

Navigation

schulinformation raumfahrt

Ein Informationsdienst des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt | www.dlr.de/schulinfo



Navigation – da denken Sie sicherlich in erster Linie an den Kapitän eines Schiffes oder an einen Flugzeugkapitän und fragen sich: „Was hat denn Navigation mit mir zu tun?“ Um diese Frage zu beantworten und Ihnen einen Einblick in die vielfältigen Anwendungsgebiete der heutigen und zukünftigen Satellitennavigation zu geben, wurde diese Schulinformation zum Thema Navigation erstellt. Sie soll Ihnen neben einem kurzen Rückblick auf die Entwicklung der Navigation die wesentlichen Grundlagen der Funkortung zur Positionsbestimmung vermitteln und einen Einblick in die Funktionsweise eines Satellitennavigationssystems geben. Ein besonderes Augenmerk gilt dem im Aufbau befindlichen europäischen Satellitennavigationssystem „GALILEO“, mit dem die europäische Industrie und Raumfahrt einen Weg beschreitet, der mit der Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen für Ortsbestimmung und Wegführung in immer weitere Kreise unseres täglichen Lebens eingreifen wird. In diesem Umfeld bieten sich für junge, technisch orientierte Menschen hervorragende Chancen der beruflichen Positionierung.

Die Ursprünge der Navigation liegen in der Seefahrt; leitet sich doch das Wort „navigieren“ vom Lateinischen ab – „navem agere“, zu deutsch „ein Schiff führen, ein Schiff lenken“. Navigation in unserem heutigen Sinne beschränkt sich bei weitem nicht mehr auf die Seefahrt, sondern auf alle Arten von Land-, See-, Luft- und Raumfahr-

zeugen. Neben der *terrestrischen* und *astronomischen Navigation* wurden mit Beginn des aufstrebenden Luftverkehrs Anfang des 20. Jahrhunderts vermehrt funktechnische Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe vor allem Luftfahrzeuge und die späteren Raumfahrzeuge ihre Position bestimmen konnten. Funktechnische Verfahren stellen auch heute noch die Grundlage der – wenngleich ein Vielfaches genaueren – neuzeitigen Satellitennavigation dar, mit der wir uns in der vorliegenden Ausgabe der Schulinformation Raumfahrt beschäftigen.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der Ursprung der Navigation – erste Instrumente – bedeutende Forscher

Die frühen Seefahrer benutzten Landmarken entlang der Küstenlinie zur Navigation. Schon früh erkannten sie, dass bei fehlender Sicht zum Land die Sterne als Hilfsmittel zur Ortsbestimmung benutzt werden konnten. Für deren Beobachtung brauchte man aber geeignete Messwerkzeuge. Bereits um 900 ermittelten die Wikinger durch die Messung des Schattenwurfes von **Sonnenuhren** die geografische Breite ihres Standortes. Der **Kompass**, der in China bereits vor über 2000 Jahren in Gebrauch war, wurde zum Auffinden der Nordrichtung benutzt, indem man in seiner frühesten Form ein Stück Magneteisen an einem Faden aufhing. Er gilt neben dem **Quadranten**, dem Vorläufer des **Sextanten**, als eines der ältesten Hilfsmittel zur Navigation. Mit Kenntnis der Nordrichtung, in welche die Nadel zeigt, konnten die Seefahrer ihren Kurs bestimmen.

Die ersten Instrumente, die speziell zur Ortsbestimmung und Navigation entwickelt wurden, waren das **Astrolabium** und der **Quadrant**. Mit dem Astrolabium wurden Winkelmessungen hinsichtlich der Sonne und Sterne durchgeführt.



Astrolabium

Mit dem Quadranten, einem Viertelkreis und einem Bleipendel, wurde die geografische Breite des Beobachters hinsichtlich des Polarsterns gemessen.

Im 16. Jahrhundert bediente man sich des **Jakobstabs** (engl.: cross staff), ein dem Zirkel ähnliches Gerät, mit welchem der Winkel zwischen Horizont und Sonne gemessen wurde, um die geografische Breite des Beobachters zu bestimmen.

Während die Bestimmung der geografischen Breite durch Messung des Winkels zum Polarstern schon frühzeitig bekannt war, machte die Bestimmung der geografischen Länge große Probleme. So konnten zur Zeit von Christopher Columbus See-



Jakobstab (Cross staff)

fahrer zwar ihre geografische Breite auf ihrem Kurs beibehalten, hatten aber keine Referenz zu ihrer Längenposition.

Für die Bestimmung der geografischen Länge benötigte man Ende des 17. Jahrhunderts eine präzise Zeitmessung, was bei **Pendeluhr**en auf hoher See zu großen Ungenauigkeiten führte. Mit der Entwicklung von **Teleskopen** konnte die Beobachtung der Gestirne intensiviert werden. So entdeckte **Galileo Galilei** die Monde des Jupiter. Aus deren Beobachtung wurde die Bestimmung der geografischen Länge abgeleitet.

Um die Wichtigkeit der Längenbestimmung zu unterstreichen, erließ die britische Regierung im Jahr 1714 den „Longitude Act“. Anfang des 18. Jahrhunderts entwickelte **John Harrison** den **Chronometer**, eine Uhr mit großer Ganggenauigkeit und Robustheit. Zur Winkelmessung kamen 1731 **Hadley's** Quadrant und als Weiterentwicklung 1751 der **Sextant** in Gebrauch. **James Cook** revolutionierte 1775 die Navigationsmethoden der Seefahrt, indem er den von John Harrison erfundenen Chronometer erstmalig einsetzte. Der Chronometer ermöglichte die bei der Längenmessung erforderliche Präzision.



Sextant

Bestimmung der geografischen Breite:

Winkelmessung mit Sextant oder Oktant zu Polarstern (Nordhemisphäre) bzw. Sternenkonstellation „Kreuz des Südens“ (Südhemisphäre).

Bestimmung der geografischen Länge:

Chronometer mit Anzeige der Uhrzeit einer bekannten Längenposition (z. B. Greenwich).

Die eigene Uhrzeit kann durch den Sonnenhöchststand (12 Uhr) festgestellt werden.

Eine Stunde entspricht 15° , da $24 \times 15^\circ = 360^\circ$.

Zeigt ein Chronometer (Anzeige der mitgeführten Greenwich-Zeit) zur lokalen Mittagszeit (12 Uhr) bereits 14 Uhr Greenwich-Zeit, so muss sich der Beobachter $2 \times 15^\circ = 30^\circ$ westlich der Länge von Greenwich befinden.

Die wesentlichsten Grundlagen der astronomischen Navigation legte **Johannes Kepler** (1571–1630) fest, indem er für alle Massen, die sich um einen Schwerpunkt bewegen, die so genannten „Kepler’schen Gesetze“ aufstellte. Diese Gesetzmäßigkeiten gelten für alle Planeten im Sonnensystem mit der Sonne als Massenmittelpunkt, aber auch für alle künstlichen Himmelskörper wie Satelliten im geozentrischen System mit der Erde (Geo) als Massenmittelpunkt (Zentrum).

Entwicklungsschritte der Navigation vom 20. Jahrhundert bis heute

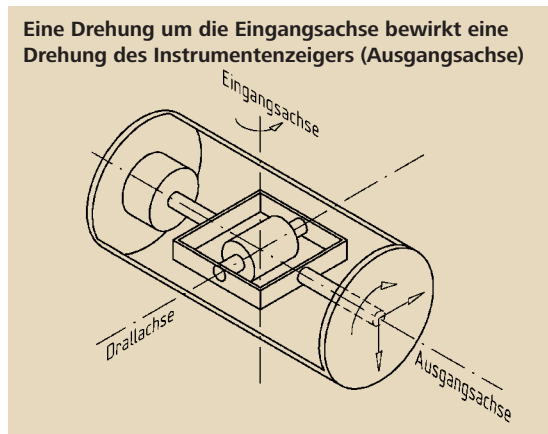
Radionavigation

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann die Entwicklung der auf Radiowellen basierenden Funknavigationssysteme, die hauptsächlich für die Navigation auf Schiffen und in Flugzeugen Verwendung fanden. Der Nachteil dieser bodengestützten Systeme war, dass diese Systeme – je nach Wahl der vom System verwendeten Wellenlänge – entweder eine große Reichweite bei geringer Genauigkeit oder aber eine geringe Reichweite bei großer Genauigkeit hatten. Bis zum heutigen Tage sind Funknavigationssysteme für unterschiedlichste Einsatzzwecke und Einsatzgebiete verfügbar.

Inertialnavigation

Die Entwicklung bordautonomer Navigationssysteme für den Luftverkehr begann nach dem 2. Weltkrieg.

Mit der Entwicklung von Trägheitsplattformen wird die Eigenschaft eines sich schnell drehenden Kreisels genutzt, seine Richtung stets beizubehalten. Auf der Trägheitsplattform wird in jeder der drei Bewegungsrichtungen des Flugzeuges (Flugzeuglängsachse, Flugzeugquerachse und Flugzeughochachse) ein Kreiselsystem installiert. Durch die Messung der jeweiligen Winkel und die Daten von Beschleunigungsmessern kann die Flugrichtung ermittelt und angezeigt werden.



Wendekreisel

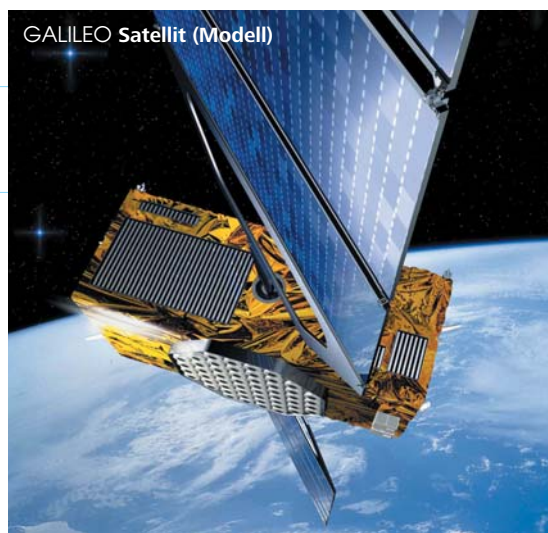
Satellitennavigation

Mit Beginn des Zeitalters der Satellitentechnik wurde im Gegensatz zu den bodengestützten Navigationssystemen die Möglichkeit geschaffen, durch ein System von Satelliten eine weltweite Überdeckung zu erreichen.

