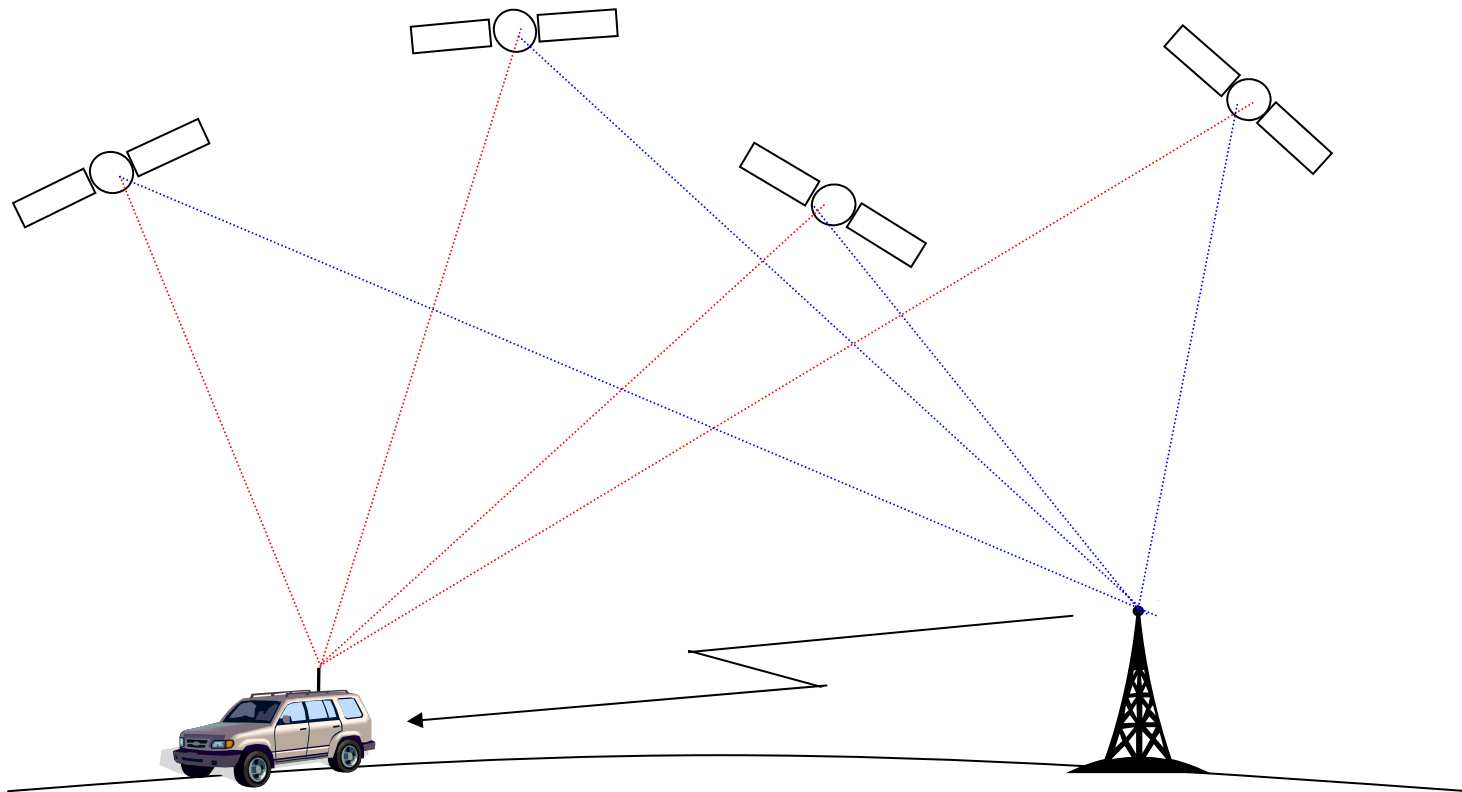


# Differentielle Satellitennavigation



# Differentielle Satellitennavigation

- Differentielle Satellitennavigation kann dadurch bewirkt werden, dass ein Satellitennavigationsempfänger nicht nur Signale von den Satelliten sondern auch über einen zusätzlichen Nachrichtenkanal von einer ortsfesten Station erhält, um auf diese Weise Korrekturen der Ortungsinformationen durchzuführen.
- Dieser Ansatz wurde zuerst beim GPS realisiert, ist aber auch für das GLONASS und GALILEO-System vorgesehen.
- Da die Entwicklung beim GPS am weitesten fortgeschritten ist, wird im Folgenden besonders das Differential-GPS betrachtet.



