

3 Arbeitsweise und Systemcharakteristiken

GNSS sollen ihren Nutzern – egal ob in Ruhe oder in Bewegung – genaue Informationen über ihre (dreidimensionale) *Position*, ihre *Geschwindigkeit* sowie über die *Zeit* überall auf oder nahe der Erde zur Verfügung stellen. Diese Informationen sollen die GNSS *ständig* liefern, unabhängig von Wetterbedingungen.

Alle zzt. verfügbaren und geplanten bzw. im Aufbau befindlichen GNSS erreichen diese Ziele durch Anwendung der Grundprinzipien, die die USA erstmalig bei ihrem satellitengestützten Navigationssystem *Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System (NAVSTAR-GPS)*, welches heute nur noch GPS genannt wird, angewandt haben. Diese Grundprinzipien sollen in diesem Kapitel beschrieben werden.

3.1 Die Systemkomponenten

Jedes moderne GNSS besteht aus den Komponenten

- Weltraumsegment,
- Bodensegment,
- Nutzersegment.

3.1.1 Weltraumsegment

3.1.1.1 Satellitenkonstellation

Wie schon im Abschnitt 1.5 erläutert, benötigt ein GNSS-Benutzer für eine dreidimensionale Ortung in *Echtzeit (Real Time)* mindestens vier Satelliten gleichzeitig.

Um eine GNSS-Ortung ständig und überall zu ermöglichen, wird also eine Satellitenkonstellation benötigt, bei der man von jedem Punkt der Erde jederzeit mindestens vier Satelliten gleichzeitig beobachten kann.

Beim Entwurf einer Satellitenkonstellation, die dieser Forderung genügt, sind unter anderem folgende Aspekte von Bedeutung (HARTL, THIEL, 1984):

- *Große Bahnhöhen* haben gegenüber kleinen Bahnhöhen den Vorzug, dass die Anzahl der benötigten Satelliten gering ist.
- *Geneigte Bahnen* haben gegenüber Polbahnen den Vorzug, dass einerseits polnahe Gebiete beobachtet werden können, aber andererseits unnötige Satellitenhäufungen an den Polen vermieden werden.
- *Gleichverteilung der Satelliten* erlaubt eine komplette Überdeckung bei minimalem Aufwand und hat zugleich den Vorzug, dass mögliche Satellitenkontakte gut überschaubar bleiben.
- *Symmetrie der Satellitenbahnen* bewirkt, dass im Mittel auf alle Satelliten die gleichen Störfaktoren wirken, sodass die Konstellation relativ stabil ist.

Die wichtigsten Systemparameter der unter Abwägung dieser und anderer Gesichtspunkte entstandenen bzw. geplanten GNSS-Satellitenkonstellationen sind in der Tabelle 3.1 zusammengestellt. Zu jedem einzelnen GNSS gehören etwa 25 Satelliten mit großen Halbachsen der Satellitenbahnen zwischen 25.000 und 30.000 km. Das entspricht dem Orbit-Typ *Medium Earth Orbit (MEO)*. Aus den großen Halbachsen können nach Formel 2.8 die Umlaufzeiten gerechnet werden. Sie liegen bei den GNSS in der Größenordnung zwischen 12 bis 14 Stunden. Die Satellitenbahnebenen sind zwischen 55° und 65° gegenüber der Äquatorebene geneigt. Bei GPS sind die Satelliten in den Bahnebenen ungleichmäßig verteilt. Bei den anderen GNSS ist eine gleichmäßige Verteilung innerhalb der Bahnebenen vorgesehen. Durch die gewählten Systemparameter ist sichergestellt, dass Nutzer eines der Systeme zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen und auswerten können.