Die erste Generation eines global verfügbaren Satellitennavigationssystems stellt das US-amerikanische NAVSTAR GPS (NAVigation System using Time And Ranging – Global Positioning Systems) dar, welches in den Jahren 1978 als Versuchsserie gestartet und im Jahr 1992 komplettiert wurde. Zunächst als rein militärisches System geplant, wurde GPS mit eingeschränkter Genauigkeit auch für zivile Nutzer als kostenloser Navigationsservice verfügbar gemacht.

Mit der Entscheidung für GALILEO* als eigenständige europäische Entwicklung wird eine neue rein zivile Generation der Satellitennavigation aufgebaut, welche gegenüber GPS eine Vielzahl von Diensten für unterschiedliche Nutzergruppen bietet und durch die Vielfalt der Anwendungsgebiete ein gewaltiges wirtschaftliches und technologisches Potenzial darstellt.

Das breit gefächerte Spektrum der Nutzungsmöglichkeiten in unterschiedlichsten Einsatzbereichen reicht vom Tourismus (z. B. Outdoor-Navigation) über Anwendungen im Verkehrswesen hin zu Anwendungsgebieten in der Geodäsie, der Kartographie, der Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Wissenschaft und Forschung. Diese Bandbreite zeigt deutlich, welcher Stellenwert einem künftigen Satellitennavigationssystem zugemessen werden muss.



* Der Name für das im Aufbau befindliche europäische Satellitennavigationssystem wurde noch nicht endgültig festgelegt; bis auf weiteres, auch in dieser Schulinformation Navigation, wird das System „GALILEO“ genannt.

Grundlagen der Navigation

Koordinatensysteme

Wesentliche Grundlagen für die Ortung und Navigation sind Karten, die je nach Anwendungs- und Einsatzgebiet unterschiedlich ausgestaltet sind. Sie werden im Landverkehr (Wanderkarte, Straßenkarte), im Schiffsverkehr, in der Luftfahrt und für technisch/wissenschaftliche Anwendungsgebiete (Vermessungswesen, Geodäsie, Verkehrswegeplanung, infrastrukturelle Planungen) erstellt und basieren auf unterschiedlichen *Koordinatensystemen*.

Um einen Punkt auf einer Karte eindeutig bestimmen zu können, sind zwei Richtungswerte (Koordinaten) erforderlich. So wie in der Mathematik die x- und y-Koordinaten verwendet werden, um einen Punkt bezogen auf die Referenzachsen x und y zu definieren, so unterliegt auch den Navigationskarten ein *Kartengitter*, in welchem durch die senkrechten und waagerechten Linien jeder Punkt eindeutig bezeichnet werden kann. Die wichtigsten Koordinatensysteme sind das geografische Gitter, das geodätische Gitter und das ECEF-Koordinatensystem.

Das geografische Gitter

Das geografische Gitter teilt die Erdkugel in ein Netz von 360 Längengraden (Meridiane), die beim Nullmeridian (Greenwich, England) beginnen und von dort aus je 180° in östlicher und westlicher Richtung gezählt werden. Breitengrade beginnen am Äquator (0°) und zählen um 90° in nördlicher und 90° in südlicher Richtung. 90°N und 90°S fallen mit dem geografischen Nord- bzw. Südpol zusammen. Jedes Grad wird in 60' (Minuten) und jede Minute in 60" (Sekunden) unterteilt.

Positionsangaben haben folgendes Format:
z.B. 54° 35' 17" N · 102° 52' 03" E.

Während im geografischen Gitter alle Breitengrade den gleichen Abstand voneinander haben (1° entspricht 1/360 des Erdumfanges und damit rund 111 Kilometer), laufen die Längengrade zu den Polen hin zusammen. Hieraus ergibt sich ein Problem bei der großräumigen Kartendarstellung, da die Verzerrungen zu den Polen hin extrem zunehmen.

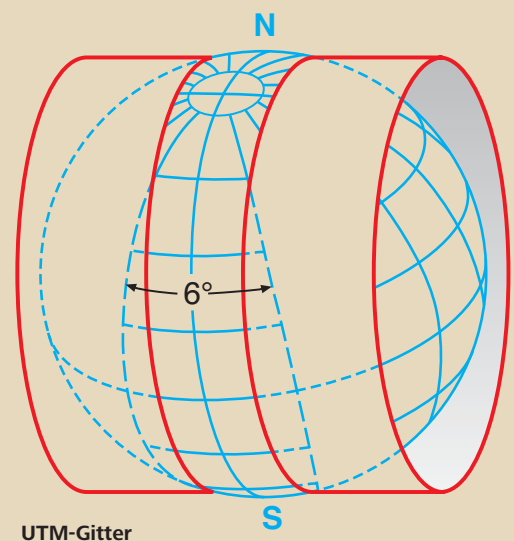
In Atlanten werden deshalb Darstellungen gewählt, die auf einen Breitengrad als Bezugsgrad aufsetzen; die Längengrade laufen nach Norden hin aufeinander zu; die Entfernung zwischen zwei Längengraden wird nach Norden hin kleiner. Um in extremen nördlichen und südlichen Breitengraden diese Verzerrungen auszugleichen, werden so genannte polständige Kartenabbildungen gewählt, die als Bezugspunkt die jeweiligen geografischen Pole haben.

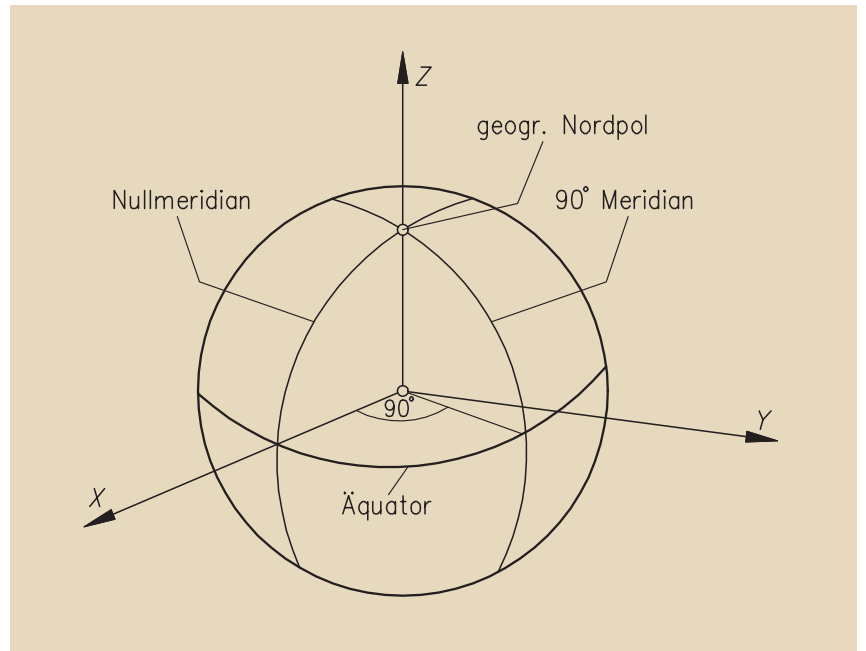
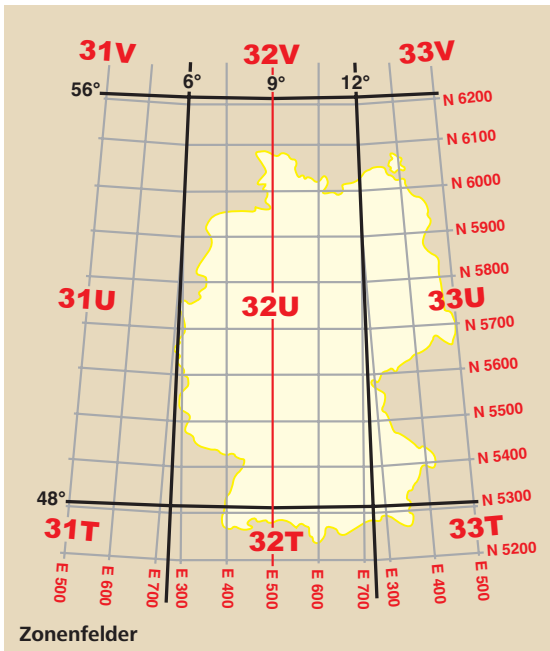
Das geodätische Gitter (UTM – Universales Transversales Mercator Gitter)

Um die Schwächen in der Darstellung des geografischen Gitters auszugleichen, wurden verschiedene rechtwinkelige Gitter (u.a. UTM) entwickelt, bei denen die einzelnen Linien überall den gleichen Abstand (Maßeinheiten: Meter bzw. Kilometer) voneinander haben. Das UTM-Gitter ist weltweit am stärksten verbreitet.

Beim UTM-Gitter wird die gesamte Erdoberfläche in 1200 einzelne festgelegte Ausschnitte unterteilt, bei denen wegen der relativ kleinräumigen Ausdehnung der Verzerrungseffekt durch die Wölbung der Erdoberfläche vernachlässigt werden kann. Die Erdoberfläche wird zerlegt in *Zonenstreifen* und *Breitenbänder*.

Das UTM-Gitter wird zunächst gebildet durch 60 von Nord nach Süd laufende Streifen (Zonen), die an der Datumslinie (180. Breitengrad) beginnen und jeweils 6° breit sind. Die Zählweise beginnt mit 1 und setzt sich in östlicher Richtung fort. Die Längsstreifen werden im Weiteren durch 20 Breitenbänder (Felder) gekreuzt, die bei 80°S beginnen und jeweils 8 Breitengrade abdecken. Die Zählweise beginnt mit dem Buchstaben C und endet beim Buchstaben X. Aus den Zonen und Feldern entstehen demnach $60 \times 20 = 1200$ Zonenfelder, die durch die Zonennummern und Breitenbandbuchstaben eindeutig gekennzeichnet werden.





Merkregel: Alle Breitenbänder der Nordhalbkugel haben Buchstaben ab „N“, alle Breitenbänder der Südhalbkugel haben Buchstaben vor „N“. Der Bezugspunkt jeder Zone liegt auf dem Mittelmeridian der jeweiligen Zone am Schnittpunkt mit dem Äquator. Gezählt wird jeweils von West nach Ost (also nach rechts) und von Süden nach Norden (also nach oben). Die Wertangaben einer Position auf der UTM-Karte nennt man deshalb auch *Rechtswert* und *Hochwert*.