# Prinzip des DGPS

- Eine Ausnutzung des NAVSTAR-GPS bis zur Grenze der theoretischen Leistungsfähigkeit ist mit dem Differential-GPS (DGPS) erreichbar.
- Ziel dieses Verfahrens ist es, die Positionsgenauigkeit zu verbessern.

## **Das wird wie folgt realisiert:**

- Man positioniert einen GPS-Empfänger ortsfest an einem genau bekannten Ort. Diese genaue Position wird entweder mit Mitteln der konventionellen Vermessungstechnik oder durch einen GPS-Empfänger, der den P-Code auszuwerten vermag oder aber mindestens vier Satelliten einwandfrei empfangen kann, bestimmt.



# Prinzip des DGPS

Die Kompensation des Fehlers erfolgt in drei Phasen:

- Bestimmung der Korrekturgrößen bei der Referenzstation
- Übermittlung der Korrekturgrößen von der Referenzstation zum GPS-Anwender
- Korrektur der gemessenen Pseudostrecken beim GPS-Anwender



# Bestimmung der Korrekturgrößen

- Eine Referenzstation mit genau bekannten Koordinaten misst die Laufzeit zu allen sichtbaren GPS-Satelliten und bestimmt aus dieser Größe die fehlerbehafteten Pseudostrecken (Istwert).
- Weil die Referenzstation ihre Position genau kennt, kann sie die wahre Distanz (Sollwert) zu jedem GPS-Satelliten berechnen.
- Die Differenz zwischen wahrer Distanz und fehlerbehafteter Pseudostrecke lässt sich durch einfache Subtraktion ermitteln und entspricht einer Korrekturgröße (Differenz Soll - Istwert).