Tabelle 3.1: Systemparameter (Sollwerte) der realisierten und geplanten GNSS

Systemparameter	GPS (USA)	GLONASS (Russland)	Galileo (Europa)	Compass (China)
Anzahl der Satelliten	24	24	27	27 + 5 + 3
Bahnebenen	6	3	3	3 / 1 / 3
Bahnneigung (Grad)	55	64,8	56	55 / 0 / 55
Große Halbachse [km]	26.560	25.508	29.601	27.480 / 42.146 / 42.146

Bei dem geplanten chinesischen System Compass gibt es eine Besonderheit. Zu Compass gehören neben 27 MEO-Satelliten fünf geostationäre Satelliten (Große Halbachse 42.146 km) und drei Satelliten vom Typ Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) (s. Abschnitt 2.1.3).

3.1.1.2 GNSS-Satelliten

In den technischen Einzelheiten sind die GNSS-Satelliten der jeweiligen Systeme selbstverständlich sehr unterschiedlich. Betrachtet man nur das äußere Erscheinungsbild, so sind viele Ähnlichkeiten festzustellen.

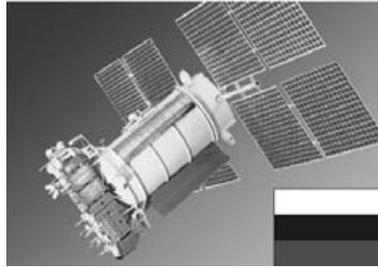
Abbildung 3.1 zeigt einige GNSS-Satelliten. Alle Satelliten werden durch Sonnenpaddel mit Strom versorgt. Die um eine Achse beweglichen Sonnenpaddel werden automatisch auf die Sonne ausgerichtet, verändern also während eines Umlaufs ihre Stellung. Bei den amerikanischen und russischen Satelliten sind die Sende- und Empfangsantennen gut erkennbar. Das wichtigste und technisch anspruchsvollste Element eines Navigationssatelliten ist seine Atomuhr. Aus Sicherheitsgründen haben die Satelliten im Allgemeinen mehrere Atomuhren an Bord. Eine Vorstellung von der Größe eines GNSS-Satelliten soll die Abbildung 3.1 vermitteln. Es zeigt den zu Galileo gehörigen Versuchssatelliten GIOVE B in der Montagehalle.

GNSS-Satelliten haben Massen zwischen 500 kg und 1.500 kg. Die Lebenszeiten der GNSS-Satelliten sind unterschiedlich. Während die GPS-Satelliten häufig länger als 10 Jahre funktionsfähig sind, litten die GLONASS-Satelliten bisher darunter, dass sie schon nach ein bis zwei Jahren nicht mehr funktionsfähig waren. Als zu erwartende Lebensdauer der moderneren GLONASS-Satelliten (Typ M) wird von Russland sieben Jahre angegeben. Die ESA geht bei den zukünftigen Galileo-Satelliten von einer Lebensdauer von 15 Jahren aus. Dies gilt auch für die modernen GPS-Satelliten.

Die Satelliten strahlen Signale aus (s. Abschnitt 2.7), die der Nutzer des Systems auszuwerten hat.