Deutschland zum Beispiel liegt größtenteils in den Zonenfeldern 32U und 33U.

ECEF-Koordinaten (Earth Centered - Earth Fixed)

Hintergrund der Berechnungsalgorithmen bei Satellitennavigationssystemen (GPS, „GALILEO“) sind dreidimensionale Koordinatensysteme, die in x,y und z-Koordinaten rechnen. Die x-Achse schneidet den Nullmeridian (Greenwich) mit dem Äquator, die y-Achse schneidet den 90. Längengrad mit dem Äquator und die z-Achse verläuft durch die Pole. Vorteil dieses Systems ist, dass im Gegensatz zu den zweidimensionalen Kartensystemen auch Punkte in topografischen Senken oder Erhebungen genau beschrieben werden können und somit auch die Höheninformation mit berücksichtigt wird.

Wichtig im Zusammenspiel zwischen Kartenmaterial und Positionsbestimmung auf der Grundlage von Satellitennavigationssystemen ist das so

genannte Kartenbezugssystem oder *Kartendatum* (Map Datum). Wenn z. B. ein GPS-Empfänger die Position in der Form anzeigen soll, dass man die Längen- und Breitenanzeige in eine Karte einzeichnen kann, muss in den Rechner im GPS-Empfänger das Kartendatum eingegeben werden (in Europa gängig „Europäisches Datum“ oder „Potsdam Datum“). Über die geräteinternen Umrechnungsalgorithmen rechnet der GPS-Empfänger die ECEF-Koordinaten in das gewählte Bezugssystem um. Alle GPS-Empfänger verwenden das international standardisierte Kartendatum „WGS-84“ und das Koordinatensystem ECEF. Liegt kein Kartendatum vor, arbeitet man mit dem WGS-84 Kartendatum.

Die Angabe der „Höhe“ in der Ortung und Navigation

Zur Bestimmung der Höhe über NN bezieht man sich bei Kartenmaterial auf die Höhenangaben von markanten Punkten (meist Bergen) und auf die topografischen Höhenlinien, wie sie in Landkarten (Wanderkarten) eingezeichnet sind. Beim Einsatz von Satellitennavigationsempfängern wird neben der Positionsangabe (geografische Länge und geografische Breite) auch die Höhenangabe übermittelt; diese Angabe kann z.B. von Flugzeugen mit den bordeigenen Anzeigen des Höhenmessers abgeglichen werden.

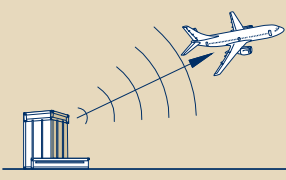
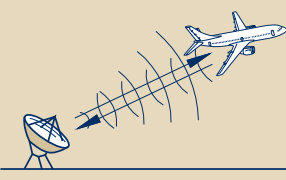


Prinzipien der Funkortung

Ortung bedeutet Ortsbestimmung durch Berechnung der aktuellen Position. Um die Position (z.B. eines Luftfahrzeuges) eindeutig bestimmen zu können, braucht man einen Referenzpunkt (z.B. eine Sendestation), dessen Koordinaten bekannt sind. Durch Ermittlung von direkter Entfernung und relativer Richtung zu diesem Sender lässt sich die eigene Position ermitteln.

Entfernungsmessung durch Laufzeitmessung von elektromagnetischen Signalen

Das grundlegende physikalische Prinzip der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen eines Senders liefert hierbei die folgenden Abschätzungen von Entfernungen zwischen Sender und Empfänger:

	A	B
Laufzeit des Signals Δt mal Lichtgeschwindigkeit c gleich Entfernung d	Laufzeitmessung zwischen Sender und Empfänger (z. B. zwischen Navigationssender am Boden und Luftfahrzeug)	Laufzeitmessung vom Sender zurück zum Sender (z. B. Primärradar)
		
Δt (Laufzeit)	$c \cdot \Delta t$	$1/2 \cdot c \cdot \Delta t$
$1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ sec}$	299,7925 m	149,8963 m

Entfernungsbestimmung durch Laufzeitmessungen

Findet der Signalaustausch zwischen Sender und Empfänger statt, so entspricht die Entfernung der Laufzeit des Signals multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit c (Spalte A).

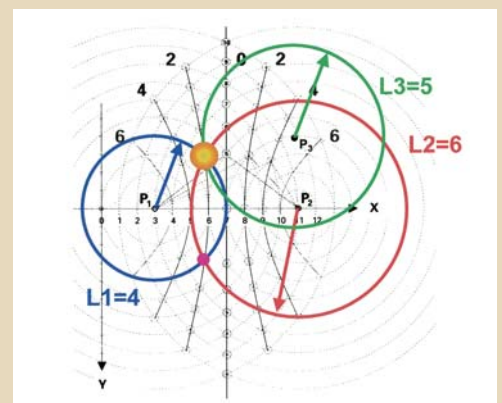
Bei Primärradarsystemen wird z.B. ein ausgesendetes Signal an einem Objekt (Flugzeug) reflektiert und trifft beim Sender wieder ein. In diesem Fall entspricht die Entfernung zwischen Sender und Objekt der halben Laufzeit des Signals multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit c (Spalte B).

Grundlagen zur Standortbestimmung (Ortung)

Zur Ermittlung des Standortes werden bei der **Triangulierung** Entfernungsmessungen zu drei Sendern durchgeführt. Die Laufzeiten der einzel-

nen Signale ergeben multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit die Schrägentfernung zwischen Sender und Empfänger.

Im ebenen Fall (drei bodenseitige Sendestationen) ergibt sich der Standort aus dem gemeinsamen Schnittpunkt von drei Kreisen, die um die Sender gezogen werden. Die Radien der Kreise entsprechen den aus der Laufzeit der Signale errechneten Entfernungen. In der nebenstehenden Abbildung ergeben sich aus der Entfernungsmessung zu Sender BLAU und Sender ROT zwei mögliche Standorte. Durch die Hinzunahme der Entfernungsinformation zu Sender GRÜN wird diese Zweideutigkeit aufgelöst; der Standort des Empfängers ist eindeutig bestimmt. Wenn die Position jedoch hinreichend bekannt ist, lässt sich bereits mit zwei Sendestationen der Standort ermitteln, indem der zweite Schnittpunkt als Lösung ausgeschlossen wird.



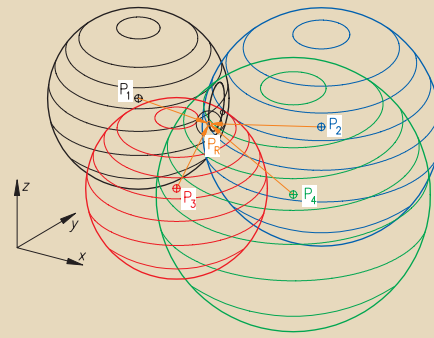
Positionsbestimmung aus Laufzeitmessung zu drei Sendern

Im räumlichen Anwendungsfall (vier Satelliten) ergibt sich der Standort aus dem gemeinsamen Schnittpunkt von vier Kugeln, die um die Sender gezogen werden. Die Radien der Kugeln entsprechen den aus der Laufzeit der Signale errechneten Entfernungen.

In Anlehnung an die Triangulierung bedeutet

Quadrangulierung, dass Signale von vier Sendern aufgenommen werden. Dies führt zu einer eindeutigen Lösung (Laufzeitmessungen zu nur drei Satelliten führen nur zu einer Zweideutigkeit des Ergebnisses, wobei aber auch hier eine der beiden Lösungen als unwahrscheinlich ausgeschlossen werden kann).

Wenn neben den Koordinaten der Sender (x, y, z) auch die Uhrzeit im Signal aufmoduliert ist, kann durch die Auswertung von vier Sendesignalen eine mathematische Gleichung mit vier Unbekannten gelöst werden, und das Ergebnis ist der aktuelle Standort und die Zeit.



Positionsbestimmung im räumlichen Fall

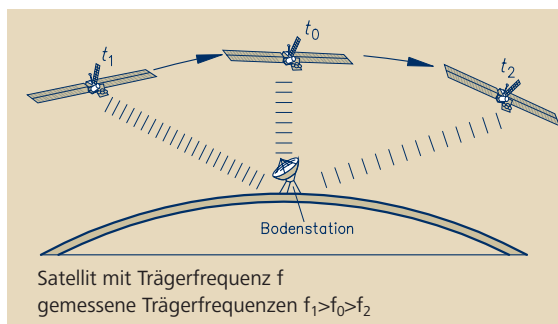
Angewandte Methoden der Funkortung

In der Funkortung werden Positionsbestimmungen aus Entfernungsmessungen (engl.: *range*) gewonnen. Hierzu gibt es unterschiedliche Verfahren:

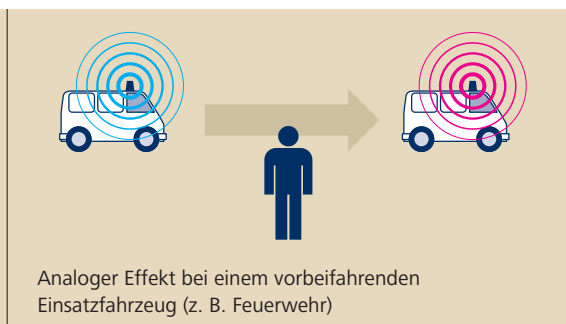
1. **Two-Way-Ranging** (Zweiweg-Entfernungsmessung)
Messung der Laufzeit des Signals vom bodenseitigen Sender zum Satelliten und zurück.
2. **One-Way-Ranging** (Einweg-Entfernungsmessung) mit Uhr- und Laufzeitmessung
Messung der Signallaufzeit vom Satelliten zum bodenseitigen Empfänger. Dieses Verfahren wird bei GPS und „GALILEO“ verwendet. Zur Messung der Laufzeit des Signals ist eine Uhrensynchronisation erforderlich.