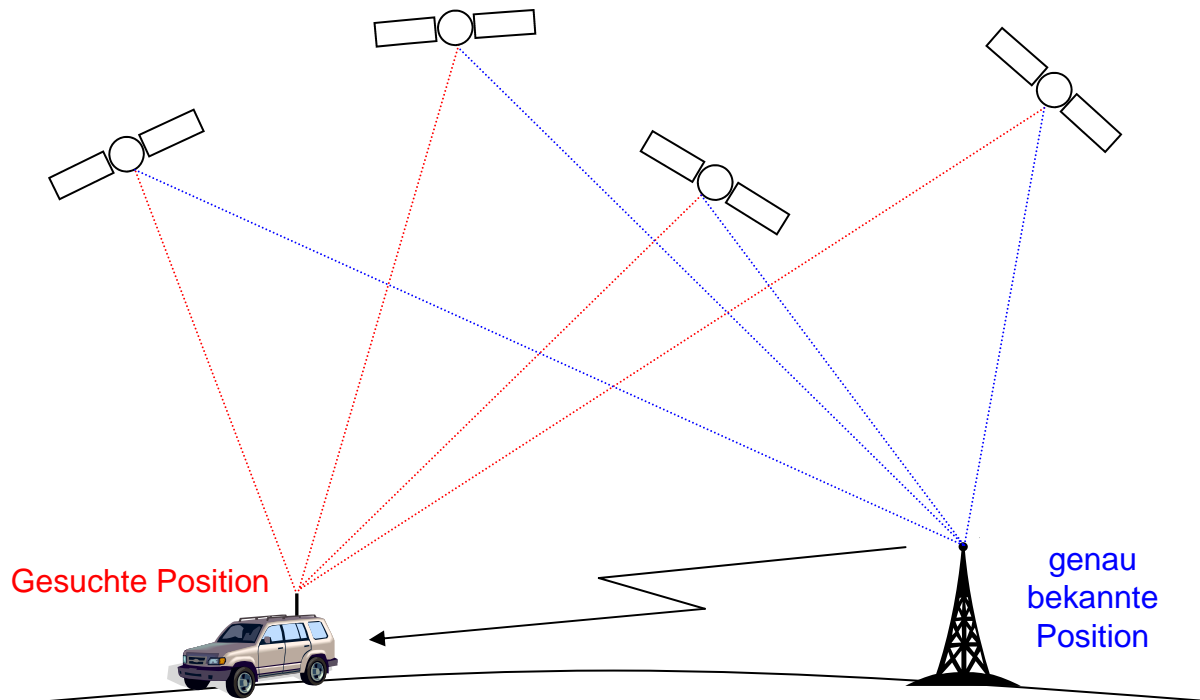
# Bestimmung der Korrekturgrößen

- Die Positionsabweichung zwischen diesem genau bekannten Ort und dem gerade ermittelten Messwert wird direkt in Echtzeit über eine Datenfunkstrecke an den Nutzer übertragen.
- Dessen GPS-Empfänger korrigiert mit diesen Daten seine eigenen, gemessenen Positionsdaten.
- Da die Fehlereinflüsse sich ständig ändern, wird die zu bestimmende Position eines Nutzers umso genauer sein, je schneller diese Korrektur nach der Fehlerermittlung durchgeführt wird.



# Bestimmung der Korrekturgrößen

Beim DGPS wird eine zu den Satellitendatenstrecken zusätzliche digitale Datenübertragungsstrecke von der Referenzstation am Boden zum mobilen Teilnehmer aufgebaut:



**Prinzip des Differential-GPS**



# Korrektur der gemessenen Pseudostrecken

- Der GPS-Anwender kann nach Empfang der Korrekturwerte die wahre Distanz aus seinen gemessenen fehlerbehafteten Pseudostrecken ermitteln.
- Aus der wahren Distanz lässt sich eine genauere Anwenderposition berechnen.
- Alle Fehlerursachen, abgesehen von jenen, die vom Empfängerrauschen und vom Mehrwegeempfang stammen, können so eliminiert werden.
- Die von den Satelliten ausgesendeten Signale werden vom Mobilempfänger und gleichzeitig von einer ortsfesten Referenzstation ausgewertet.





# Korrektur der gemessenen Pseudostrecken

- Die Referenzstation berechnet Abweichungen zwischen den eigenen Koordinaten und der gemessenen Position und erzeugt daraus ein Datenprotokoll, das sämtlichen mobilen Teilnehmern innerhalb des GPS-Systems mitgeteilt wird.
- Die Positionsgenauigkeit, die man mit einem Differential-GPS-System bei der Auswertung des C/A-Codes erreichen kann, liegt bei weniger als einem Meter,
- ... dagegen bei der Auswertung des P-Codes für militärische Anwendungen im **mm-Bereich** .



# Anforderungen an die terrestrische Datenübertragungsstrecke

- Die vorangegangene Abbildung lässt bereits anschaulich auf die allgemeinen Anforderungen schließen, die an die Datenübertragungsstrecke zu stellen sind.
- Die Datenfunkstrecke muss flächendeckend und kontinuierlich zur Verfügung stehen und zusätzlich eine hohe Datensicherheit gewährleisten (d.h., es muss eine möglichst niedrige Bitfehlerrate ( engl.: *bit error rate* BER )) gewährleistet werden.



# Datenübertragungsraten

Der Fachausschuss der DGON (Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V.) für Weltraumtechnik gibt folgende Datenraten an:

$f_B = 100 \text{ Bit/s}$  für eine Navigationsgenauigkeit von  $\leq 5\text{m}$  (mittlere Anforderung)

$f_B = 2 \text{ kBit/s}$  für eine Navigationsgenauigkeit von  $\leq 1\text{m}$  (hohe Anforderung im Submeterbereich)



# Datenprotokoll RTCM 104

- Für den Betrieb eines DGPS-Systems wurde ein spezielles Protokoll zur Übertragung aller Korrekturen von einer Feststation aus an alle DGPS-Nutzer entwickelt mit der Bezeichnung RTCM 104 (engl.: *Real-Time Correction Message ( Special Committee 104 )*).
- Bei dieser technischen Kommission handelt es sich um eine amerikanische Kommission für die Erarbeitung von Kommunikationsstandards für die US-Marine.
- Dieses Protokoll muss von allen DGPS-fähigen Empfängern verstanden werden, so dass damit eine Korrektur automatisiert durchgeführt werden kann.