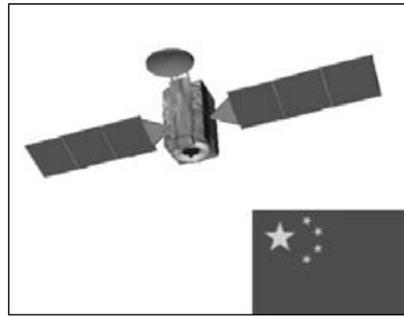
GPS: Typ II F



Glonass: Typ M



Galileo: Versuchssatellit GIOVE B



Compass

Abb. 3.1: GNSS-Satelliten

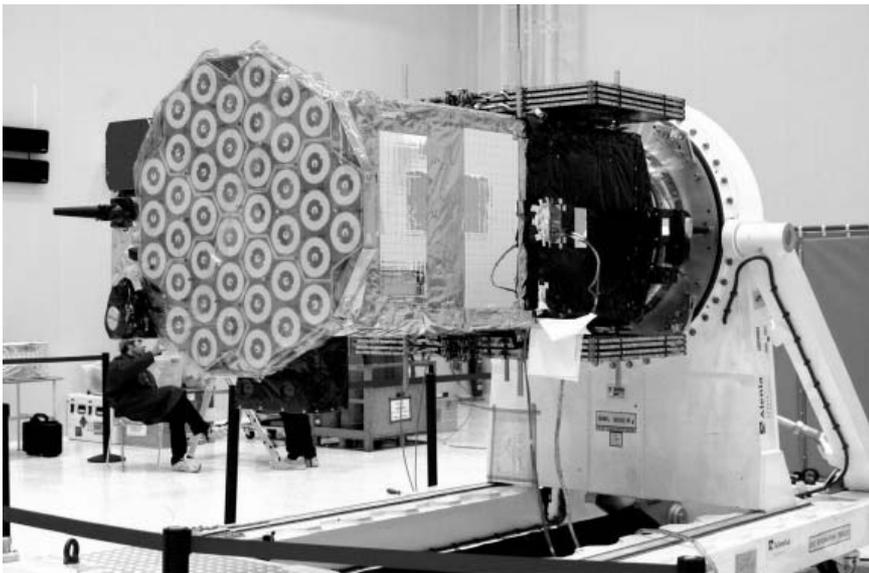


Abb. 3.2: Versuchssatellit GIOVE B in der Montagehalle

3.1.2 Bodensegment

3.1.2.1 Bodensegment der Systembetreiber

Das Bodensegment hat die Aufgabe, die GNSS-Satelliten zu überwachen. Erforderlichenfalls können die Positionen der Satelliten verändert werden. Wichtigste Routineaufgabe ist, die für die Echtzeitnavigation benötigten Navigationsdaten zu erzeugen. Dabei sind folgende Teilaufgaben zu erledigen:

- Beobachtung der Satellitenorbits und Extrapolation der Bahndaten,
- Beobachtung der Satellitenuhren und Extrapolation ihres Verhaltens,
- Übersendung der Vorhersagen über Bahndaten und Uhrenverhalten an die Satelliten zur Weitergabe an das Benutzersegment.

Zur Lösung dieser Aufgaben stehen folgende Stationen zur Verfügung:

- Überwachungsstationen:
Auf diesen Stationen werden die GNSS-Messgrößen gemessen aufgezeichnet und an die Zentralstation weitergeleitet.
- Zentralstation:
In der Zentralstation werden die von den Überwachungsstationen eingehenden Messgrößen analysiert und die Daten vorausberechnet, die die Nutzer des Systems für die Echtzeitnavigation benötigen.
- Sendestationen:
Die Sendestationen übermitteln die von der Zentralstation berechneten Daten an die Satelliten.

Die Genauigkeit der von den Bodensegmenten der Systembetreiber ermittelten Bahndaten liegt zzt. in der Größenordnung von 1 bis 2 m.

Die Anzahl der Kontrollstationen ist bei den GNSS unterschiedlich. Z. B. begnügten sich die USA bei ihrem GPS über viele Jahre mit insgesamt fünf weltweit verteilten Stationen einschließlich einer Zentralstation. Im Zuge der Modernisierung von GPS soll das Kontrollsegment auf insgesamt 17 Stationen ausgebaut werden. Schon jetzt gibt es eine zweite Zentralstation. Im Zusammenhang mit den jeweiligen Systemen werden die Bodensegmente der einzelnen GNSS beschrieben.

3.1.2.2 Ziviler Bahndienst des IGS

Die von den derzeit im Betrieb befindlichen GNSS (GPS, GLONASS) ausgestrahlten Bahndaten sind für den überwiegenden Teil seiner tatsächlichen Anwendungen – einschließlich geodätischer Anwendungen – völlig ausreichend. Nur für großräumige Aufgabenstellungen mit sehr hohen Anforderungen an die Genauigkeit (Referenznetze, geodynamische Forschung) und für einige Spezialanwendungen (z. B. Precise Point Positioning [PPP] – s. Abschnitt 3.4.3.2) werden Bahndaten höherer Genauigkeit benötigt.