3. One-Way-Ranging (Einweg-Entfernungsmessung) mittels Dopplerverfahren

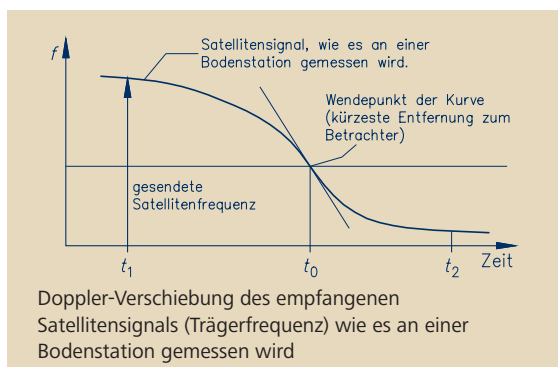
Mit dem Dopplerverfahren wird die Entfernung von einer Messstation zu einem Satelliten mit bekannter Position zum Zeitpunkt t_0 , dem Zeitpunkt der größten Annäherung an den Beobachter, durch Messung der Änderung der Trägerfrequenz des Satelliten berechnet. Dies klingt kompliziert, doch wir alle erleben dieses Phänomen unbewusst tagtäglich. Folgendes Beispiel soll Ihnen den Zusammenhang näher bringen: Fährt ein PKW hupend an einem Beobachter vorbei, so registriert dieser eine starke Veränderung der Frequenz des Huptions: In der Phase der Annäherung ist die am Standort des Beobachters messbare Frequenz höher, in der Phase des Sichertfernens niedriger als die abgestrahlte Senderfrequenz.



Satellit mit Trägerfrequenz f
gemessene Trägerfrequenzen $f_1 > f_0 > f_2$



Analoger Effekt bei einem vorbeifahrenden Einsatzfahrzeug (z. B. Feuerwehr)



Doppler-Verschiebung des empfangenen Satellitensignals (Trägerfrequenz) wie es an einer Bodenstation gemessen wird

Bei der Annäherung eines Satelliten bezogen auf einen beliebigen Punkt auf der Erde kann durch Messung der Trägerfrequenz der Zeitpunkt t_0 bestimmt werden, an welchem die Änderung der Trägerfrequenz am größten ist. Dieser Zeitpunkt bestimmt gleichzeitig den Punkt der größten Annäherung des Satelliten an die messende Station bzw. den Beobachter. Die vom Satelliten gesendete Trägerfrequenz bleibt natürlich konstant, nur die am Boden gemessene Frequenz variiert.

Das Prinzip des Doppler-Effektes

Notwendigkeit der Zeitsynchronisation

Da aus der Laufzeit des Satellitensignals die Schrägentfernung vom Satelliten zum Empfänger errechnet wird, ist die hochgenaue Zeithaltung zwischen Satellitenuhr und Empfängeruhr von

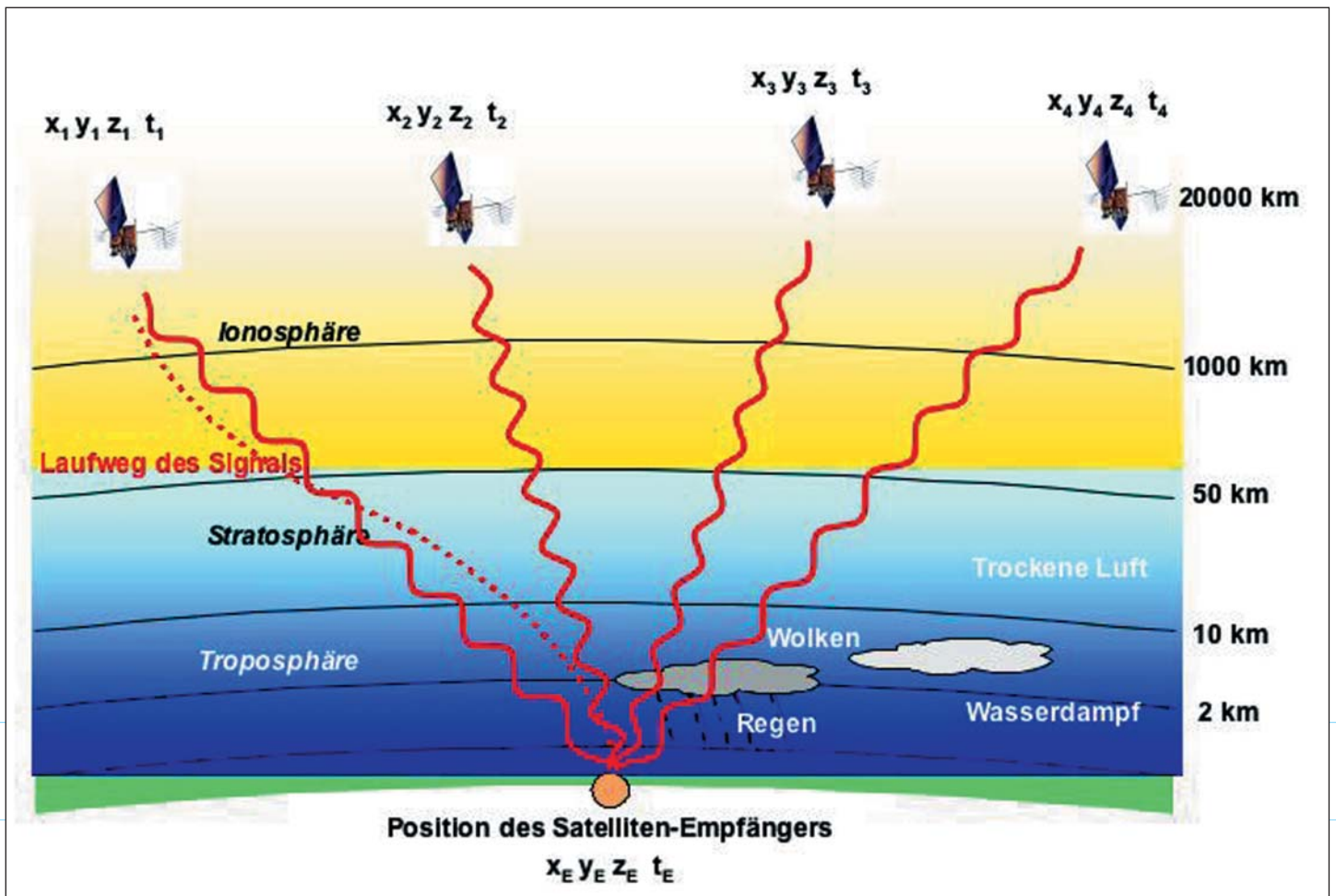
großer Bedeutung. Eine genau festgelegte, sich periodisch wiederholende Zahlensequenz wird in extrem kurzen Zeitabständen vom Satelliten gesendet. Die genaue Zeithaltung dieser Signale wird durch Atomuhren gewährleistet. Auch im Navigationsempfänger am Boden wird ein genaues Zeit-

signal mitgeführt, welches von einer Quarzuhr generiert wird. Ebenso läuft im Empfänger zeitgleich wie im Satelliten dieselbe Zahlensequenz ab. Im Empfänger trifft jedoch die vom Satelliten gesendete Zahlensequenz durch die Laufzeit des Signals zeitversetzt ein. Die Signallaufzeit ist proportional zur Entfernung. Aus dem Vergleich des Versatzes der beiden Zahlensequenzen ermittelt der Rechner im Empfänger die Zeitdifferenz und damit die Laufzeit des Signals vom Sender zum Empfänger, woraus die Schrägentfernung Satellit – Empfänger berechnet wird.

Wegen der hohen Relativgeschwindigkeit des Satelliten müssen relativistische Effekte (Einsteins Relativitätstheorie) berücksichtigt werden. Die Uhr im Satelliten muss zur Kompensation dieser Effekte um den Faktor $4,45 \cdot 10^{-10}$ verlangsamt werden. Die Uhrensynchronisation wird durch die Einbeziehung eines vierten Satelliten in die Messungen erreicht. Damit lässt sich mathematisch ein Gleichungssystem mit den drei unbekannt Koordinaten des Empfängerstandortes (x_E , y_E und z_E) sowie als vierte Unbekannte der Zeit im Empfänger t_E aufstellen und lösen.

Das Prinzip der Satellitennavigation und die wesentlichen Einflussgrößen auf die Messgenauigkeiten

- Messung der Signallaufzeiten zu mindestens vier Satelliten zur Bestimmung der Koordinaten des Empfängerstandortes und der Zeit im Empfänger
- Geometrie der Satellitenpositionen und der Empfängerposition zueinander (Dilution of Precision)
- Verlängerung des Signalweges und damit der Laufzeit durch atmosphärische Brechung (Refraction)
- Einflüsse der Dämpfung des Signals durch Wettereinflüsse in der Troposphäre



Prinzip der Satellitennavigation; Signalweg und Einflussgrößen

Grundlagen der Satellitennavigation

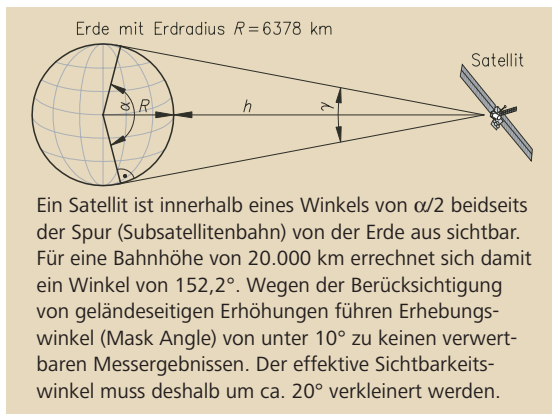
Ortungs- und Navigationsverfahren hatten in den frühen Zeiten der funktechnischen Verfahren den Nachteil, dass sie bedingt durch die Positionierung der landgebundenen Bodenstationen keine weltweit in gleichem Maße verfügbare und zuverlässige Abdeckung hatten. Dieser Nachteil konnte nur durch ein satellitengestütztes System umgangen werden.

Bahnhöhe

Die Bahnhöhe ergibt sich aus einer Gesamtbewertung folgender Abhängigkeiten:

- je größer die Bahnhöhe, desto größer die Sichtbarkeitsfläche
- je größer die Bahnhöhe, desto weniger Satelliten sind erforderlich (Einsparung jedoch minimal)
- je weniger Satelliten im Orbit (bei größerer Bahnhöhe), desto anfälliger ist das Gesamtsystem bei Ausfall eines einzelnen Satelliten
- je niedriger die Bahnhöhe, desto mehr Satelliten werden für die Überdeckung benötigt, ohne dass die Verfügbarkeit des Gesamtsystems steigt

Sichtbarkeitsbereich



Sichtbarkeitsbereich in Abhängigkeit der Bahnhöhe

Bahnebenen

Satelliten werden je nach Aufgabengebiet auf unterschiedlichen Bahnebenen positioniert.