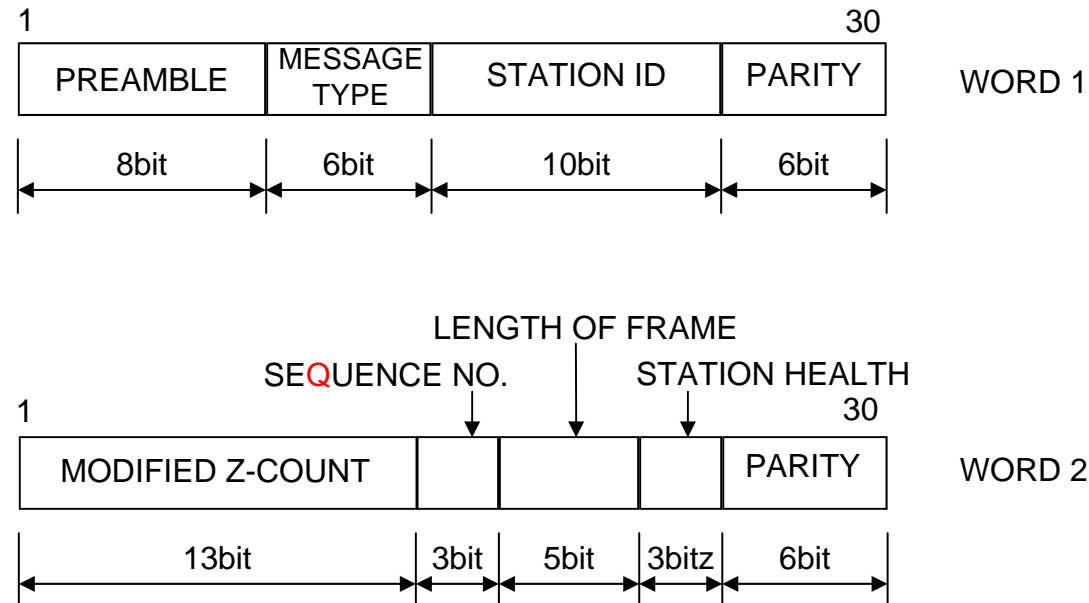
# Datenprotokoll RTCM 104

- RTCM SC-104-Standard zur Übertragung der Korrekturwerte
- RTCM SC-104 steht für „Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104“ und ist heute der weltweit anerkannte Industriestandard.
- Die RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service gibt es in zwei Versionen:
  - Version 2.0 ( herausgegeben im Januar 1990 )
  - Version 2.1 ( herausgegeben im Januar 1994 )
- Die Version 2.1 ist eine Weiterentwicklung der Version 2.0 und unterscheidet sich vor allem durch zusätzliche Informationen für die Echtzeitnavigation (engl.: *Real Time Kinematic* RTK).
- Beide Versionen haben die Aufteilung in 63 Nachrichtentypen gemeinsam, wobei die Nachrichtentypen 1, 2, 3 und 9 vor allem für Korrekturen, die auf Code-Messungen beruhen, eingesetzt werden.



# RTCM-Header

- Jeder Nachrichtentyp ist in Wörter von 30 Bits eingeteilt und beginnt jeweils mit einem einheitlichen Header von zwei Wörtern (WORD 1 und WORD 2).
- Aus den Informationen im Header ist ersichtlich, welcher Nachrichtentyp folgt und welche Referenzstation die Korrekturdaten ermittelt hat.



Aufbau des RTCM-Headers



# RTCM-Header

Inhalt	Name	Beschreibung
PREAMBLE	Preamble	Präambel
MESSAGE TYPE:	Message type	Nachrichtentyp-Identifikation
STATION ID	Reference station ID No.	Referenzstation Identifikation
PARITY	Error correction code	Parität
MODIFIED Z-COUNT	Modified Z-count	Modifizierter Z-Count, inkrementierter Zeitzähler
SEQUENCE NO.	Frame sequence No.	Sequenz-Nummer
LENGTOF FRAME	Frame length	Rahmenlänge
STATION HEALTH	Reference Station Health	Technischer Zustand der Referenzstation