Seit Anfang der 1990er-Jahre bestimmt der zivile *International GNSS Service* (IGS, siehe <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>) präzise Bahndaten, die sowohl in Echtzeit als auch mit zeitlicher Verzögerung und somit für *Postprocessing*-Anwendungen zur Verfügung stehen. Als Datengrundlage dienen die Zweifrequenz-GPS/GLONASS-Beobachtungen von etwa 400 global verteilten Stationen (Abb. 3.3), die in 24-Stunden-Blöcken von den Stationen abgerufen werden. In sieben Analysezentren in Europa und Nordamerika werden die Orbits

aller Satelliten berechnet und dann zu einer gemeinsamen Lösung zusammengefasst. Die endgültigen IGS-Orbits liegen nach etwa zwei Wochen vor und weisen eine Genauigkeit von einigen Zentimetern auf. Als schnellere Lösung werden *rapid* (IGR-) Orbits nach weniger als einem Tag veröffentlicht. Ihre Genauigkeit fällt nur wenig schlechter aus als die der endgültigen Lösung.

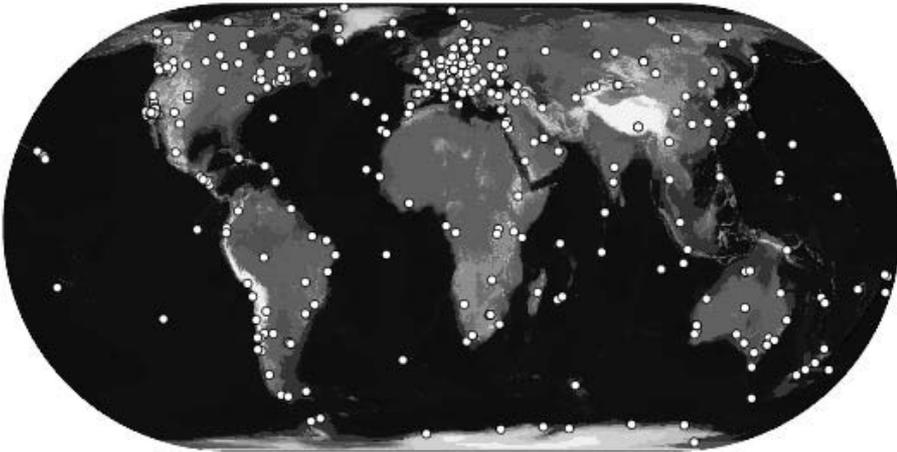


Abb. 3.3: Zur GPS-Orbitbestimmung genutzte IGS-Stationen

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die für GPS verfügbaren IGS Produkte und ihre Genauigkeit.

Tabelle 3.2: IGS GPS-Produkte

Produkt		Ultra-Rapid (vorausberechnet)	Ultra-Rapid (beobachtet)	Rapid	Final
Verfügbarkeit		Echtzeit	3 Std.	17 Std.	13 Tage
Genauigkeit	Orbit	10 cm	5 cm	< 5 cm	< 5 cm
	Uhr	< 5 ns	~ 0,2 ns	0,1 ns	< 0,1 ns
Intervall	Orbit	15 Min.	15 Min.	15 Min.	15 Min.
	Uhr			5 Min.	5 Min. / 30 s

Für GLONASS stellt die IGS mit 13-tägiger Verzögerung Ephemeriden in Intervallen von 15 Minuten und einer Genauigkeit von ~ 5 cm zur Verfügung. Ein dem IGS-Produkt „Final“ entsprechendes Produkt mit Intervallen für die Uhrenkorrekturen von fünf Minuten gibt es vom European Space Operations Center (ESOC) in Darmstadt.

Die Genauigkeit der vorausberechneten Orbits liegt im Dezimeterbereich und ist damit besser als die von den Satelliten ausgesendeten *broadcast*-Orbits.

Alle IGS-Orbittypen sind kostenlos im Internet abrufbar. Während das Internet für Postprocessing-Anwendungen das ideale Medium ist, bereitet es für Echtzeit-Anwendungen mit extrapolierten IGS-Orbits vielfach Probleme, diese am richtigen Ort und im geeigneten Format zur