GEO = geostationärer Orbit	<ul style="list-style-type: none"> – Nachrichten- oder Kommunikationssatelliten, die eine bestimmte Fläche der Erde abdecken sollen (z. B. Ausstrahlung von Fernsehprogrammen) – Geostationäre Satelliten bewegen sich auf äquatorialen Bahnen in Höhen von ca. 36.000 km; die Umlaufgeschwindigkeit entspricht der Drehbewegung der Erde, die Satelliten behalten ihre Position relativ zur sich drehenden Erde
MEO = Medium Earth Orbit	<ul style="list-style-type: none"> – Bahnhöhen zwischen 10.000 und 20.000 km – Bahnhöhe von Navigations-Satelliten 20.230 km – 12-Stunden-Bahn – acht Satelliten pro Bahnebene – effektive Sichtbarkeit (Winkel von min. 10° über dem Horizont): $152,2^\circ - 20^\circ = 132,2^\circ$ (bei 20.000 km Bahnhöhe) – effektive Sichtbarkeitsfläche auf der Erde: 30,0 % der Erdoberfläche – Winkel zwischen Bahnebene und Äquatorebene: 55° – Abstand der drei Bahnebenen (Rektaszension): $180^\circ/3 = 60^\circ$
LEO = Low Earth Orbit	<ul style="list-style-type: none"> – Satelliten mit Bahnhöhen von 700 bis 1.500 km – Sichtbarkeit nur in sehr eingeschränkten Bereichen – für Ortungs- und Navigationsaufgaben nicht nutzbar

Bahnparameter

Der Zusammenhang zwischen mittlerem Bahnradius, mittlerer Bahnhöhe, mittlerer Geschwindigkeit und mittlerer Umlaufzeit ergibt sich aus den Kepler'schen Gesetzen. Darin werden die Bahnbewegungen eines Planeten bei seinem Umlauf um die Sonne beschrieben. In Anlehnung an Sonne und Planeten folgt auch die Bahnbewegung eines Satelliten bei seinem Umlauf um die Erde diesen Gesetzmäßigkeiten.

Der Einfluss der Atmosphäre – Signaldämpfung und Refraktion

Die Atmosphäre beeinflusst zum einen durch wetterbedingte Phänomene in der Troposphäre wie Regen, Hagel, Nebel oder Schnee die Satellitensignale, indem sie zu einer Dämpfung (Abschwächung) der Signale führen. Je kleiner der vom Horizont aus gemessene Erhebungswinkel ist, desto länger ist auch der Weg der Signale durch die troposphärische Schicht der Atmosphäre und desto intensiver die Signaldämpfung.

Der zweite große Einflussfaktor wird durch die Brechung der elektromagnetischen Wellen in der Ionosphäre und Troposphäre verursacht, vergleichbar mit der Brechung von Licht beim Übergang zwischen zwei Medien. Wegen der Brechung (engl.: refraction) ergeben sich Laufzeitverzögerungen der von den Satelliten ausgestrahlten Wellen, sodass die gemessenen Entfernungen zwischen Satellit und Beobachter länger sind als die realen Entfernungen.

Auch hier gilt: Je kleiner der Erhebungswinkel (Elevationswinkel) ist, desto länger ist der Weg des Signals durch die Atmosphäre. Der Entfernungsmessfehler nimmt mit abnehmendem Erhebungswinkel vom Beobachter zum Satelliten zu.

Anwendungsgebiete für die Satellitennavigation

Die Anwendungsgebiete für den Einsatz der Satellitennavigation sind breit gefächert. Längst zählen nicht nur die ursprünglichen Einsatzbereiche wie die Schifffahrt und der Luftverkehr zu den „Nutzern“ moderner Satellitennavigationssysteme. Der Einsatz von Navigationsempfängern findet bereits in Ihrer ganz persönlichen Nähe statt, so zum Beispiel bei der Streckenführung im PKW, im Outdoor-Bereich auf Wanderungen oder Fahrradtouren und auch bei der Notruf-Lokalisierung von hilflosen Menschen.

Landverkehr

Navigation im Straßenverkehr lässt sich unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten am besten mithilfe der Satellitennavigation lösen. Hauptsächlich Navigations-Aufgaben im Straßenverkehr sind:

- Führung von einem Startpunkt zum Zielpunkt (Zielführungssystem)

Das Zielführungssystem eines herkömmlichen PKW-Navigationssystems kann z. B. auf einem PDA mit integriertem Satellitenempfangsteil realisiert werden. Ein „differenzieller Empfangsteil“ dient der Einbeziehung von Referenzstationen (mit Korrekturdaten), um die Positionsgenauigkeit, z. B. in kleinräumigen Stadtgebieten, zu erhöhen. Das Marktpotenzial in diesem Bereich resultiert bei einer Marktdurchdringung von 50 % innerhalb der nächsten zehn Jahre bei rd. 30 Millionen Fahrzeugen und einem Lebenszyklus von drei Jahren in einer Stückzahl von jährlich rd. fünf Millionen Geräten.



- Spurverfolgung (Tracking and Tracing) von Fahrzeugen im Rahmen des Flottenmanagements (z. B. im Transportgewerbe)

Beim Tracking von Fahrzeugen interessiert die Position eines Fahrzeugs nicht nur den Fahrzeugführer, sondern in besonderem Maße den Transportunternehmer, Flottenmanager und letztlich auch den Kunden (Wo befindet sich mein Paket?). Dies bedeutet, dass neben den Navigationssatelliten zur Positionsbestimmung auch noch eine Kommunikationsverbindung zur Übertragung der Positionsdaten via Mobilfunk oder einem Kommunikationssatelliten zum Transportunternehmer oder Kunden benötigt wird.



- Unterstützung eines Verkehrsleitsystems (Busse, Straßenbahnen, U-/S-Bahn)

In vielen Städten sind an Haltestellen von öffentlichen Verkehrsmitteln bereits Anzeigetafeln installiert, an denen die nächsten Abfahrtszeiten oder Verkehrsinformationen aus einer Leitstelle abgelesen werden können. Ähnlich der Spurverfolgung im Fuhrparkmanagement spielen hier mehrere Systeme zusammen:

- Positionsbestimmung mittels Nav.-Satelliten
- Einbeziehung von Korrekturdaten mittels Referenzstationen (z. B. über Radiosender)
- Daten und Sprachkommunikation über Mobilfunk zwischen Fahrzeugen und Zentrale
- Anzeige umgerechneter Entfernungsdaten in Zeitangaben auf der Anzeigetafel



Seefahrt

Die Satellitennavigation darf in der Seefahrt als primäres Navigationssystem eingesetzt werden. Wegen der wesentlich höheren Navigationsgenauigkeit ist sie den bisherigen Systemen DECCA, LORAN und OMEGA weit überlegen. Das Navigieren in Binnengewässern und Häfen ist allerdings nur möglich, wenn – bedingt durch die erforderlichen höherer Positionsgenauigkeiten – Referenzstationen verfügbar sind, die ein Korrektursignal ausstrahlen. Zukünftig werden durch den Einsatz von „GALILEO“ auch in der Seefahrt weitere grundsätzliche Verbesserungen wie zum Beispiel bei der Rettung von Schiffbrüchigen und Havaristen erreicht (SAR).



Luftfahrt

Neben den wichtigsten bodenseitigen Navigationssystemen (für Streckenflug und Landeführung) und dem bordeigenen Inertial-Navigationssystem INS wird auch die Satellitennavigation als Navigationssystem eingesetzt. Sie kann allerdings nicht als „primäres Navigationssystem“ verwendet werden, da die Genauigkeit unzureichend, die Verfügbarkeit zu gering und die Integrität des Systems nicht gegeben ist. Jedoch in der Strecken- und Anflugnavigation wird sie vorrangig eingesetzt. Obwohl die Satellitennavigation eine Reihe von Vorteilen bietet, wie z. B. durch die Definition beliebiger Wegpunkte (Waypoints), die eine flexible Flächenavigation erlauben, sind die Kriterien für Präzisionsanflüge aus genannten Gründen nicht erfüllt. Für Nicht-Präzisionsanflüge gibt es zwar einzelne nationale Festlegungen, doch eine international gültige Standardisierung ist bis heute nicht erfolgt.

Neben dem Einsatz an Bord von Flugzeugen wird die Satellitennavigation in Verbindung mit „integrierter Navigation“ – also dem Zusammenspiel mit einem anderen Navigationssystem – auch für die Flugsicherung viele Vorteile bringen, so zum Beispiel:

- eine Verbreiterung der Flugkorridore
- eine größere Präzision in den Angaben zur Position und zum Bewegungsvektor des Flugzeugs
- die Unabhängigkeit von Radargeräten
- die Unabhängigkeit von bodenseitigen Funkfeuern

In modernen Verkehrsflugzeugen werden im Flugmanagementsystem (**FMS = Flight Management System**) Satellitenempfängerdaten, differenzielle Daten aus Referenzstationen, Daten des Trägheitsnavigationssystems und Daten von „Stützsensoren“ (z. B. barometrischer Höhenmesser) in einem Bordrechner zusammengeführt und daraus die Anzeigeeinformationen für das Fluglagedisplay (**HSI = Horizontal Situation Indicator**) und weitere Anzeigen generiert.



Vermessungswesen

Im Vermessungswesen werden auch heute noch mechanische und optische Geräte eingesetzt. Mittels Satellitennavigation lassen sich bei wesentlich geringerem Personal- und Zeiteinsatz unter Einbeziehung von Differentialverfahren höhere Genauigkeiten erzielen. Im Gegensatz zu optischen Verfahren ist die satellitengestützte Vermessung nicht an bestehende Sichtverhältnisse gebunden. Die Einbeziehung von Referenzstationen, die in Deutschland unter dem Namen SAPOS (**SA**telliten**POS**itionierungsdienst) läuft, bietet dem Vermesser Genauigkeiten bis in den cm-Bereich an.