**Inhalt des RTCM-Headers**



# RTCM-Nachrichtentyp 1

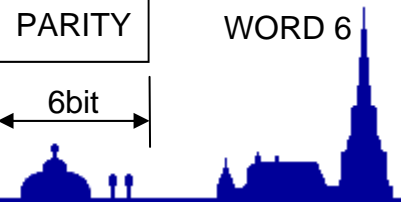
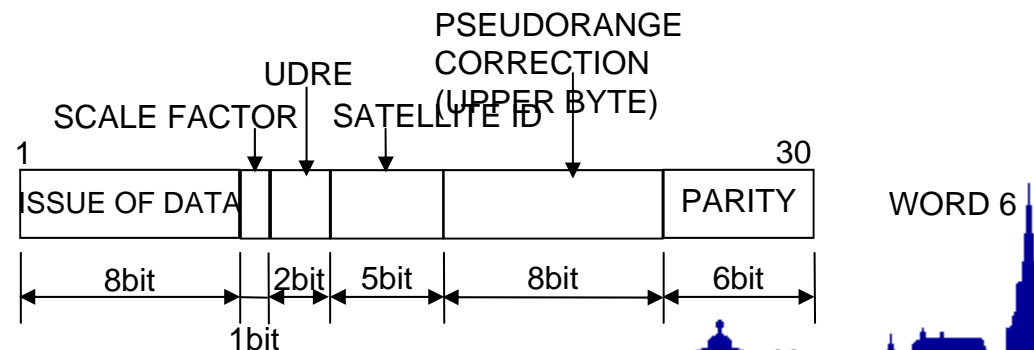
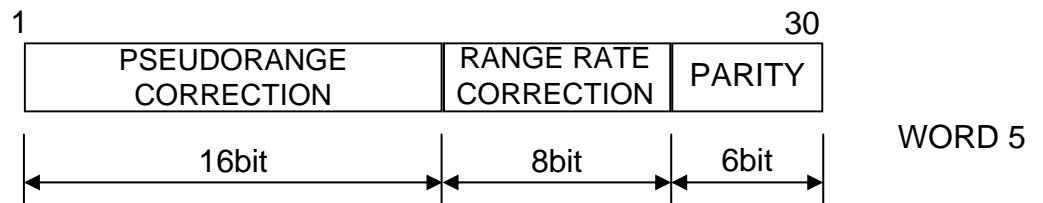
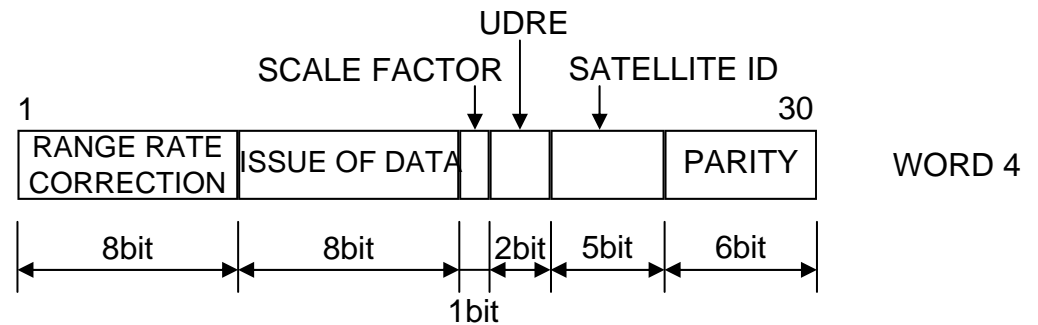
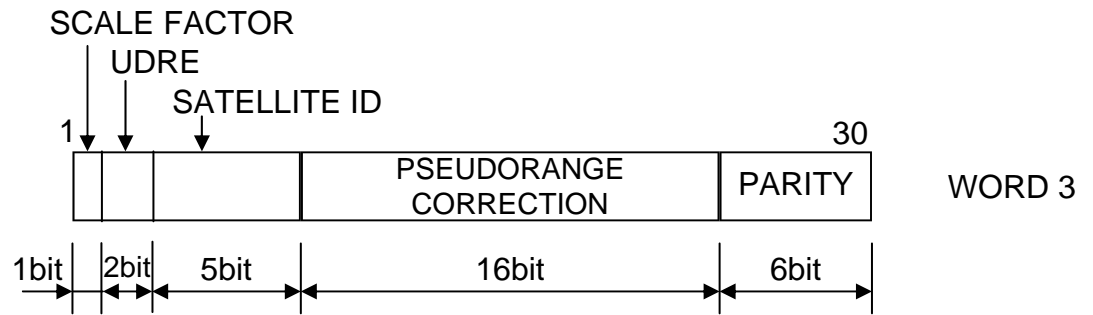
Nach dem Header folgt jeweils der für den Nachrichtentyp spezifische Dateninhalt (WORD 3 ... WORD n):

- Der Nachrichtentyp 1 übermittelt die Pseudorange-Korrekturdaten (PSR-Korrekturdaten, Distanzkorrektur) für alle von der Referenzstation sichtbaren GPS-Satelliten, basierend auf den aktuellsten Bahndaten (Ephemeriden).
- Darüber hinaus enthält Typ 1 die zeitliche Änderung der Korrekturdaten (in der folgenden Abbildung sind nur WORD 3 bis WORD 6 dargestellt).





