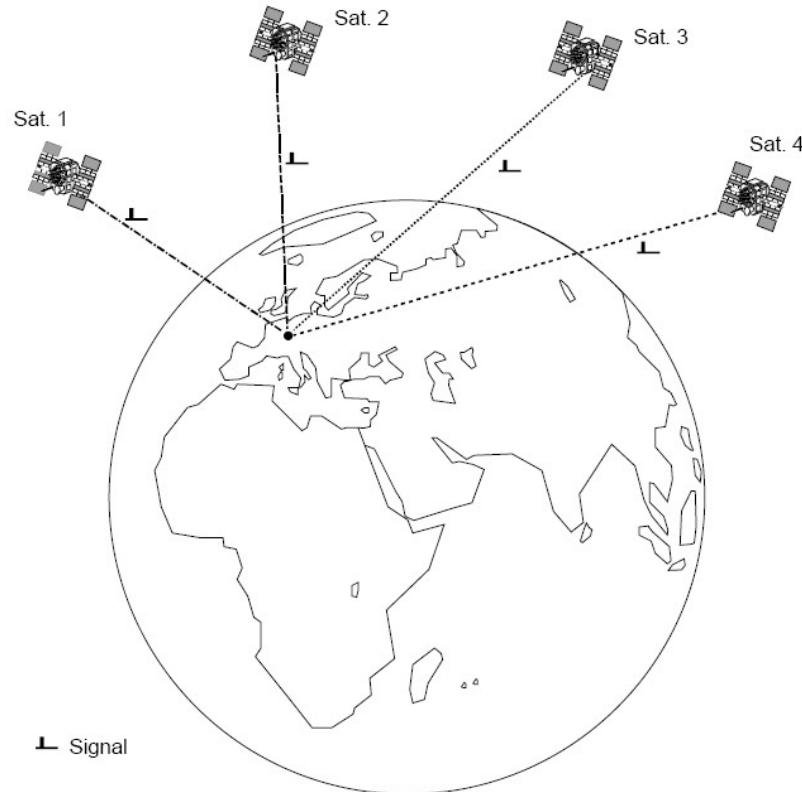
Breite/Länge (UTM: 32 T): 5189816 (N-S) 0539006 (W-E)

UTM Zonen - Beispiele



Ende

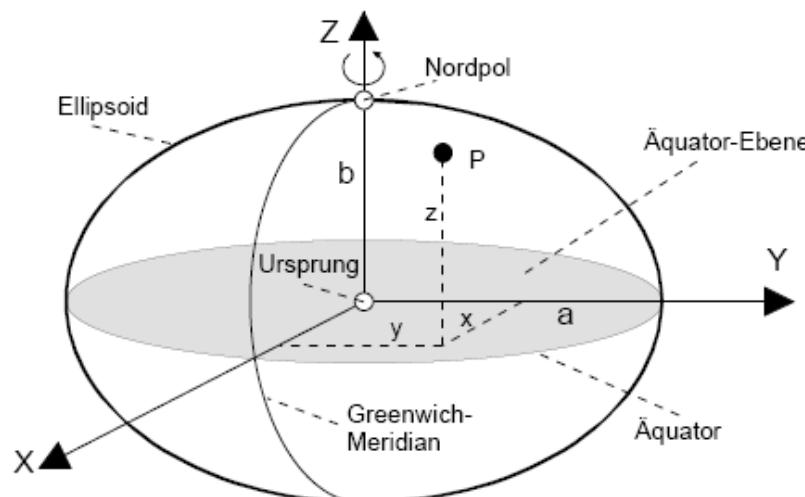
Backup



Weltweites Referenzellipsoid WGS-84

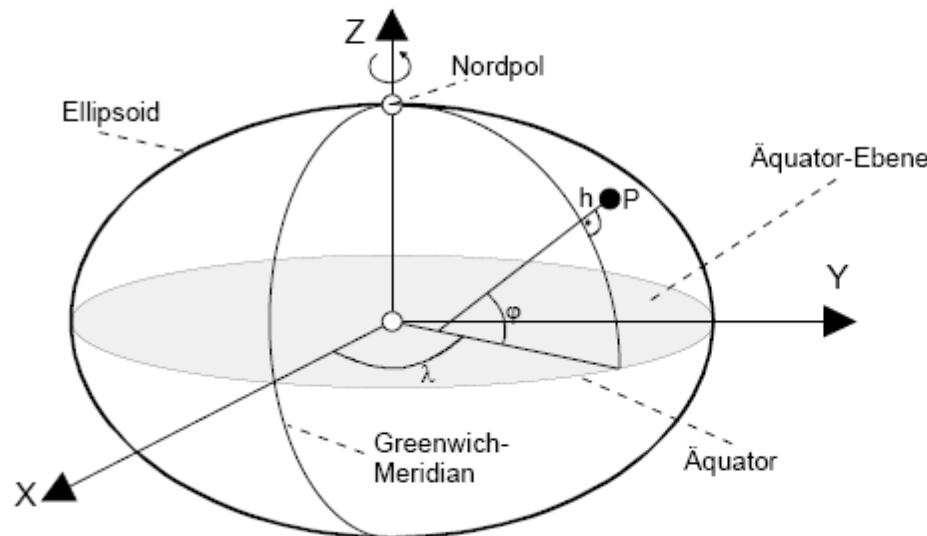
Die Angaben und Berechnungen eines GPS-Empfängers beziehen sich primär auf das Referenzsystem WGS-84 (World-Geodetic-System 1984). Das WGS-84 Koordinatensystem ist geozentrisch gelagert und nimmt an der Drehung des Erdkörpers teil. Im Englischen wird ein solches System als ECEF (Earth Centered Earth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

Die positive X-Achse des Ellipsoids (Bild →) 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 Y-Achse und geht durch den geographischen Nordpol.



Weltweites Referenzellipsoid WGS-84

Anstelle von kartesischen Koordinaten (X , Y , Z) werden in der Regel zur Weiterverarbeitung ellipsoidische Koordinaten (φ , λ , h) verwendet (Bild 51). φ entspricht dabei dem Breitengrad (Latitude), λ dem Längengrad (Longitude) und h der ellipsoidischen Höhe, d.h. die Länge des Lotes des Punktes P bis zum Ellipsoid.



Bezeichnung der
ellipsoidischen Koordinaten