Sonstige Anwendungsbereiche

Kartografie

- Verfahren zur Vermessung von Oberflächen (Landkarten, Seekarten)
- Verfahren zur Vermessung der Struktur des Meeresbodens und zur Bestimmung von Meerestiefen

Wissenschaft und Forschung

- Seismologie
- Gletscherbeobachtung
- Strömungsmessungen in Gewässern
- Bestimmung der Lage von Raumflugkörpern (Bahnüberwachung von Satelliten)

Wirtschaft und Industrie

- Erschließungsarbeiten im Berg- und Tagebau
- Positionierung von Bohrplattformen
- Trassenführung bei Pipeline, Straßenwegen, Wasserkanälen
- Synchronisierung der Leitungsnetze von Energieversorgern



Land- und Forstwirtschaft (Precision Farming)

- Einsatzsteuerung von Erntefahrzeugen
- gezieltes Säen und Düngen, Ausbringen von Pestiziden
- Transportlenkung beim Holzeinschlag

Nachrichtentechnik

- Synchronisierung bei zeitgestaffelter Nachrichtenübertragung
- Synchronisieren von Funknetzen

Touristik/Freizeit

- Outdoor-Navigation (Tracking)
- Ballooning
- Paragliding
- Segelflug



Satellitenempfänger und deren Hauptfunktionen

Je nach Nutzergruppe werden auf dem Markt Geräte angeboten, die sich in Bezug auf Funktionalität, Bedienkomfort, Größe, Anzeige/Display-Format und natürlich auch im Preis unterscheiden.

Satelliten-Bordnavigationsempfänger (Luftfahrt)

- ① Kurzzeichen des nächsten Wegpunktes (**WPT**)
- ② Sollkurs (**BRG** = Bearing) zum Wegpunkt
- ③ Entfernung (**DST** = Distance) zum Wegpunkt
- ④ vorauss. Ankunft (**ETE** = estimated time enroute)
- ⑤ aktueller Steuerkurs (**TRK** = Track)
- ⑥ aktuelle Geschwindigkeit (**SPD** = Speed in Knoten)



Satellitenempfänger aus der Seefahrt



Satellitenempfänger im Landverkehr



Funktionsweise und Anzeigen-Systematik eines Satellitenempfängers für den Outdoor-/Tracking-Bereich

Komponente	Ausgestaltung
Antenne	integrierte Antennen (Patch-Microstrip-Antennen) oder anschließbare Außenantenne (Quadrifilar-Helix-Antennen)
Empfangs-Kanäle	Multiplex-Empfänger oder Parallel-Empfänger
Display	Ziffern-Display oder grafische Displays (s/w oder Farbe)
Tastatur	Funktionstasten (für die wichtigsten Funktionen)
Stromversorgung	Über Batterien oder Fahrzeuganschluss an 12-V-Spannungskreis
I/O Schnittstelle	Schnittstelle zwischen GPS-Empfänger und externem Rechner (PC, Laptop, Palm)

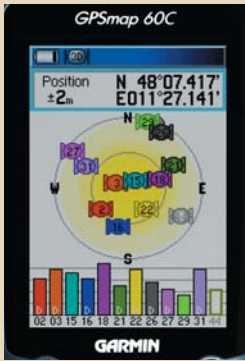




Mit der Integration von Mobilfunktelefonen und Satellitenempfängern wird es in naher Zukunft die Möglichkeit geben, den Standort des Nutzers zu ermitteln und ihm dann Mehrwertinformationen

zu übertragen, so zum Beispiel den Hinweis auf eine Sehenswürdigkeit in der Nähe des aktuellen Standortes oder auch Hinweise auf Sport- und Kulturveranstaltungen.

schulinformation räumfahrt

Grundfunktionen eines GPS-Empfängers

Seitenbezeichnung	Anzeigen/Parameter	Erläuterungen zu den Anzeigen
1. Satellitenstatus-Seite 	Statusfeld (2D/3D Navigation) Horizontalgenauigkeit EPE oder Horizontalgenauigkeit DOP Skyview-Anzeige	2D Navigation bei Empfang von 3 Satelliten 3D Navigation bei Empfang von 4 Satelliten Estimated Position Error (in m) Dilution of Precision <ul style="list-style-type: none"> • günstige Sat. Positionen: Werte 1–3 Messgenauigkeit ca. 15 m • ungünstige Sat. Positionen: Werte 4–6 Messgenauigkeit ca. 100–300 m • keine Sat. Position bestimmbar: Werte < 6 Messungen können nicht durchgeführt werden. stilisierte Darstellung des Himmels (Zenit senkrecht über dem Standort im Mittelpunkt der Anzeige) Darstellung der relativen Sat. Positionen und Sat. Nummern sowie Anzeige der „Signalstärken“ eines jeden Satelliten
2. Navigations-Seite „Kompass-Seite“ 	grafische Darstellung eines Magnetkompasses TRK (Track) BRG (Bearing) DST (Distance) SPEED Sonderfunktionen	Anzeige der Himmelsrichtungen N/E/S/W aktueller Kurs in Grad Sollkurs zum (nächsten) gewählten Wegpunkt (WPT) Entfernung zum (nächsten) gewählten Wegpunkt (WPT) aktuelle Geschwindigkeit (über Grund) z. B. Kursabweichung, geschätzte Ankunftszeit, Ziellannäherungsgeschwindigkeit
3. Karten-Seite 	Anzeige einer vereinfachten Routenskizze	momentane Position Startpunkt Zielpunkt gewählte Wegpunkte
4. Nachrichten/ Alarm-Seite	Ausgabe von Warnmeldungen bzw. Signalisierung u. a. bei Notfällen	Poor Coverage (schlechter Empfang) APP (A pproach = Annäherung an einen Wegpunkt) CDI (C ourse D eviation Indicator = Abweichung vom Kurs)

„GALILEO“ – Einordnung in die Entwicklung von Satellitennavigationssystemen

Die ersten zu Beginn der 60er-Jahre zu rein militärischer Nutzung entwickelten Satellitensysteme waren TRANSIT (USA) und TSIKADA (UdSSR). Das TRANSIT System bestand aus sechs in polaren Umlaufbahnen operierenden Einheiten, die dem Nutzer mittels Dopplermessung die Positionsbestimmung ermöglichten. Eine 3D-Positionsbestimmung war für bewegte Objekte nicht möglich.

Im Jahr 1973 begannen die USA mit der Entwicklung des GPS-Vorläufers NAVSTAR GPS (Navigation Satellites with Time And Ranging Global Positioning System); eine Parallelentwicklung der UdSSR lautete auf den Namen GLONASS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM). Das Raumsegment wurde bei GPS schrittweise auf zunächst 24 (aktuell 29) Satelliten ausgebaut, deren 12-Stunden-Orbits in Bahnhöhen von 20.200 km angesiedelt sind. Durch die spätere Freigabe einer zivilen Komponente (C/A-Code) konnten neben den Militärs nun auch privatwirtschaftliche Anwender das System nutzen, allerdings halten sich die Betreiber stets die Option offen, die Systemgenauigkeit (ca. 10–15 m) bewusst herunterzusetzen. Eine solchermaßen permanent variierende Verfälschung der Signale (Selective Availability) führt – wenn aktiviert – zu Positionsgenauigkeiten von 100 m (95%) bis zu 300 m (5%).

Mit dem Aufbau des – im Gegensatz zu GPS rein zivil organisierten – europäischen Satellitennavigationssystems „GALILEO“ wird die Qualität von Ortung und Navigation entscheidend verbessert. Ziel ist – gegenüber den bisherigen Satellitennavigationssystemen – die Verfügbarkeit des Systems zu steigern und die Messergebnisse durch eine Reihe unterschiedlicher angebotener „Dienste“ für den Anwender genauer zu machen.

Zur Geschichte:

Anfang der 90er-Jahre erwuchs bei den europäischen Verkehrsministern die Überlegung, sich aus der Abhängigkeit von einem durch die USA betriebenen Satellitennavigationssystem (GPS) zu befreien. Im Dezember 1994 wurde in einer ersten Grundsatzserklärung der EU-Kommission beschlossen, ein eigenständiges europäisches Satellitennavigationssystem zu entwickeln, welches zu keiner Zeit mit irgendwelchen Einschränkungen verbunden sein sollte und gegenüber dem US-amerikanischen GPS eine Reihe von Diensten für unterschiedliche Nutzergruppen anbieten könnte. Im Jahr 1999 wurde auf einer Konferenz der europäischen Verkehrsminister festgelegt, solch ein

europäisches System zu definieren. Im Jahr 2002 wurde die Entwicklung des Systems durch den Rat der Verkehrsminister des Europäischen Rates beschlossen.

Die Leitung des Projektes wurde bis zum Ende der Entwicklungs- und Validierungsphase auf ein **Gemeinsames Unternehmen** übertragen. Die politische Kontrolle wird über die Mitgliedstaaten der Europäischen Union und der Europäischen Raumfahrtagentur ESA ausgeübt. Die ESA selbst ist für die Entwicklung der Satelliten und der Bodenanlagen verantwortlich. Mit der Ausführung der einzelnen Aufgaben sind eine Reihe von Institutionen aus Wissenschaft, Forschung und der Industrie aus allen europäischen Ländern beschäftigt.

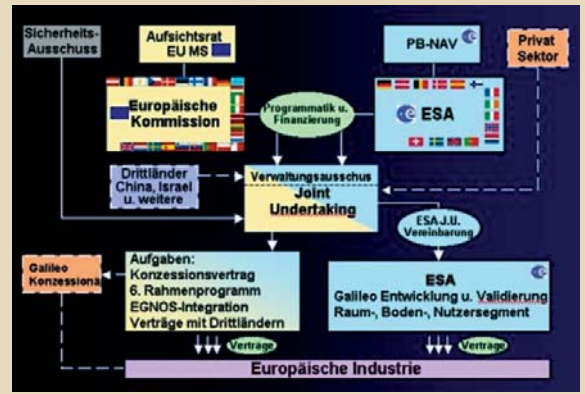
Der Zeitplan für den Aufbau von „GALILEO“ (Stand: Dezember 2004)

Definitionsphase	1999–2002
Entwicklungsphase (inkl. Funktionstest)	2002–2008
erster Satellit im Orbit	Ende 2005
weitere 3–4 Satelliten	bis 2007
Ausbau des Systems auf 30 Satelliten	2009–2010
volle Operationsfähigkeit	Ende 2010



Entwicklung, Aufbau und Betrieb von „GALILEO“

„GALILEO“ wird – laut Grundsatzklärung der EU-Kommission – als Projekt in Form einer „Public Private Partnership“ (PPP) durchgeführt. Dies bedeutet, dass sich die öffentliche Hand (Public) und die Industrie (privatwirtschaftliche Investoren) die Kosten für Entwicklung, Bau und Einschuss des Raumsegmentes, sowie den Aufbau des Bodensegmentes in einem noch festzulegendem Maße innerhalb dieser Partnerschaft teilen werden. Für den fortlaufenden Betrieb des Gesamtsystems einschließlich der Erneuerung und Modernisierung wäre ein privater Betreiber zuständig, der staatlicherseits die Konzession erhält, für bestimmte Dienste Nutzungsgebühren zu erheben. Es wird darauf hingewiesen, dass viele Voraussetzungen hierfür erst noch geschaffen werden müssen.