# Aufbau des RTCM-Nachrichtentyps 1



Inhalt	Name	Beschreibung
SCALE FACTOR	Pseudorange correction value scale factor	PSR-Skalierungsfaktor
UDRE	User differential range error index	Nutzer Differential-Entfernungsfehler
SATELLITE ID	Satellite ID No.	Satellitenidentifikation
PSEUDORANGE CORRECTION	Pseudorange correction value	Effektive Distanzkorrektur
RANGE-RATE CORRECTION	Pseudorange rate-of-change correction value	zeitliche Änderung der Korrekturdaten
ISSUE OF DATA	Data issue No.	Ausgabe der Daten
PARITY	Error correction code	Prüfbits

## Inhalt des RTCM-Nachrichtentyps 1



# RTCM-Nachrichtentyp 2 bis 9

Die Nachrichtentypen 2 bis 9 unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Informationsinhaltes:

- der *Nachrichtentyp 2* übermittelt Delta-PSR-Korrekturdaten, basierend auf älteren Bahndaten. Diese Information wird benötigt, wenn der GPS-Anwender seine Satellitenbahndaten noch nicht aktualisieren konnte. Im Typ 2 wird die Differenz zwischen den auf den alten und neuen Ephemeriden beruhenden Korrekturwerten übermittelt.
- der *Nachrichtentyp 3* übermittelt die dreidimensionalen Koordinaten der Referenzstation.
- der *Nachrichtentyp 9*: vermittelt die gleiche Information wie Nachrichtentyp 1, jedoch nur für eine beschränkte Anzahl (max. 3) von Satelliten.
- Übermittelt werden nur die Daten derjenigen Satelliten, bei welchen sich die Korrekturwerte rasch ändern.



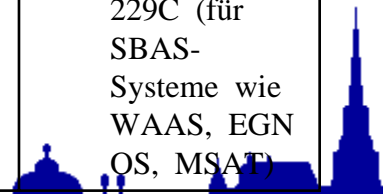
# RTCM-Nachrichtentyp 2 bis 9

- Damit eine merkliche Genauigkeitssteigerung mittels DGPS eintritt, sollten die übermittelten Korrekturdaten nicht älter als ca. 10 bis 60 Sekunden sein.
- Mit zunehmendem Abstand zwischen Referenz- und Anwenderstation sinkt die Genauigkeit.
- Aus Versuchsmessungen, bei welchen die Korrektursignale des deutschen Langwellensenders in Mainflingen nahe Frankfurt a.M. verwendet wurden, betrug der Fehler in einem Umkreis von 250 km (0,5 – 1,5)m und in einem Umkreis von 600 km (1 - 3)m (? ).



<b>Sende-einrichtung</b>	<b>Frequenz-bereich</b>	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>	<b>Übertragung der Korrekturdaten</b>
Lang- und Mittelwellensender (LW, MW)	100 - 600 kHz	Große Reichweite (1000km)	geringe Bitraten	RTCM SC104
Seefunkfeuer	283 - 315 kHz	Große Reichweite (1000km)	geringe Bitraten	RTCM SC104
Flugfunkfeuer	255 - 415 kHz	Große Reichweite (1000km)	geringe Bitraten	RTCM SC104
Kurzwellensender (KW)	3 - 30 MHz	Große Reichweite	geringe Bitraten, Qualität ist zeit- und frequenzabhängig	RTCM SC104
VHF und UKW	30 - 300 MHz	Große Bitraten, Mitbenutzung bestehender Infrastruktur	Reichweite durch quasioptische Bedingungen eingeschränkt	RTCM SC104
Mobilfunknetze (GSM ; GPRS)	450, 900, 1800 MHz	Mitbenutzen von bestehenden Netzen	begrenzte Reichweite, Synchronisationsprobleme	RTCM SC104
GEO-Satellitensysteme	1,2 - 1,5 GHz	Große Flächenüberdeckung	hohe Investitionskosten	RTCM SC104 (für Omnistar, Landstar, Starfire) RTCA DO-229C (für SBAS-Systeme wie WAAS, EGNOS, MSAT)

## Verschiedene Verfahren zur Übertragung der Korrekturdaten



# DGPS in verschiedenen Ländern:

## DGPS in USA

In USA wurden 25 Referenz-Bodenstationen für DGPS-Betrieb errichtet:

- Das System trägt die Bezeichnung *WAAS* und bedeutet *Wide Area Augmentation System* (dt.: „weiträumiges Erweiterungssystem“ )
- WAAS ist ein System, in dem 25 Bodenstationen die GPS-Signale empfangen und auswerten.
- Dazu gehören noch zwei Referenzstationen an den beiden Küsten der USA, welche die Daten der anderen Stationen sammeln und die Korrekturdaten errechnen. Diese Daten enthalten die zu übertragenden Korrekturinformationen.
- Diese Daten werden dann über zwei geostationäre Satelliten an die DGPS-Nutzer übertragen. Seit Dezember 1999 ist WAAS nahezu durchgängig in Betrieb. Es wurde für die Amerikanische Luftfahrtbehörde *FAA* (*Federal Aviation Association*) für hohe Genauigkeit bei Landeanflügen entwickelt.
- Die DGPS-Empfänger müssen spezielle Software für den Empfang und die Auswertung der WAAS-Korrektursignale enthalten.



# DGPS in verschiedenen Ländern:

## DGPS in USA

- Wichtig für die Funktion des WAAS ist jedoch, dass Sichtkontakt zu den stationären Satelliten vorhanden sein muss. Dies ist umso schwieriger, je nördlicher die Position des Empfängers ist, da die Höhe der geostationären Satelliten über dem Horizont entsprechend abnimmt ( die geostationären Satelliten befinden sich ja in der Äquatorialebene ).
- Das somit entstandene Gebiet, in dem DGPS betrieben werden kann, überdeckt zusätzlich noch Teile von Mexiko und Canada.
- Benutzt man einen DGPS-Empfänger mit WAAS-Funktionalität in einem Gebiet, wo die Korrektursignale nicht verfügbar sind, wird die Ortungsgenauigkeit sogar noch verschlechtert.
- DGPS mit WAAS-Funktionalität führt zu einer Genauigkeit von (3 ... 5)m horizontal und (3 ... 7)m vertikal.



# DGPS in Deutschland

- Ein Versuchsbetrieb für DGPS wurde in Deutschland in Nordrhein-Westfalen aufgenommen. Dabei werden die ermittelten Korrekturdaten  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  und  $\Delta z$  über das **R**adio **D**ata **S**ystem (RDS) den GPS-Mobilempfängern über das Autoradio beim Empfang eines Senders im UKW-Bereich (WDR5) zur Verfügung gestellt.
- Da aber UKW-Sender nur eine begrenzte Reichweite haben, wurde beschlossen, über Langwellenausstrahlung auf 123,7 kHz mit dem Senderstandort Mainflingen (dieser sendet bereits die Signale des DCF 77 aus) die Bundesrepublik Deutschland großflächig mit den GPS-Korrekturdaten kostenfrei zu versorgen.
- Mittelfristig wird die analoge UKW-Technik durch digitale Nachrichtenübertragung als DAB (engl.: *Digital Audio Broadcasting*) ersetzt werden, so dass dann die Korrekturdaten parallel mit übertragen werden können.





# Real Time Differential GPS über Langwelle

- 1. Nutzung der Langwelle mit einer Überdeckung eines Gebietes größer als Deutschland durch den Betrieb eines einzigen Langwellensenders ermöglicht, nur geringe Abschattungen aufweist und den Einsatz kleiner, preiswerter Spezialempfänger erfordert.
- 2. Übertragung von DGPS-Korrekturdaten im standardisierten RTCM-Format, Version 2.0, im Radio-Data-System (RDS) bereits seit März 1995. Das Radio-Data-System ist hardwaremäßig realisiert und arbeitet mit einem standardisierten Format.
- Die Korrekturdaten stehen in Echtzeit einem unbegrenzten Nutzerkreis zur Verfügung. Sie werden von der Sendefunkstelle Mainflingen (bei Frankfurt am Main) über 123,7 kHz RDS - codiert ausgestrahlt.