Stellenwert für die Europäische Industrie

Die Kosten für die Entwicklung und den Aufbau des Systems bis zur Inbetriebnahme werden derzeit auf etwa 3,2 Milliarden Euro geschätzt. Angesichts der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten lassen sich diese hohen Investitionskosten sehr schnell amortisieren.



Die europäische Raumfahrtindustrie wird im Bereich der Satellitennavigationstechnologie – vergleichbar mit der Erfolgsstory von Airbus gegenüber der Dominanz des US-amerikanischen Herstellers Boeing – zu den USA aufschließen und einen eigenen Markt entwickeln. Dieser Markt wird eine ganze Reihe von neuen Hochtechnologiefeldern erschließen, aus denen sowohl Produkte als auch Dienstleistungen resultieren. Das Spektrum reicht vom Satellitenbau über die Nachrichtentechnik, Mikroelektronik bis hin zur Raketen- und Antriebstechnik im Bereich von Trägerraketensystemen.

In vielen Bereichen der Industrie werden eine Reihe von neuen Anwendungsgebieten mit den damit verbundenen Wertschöpfungsketten geschaffen. Neben Chipherstellern werden in erster Linie die Softwareentwickler mit der Programmierung und Gestaltung anwenderfreundlicher Anwendungen beschäftigt sein. Zusätzlich werden im Rahmen des Betriebs und der vielfältigen Wartungs- und Modernisierungsmaßnahmen innerhalb des Bodensegments eine Vielzahl hochqualifizierter Arbeitsplätze in vielen Spezialdisziplinen geschaffen. Im Gesamtumfeld des zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystems wird europaweit ein Beschäftigungspotenzial von ca. 150.000 qualifizierten Arbeitsplätzen erwartet.

Deutsches Engagement

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich von Anfang an für ein europäisches System stark gemacht und immer mit vorangetrieben. Die Betei-

ligung der Bundesrepublik Deutschland bei der Entwicklung einer leistungsfähigen, innovativen und wirtschaftlich rentablen Satellitennavigation wird von staatlicher Seite vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) wahrgenommen, welches die Bundesrepublik in den verschiedenen EU-Gremien vertritt. Das DLR-Raumfahrtmanagement ist im Auftrag des BMVBW in dem auf das Thema Navigation bezogenen ESA-Gremium tätig, vor allem, um die industriellen Interessen Deutschlands zu vertreten.

Das große Engagement Deutschlands wird durch die hohen finanziellen Beiträge in der EU und der ESA unterstrichen. Damit konnte erreicht werden, dass der industrielle Hauptauftragnehmer für „GALILEO“ seinen Hauptsitz in Deutschland hat. Dadurch und mit Unterstützung von weiteren nationalen Mitteln des Bundes und der Länder will man die Chance nutzen, um in Deutschland in den zukünftigen Wertschöpfungsbereichen möglichst viele neue Arbeitsplätze entstehen zu lassen.

GATE – Test- und Entwicklungsumgebung für „GALILEO“

Für das im Aufbau befindliche Europäische Satellitennavigationssystem wird derzeit im Rahmen des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) beauftragten Vorhabens GATE eine bodengebundene Testumgebung errichtet, die sowohl die Entwickler von „GALILEO“-Empfangsgeräten als auch die Entwicklung von neuen Anwendungen der Satellitennavigation unterstützen soll. Dazu werden in einem Testgebiet in Süddeutschland von sechs erdgebundenen Sendestationen aus Signale in ein ca. 25 km² großes Areal abgestrahlt, wie sie auch später – von den echten Navigationssatelliten ausgehend – empfangen werden können. Dadurch werden Nutzern aus Industrie und Forschung im GATE-Testgebiet sehr realitätsnahe Tests von Hardware und Software bereits vor der Verfügbarkeit von „GALILEO“ ermöglicht. GATE soll im Herbst 2006 seinen Betrieb aufnehmen.

„GALILEO“ – Systembeschreibung

Das Gesamtsystem „GALILEO“ umfasst folgende *globale Komponente (Segmente)*:

Raumsegment

Das Raumsegment besteht aus einer Konstellation von Satelliten, welche die Aufgabe haben, das Navigationssignal abzustrahlen. Die Satelliten haben folgende Parameter:

23.626 km mittlere Bahnhöhe über NN (Flughöhe), im so genannten **MEO** (Medium altitude Earth Orbit)

30 Satelliten in drei Bahnebenen (jeweils zehn Satelliten pro Bahnebene, davon je ein Satellit als Reserveflugeneinheit)

Inklination der Bahnebenen (Winkel zwischen Bahnebene und Äquator): 56°

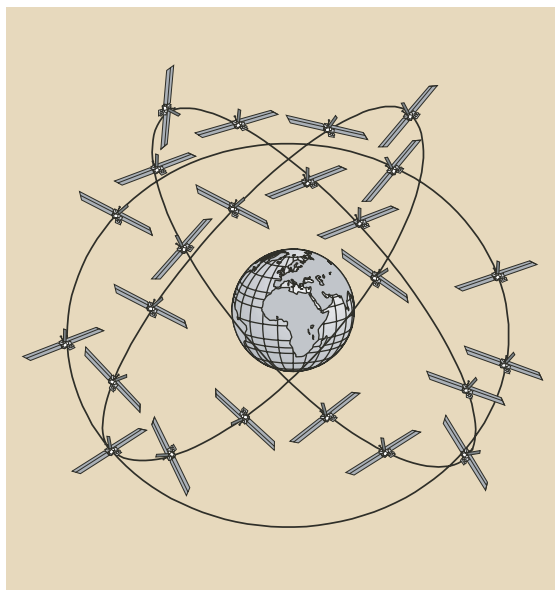
Umlaufzeit eines Satelliten: ca. 14 Stunden

Versatz der Bahnebenen zueinander: $360^\circ/3 = 120^\circ$

Lagekorrekturen der Satelliten durch chemische Triebwerke

Lebensdauer der Satelliten: ca. 12 Jahre

Einschuss durch Ariane 5 und Sojus (Kompletierung der Konstellation Ende 2010)



Bodensegment

Das Bodensegment überwacht die Satellitenkonstellation, die Bahnparameter der Satelliten, kontrolliert die Zeitsynchronisation und generiert die Navigationsinformation, welche die Satelliten abstrahlen.

Teile des Bodensegments sind im Einzelnen:

„GALILEO“-Kontrollzentrum (GCC)

In diesem Kontrollzentrum werden folgende Aufgaben wahrgenommen:

- Satellitenkontrolle (Überwachung und Aktualisierung der gesendeten Navigationsdaten)
- Missionskontrolle (Überwachung und Steuerung des Gesamtsystems)
- Bodenkontrolle (Überwachung und Steuerung aller Elemente des Bodensegments)
- Generierung der durch die Satelliten zu sendenden Informationen
- Bahnvermessung und Systemsynchronisation (Bahnparameter = Ephemeriden, Uhrenabgleich)
- Bestimmung der System-Integrität (z. B. Herausgabe von Warnmeldungen, z. B. Out of Service)
- Generierung einer stabilen und koordinierten Zeitreferenz („GALILEO“ System Time)

Kommandostationen (ULS)

Diese weltweit verteilten Kommandostationen (Mission Uplink Stations) haben die Aufgabe, Navigations- und Integritätsdaten vom GCC zu den Satelliten zu senden („uplink“).

Telemetrie-Telekommando-Kontrollstationen (TCC)

Aufgabe dieser Stationen ist der bidirektionale Austausch von Daten zwischen dem Kontrollzentrum und den Satelliten.

„GALILEO“-Mess-Stationen (GSS)

Über diese weltweit verteilten und zu einem Netzwerk zusammenschlossenen Messstationen werden Entfernungsmessungen zu den Satelliten durchgeführt und hieraus Daten zu den Bahnparametern, der Uhrensynchronisation und der Integrität gewonnen und zusammengeführt.

Nutzersegment

Das Nutzersegment beinhaltet die Gesamtheit aller (je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich konzipierten) „GALILEO“-Signalempfänger. Während bei GPS nur zwischen zivilen und militärischen Nutzern unterschieden wurde, unterscheidet das zukünftige europäische Satellitennavigationssystem die Nutzer nach der Wahl der fünf unterschiedlichen angebotenen Dienste.

„GALILEO“ – Dienste

1. Open Service (OS)

Dieser „offene Dienst“ ist kostenfrei und für jedermann frei zugänglich. Er ist nutzbar zur weltweiten Positionsbestimmung und liefert Genauigkeiten von 4 m (horizontal) und 8 m (vertikal) bei Verwendung von zwei Trägerfrequenzen; bei Verwendung von nur einer Trägerfrequenz liegen die Genauigkeiten bei 15 m (horizontal) und 35 m (vertikal).

2. Commercial Service (CS)

Als kommerziell konzipierter Dienst ist dieser kostenpflichtig, liefert jedoch durch den Zugriff auf zusätzliche Ortungssignale höhere Genauigkeiten für die Ortsbestimmung

3. Safety-of-Life Service (SoL)

Dieser „sicherheitskritische Dienst“ ist dem OS gleichzusetzen; für die Nutzung kommen jedoch nur Gruppen in Frage, die eine erhöhte Integritätsanforderung an das System haben (u. U. Zugangsbegrenzung auf die Zivilluftfahrt). Der SoL-Service muss innerhalb von 6 Sekunden einen Alarm auslösen und an die Empfänger übermitteln.

4. Public Regulated Service (PRS)

Dieser Dienst ist verschlüsselt und nur bestimmten Gruppen zugänglich (z. B. Polizei, Zivilschutz).

5. Search and Rescue Service (SAR)

Dieser Dienst soll es ermöglichen, in Notfällen die Position eines Notrufsenders zu ermitteln, den Notruf über eine Bodenstation an Rettungsdienste weiterzugeben und an den Havaristen eine Rückmeldung über die Weitergabe des Notrufs zurückzuschicken. Damit ist dieser Dienst – im Gegensatz zu den Diensten a bis d – ein bidirektionaler Nachrichtendienst.

Neben den globalen Systemkomponenten (Raumsegment, Bodensegment, Nutzersegment) gibt es noch *externe Komponenten und Schnittstellen* zu anderen Diensten:

1. Regionale Komponenten

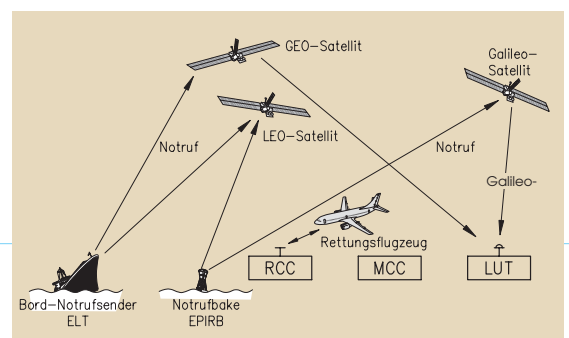
- IMS (Integrity Monitoring Stations)** messen die Integrität des Empfangssignals
- ICC (Integrity Control Centers)** übertragen die Integritätsinformation an das „GALILEO“-Kontrollzentrum
- EGNOS (European Geostationary Overlay Service)** ist ein satellitengestütztes Ergänzungssystem; es stellt von sich aus zusätzliche Informationen bereit, um den Einsatz anderer Satellitennavigationssysteme für sicherheitskritische Bereiche durch die Verbesserung der Genauigkeit, Integrität und Kontinuität zu ermöglichen.

2. Lokale Komponenten

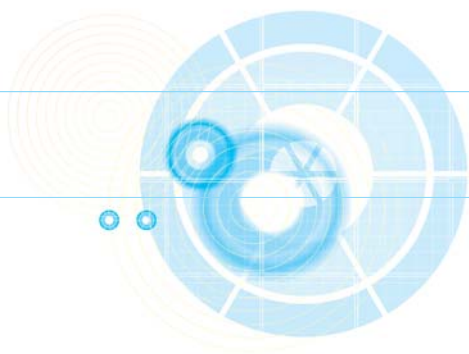
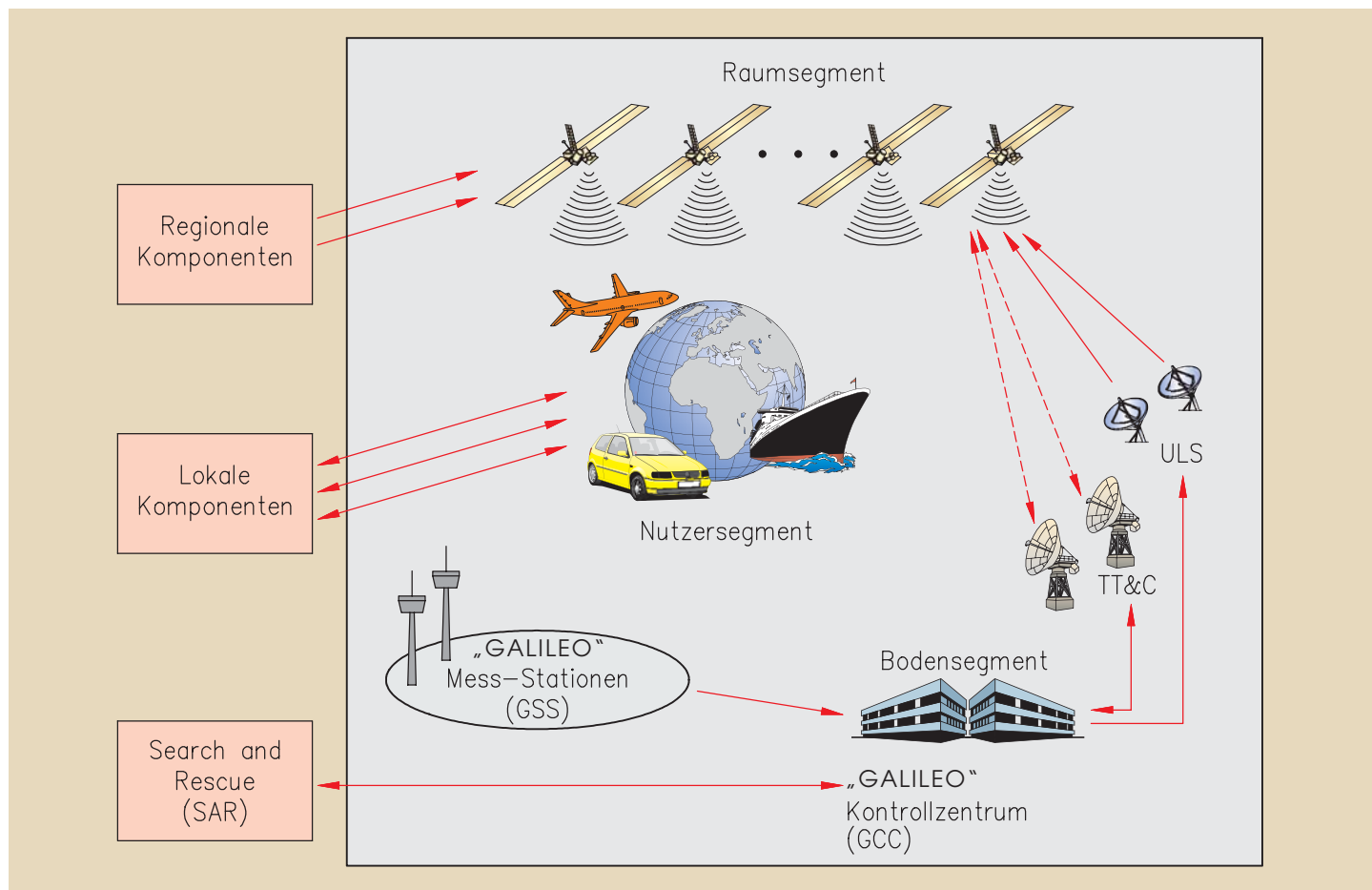
Dies sind lokale Monitorstationen, die in Bereichen unzureichender Sichtbarkeit von Satelliten (z. B. Abschattung durch Gebäude oder Gelände) bestimmten Nutzergruppen sowohl Navigationssignale als auch Integritätsinformationen liefern. Diese können z. B. durch Mobilfunk oder Radiosender übertragen werden.

3. Search and Rescue (Schnittstelle zum internationalen Such- und Rettungsdienst)

In allen Flugzeugen ist das Mitführen eines Notrufsenders (ELT = emergency locator transmitter) vorgeschrieben. Aber auch in anderen Bereichen (z. B. der Seefahrt) kommen diese Sender zum Einsatz. Die Notrufsignale werden über den internationalen Notdienst COSPAS-SARSAT durch Satelliten empfangen und an die entsprechenden regionalen Rettungsleitstellen weitergegeben. Mit der Einbeziehung von „GALILEO“ wird nun erstmals auch eine Empfangsbestätigung und Kontrollmeldung an den Havaristen zurückgegeben. Damit wird das zukünftige europäische Satellitennavigationssystem zu einem unterstützenden Teil des bestehenden Such- und Rettungsdienstes.



Einen Gesamtüberblick über die globalen Komponenten des zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystems „GALILEO“ sowie seine externen Komponenten und Schnittstellen gibt die folgende Darstellung:



Die Schulinformation Raumfahrt wird herausgegeben vom:



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

Projektleitung:

Dr. Hartmut Ripken (DLR Raumfahrtmanagement)
Yvonne Nini (DLR Raumfahrtmanagement)

Fachliche Beratung:

René Kleeßen (DLR Raumfahrtmanagement)
Dr. Dieter Hausmann (Leiter DLR_School_Lab, Oberpfaffenhofen)
Dr. Johann Furthner (DLR Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen)
Mitarbeiter des DLR_School_Lab, Oberpfaffenhofen

Pädagogische Beratung:

Dr. Winfried Schmitz (CJD Jugenddorf-Christophorusschule, Königswinter)
Dr. Joachim Wallasch (Tannenbusch-Gymnasium, Bonn)

Text: James Welker

Grafiken: Michele DiGaspare

Bildnachweis:

S. 2 (Mitte): © AKG-images, Berlin; S. 11 (oben), S. 13 (oben): © Airbus; S. 4, S. 5 (oben links): © Bayerisches Landesvermessungsamt, München; S. 1 (oben), S. 3 (unten), S. 8, S. 15, S. 16 (oben): © DLR; S. 12 (unten), S. 13 (Mitte rechts), S. 14 (oben, Mitte, unten): © GPS GmbH Gräfelfing; S. 10 (unten): © Thomas Lusmüller, ÖPNV online – Nahverkehr Frankfurt am Main; S. 1 (unten), S. 2 (oben & unten), S. 10 (Mitte) S. 11 (oben), S. 12 (oben & Mitte): © Picture-Alliance, Frankfurt am Main

Realisation und Redaktion: Bildungsverlag EINS GmbH, Troisdorf

Literaturhinweise:

- Dodel, H. & Häupler, D.: *Satellitenavigation, „GALILEO“, GPS, GLONASS, Integrierte Verfahren*. Heidelberg, 2004.
- Höh, R.: *GPS Outdoor-Navigation*. Bielefeld, 2001.
- Mansfeld, W.; *Satellitenortung und Navigation. Grundlagen & Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. 2. Auflage. Wiesbaden, 2004.
- Urban, K. & Paul, G.: *Physik im Wandel*. Hamburg, 2000.

Raumfahrt und Satellitenavigation als Thema im DLR_School_Lab Oberpfaffenhofen

Das DLR hat die so genannten DLR_School_Labs aufgebaut, in denen Schülerinnen und Schüler durch selbstständiges Experimentieren an Themenkreise aus der Luft- und Raumfahrt herangeführt werden. Diese Einrichtungen bieten einen praxisbezogenen Einblick in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Institute des DLR, die die einzelnen DLR_School_Lab-Projekte direkt betreuen. Die DLR_School_Labs sehen sich damit als Medium der Interessensweckung bei den Schülerinnen und Schülern und als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Schule. Weil der Stellenwert eines neuen europäischen Satellitenavigationssystem für die deutsche Industrie, Wissenschaft und Forschung erheblich ist, bildet die Satellitenavigation eines der Schwerpunktthemen im DLR_School_Lab Oberpfaffenhofen.



Die DLR_School_Labs erreichen Sie im Internet unter folgender Adresse:
<http://www.schoollab.dlr.de/schoollab/>

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**