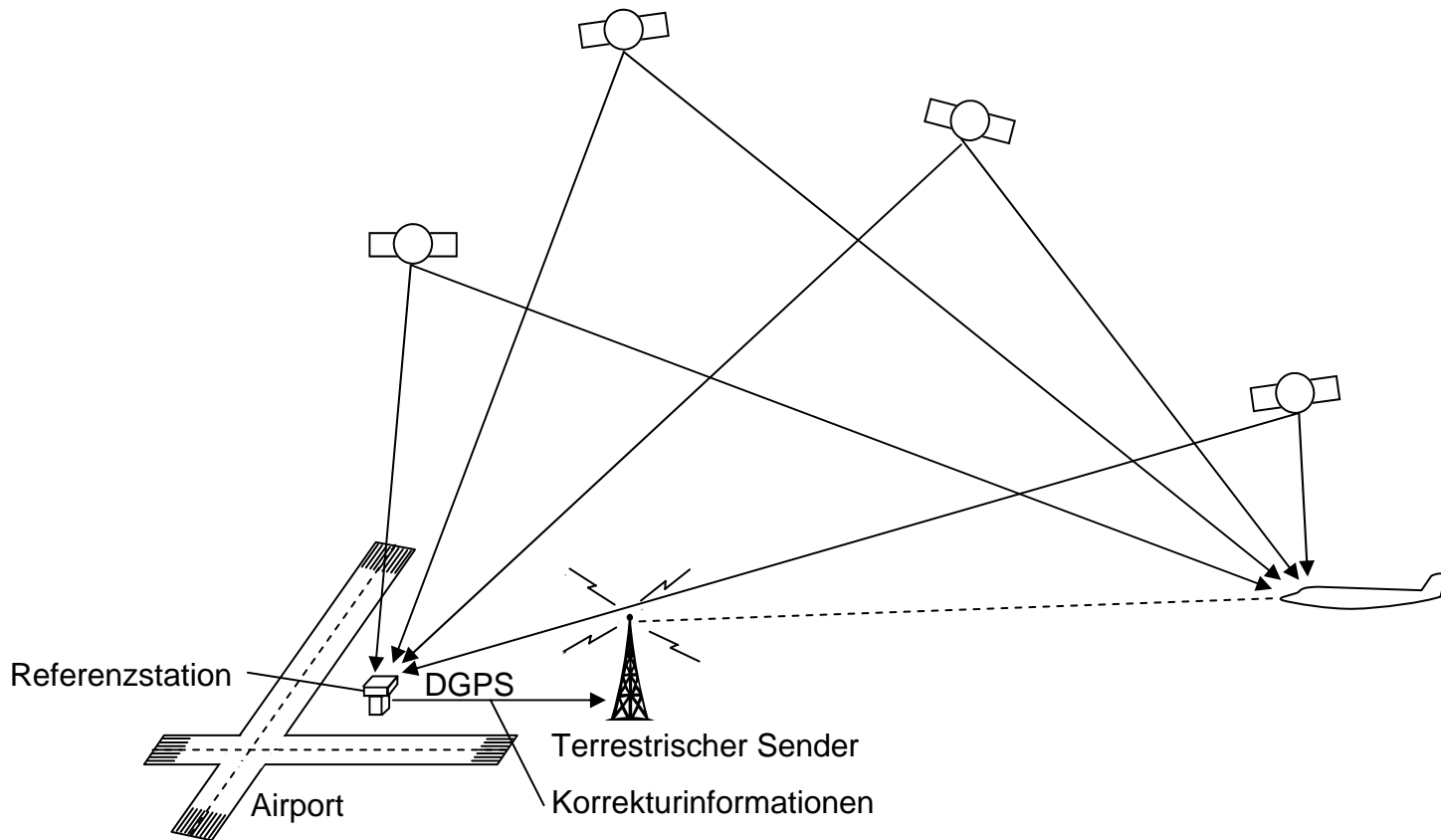


# DGPS in Österreich

- Ein DGPS-Service wird in Österreich nur mehr über geostationäre Satelliten angeboten und ist kostenpflichtig.
- Zusätzlich ist vorgesehen, terrestrische UHF-Funkstrecken aufzubauen. Ein solches System wird in Österreich von *Datatrak* angeboten und liefert als DGPS-System eine mögliche Ortungsgenauigkeit bei etwa 20 m.
- Dies erfordert jedoch durch die UHF-Kommunikation eine zusätzliche Senderinfrastruktur, die besonders im alpinen Gelände hohe Kosten verursacht.
- Bestehende Services zeigen entweder den Ortsnamen im Handydisplay an oder ermitteln aus den über GPS festgestellten Koordinaten unter Zuhilfenahme von GIS-Daten serverseitig die Ortsbezeichnung und übersenden diese über das GSM-Modul an den Nutzer.



# DGPS für automatisierte Landeanflugverfahren



DGPS für automatisierte Landeanflugverfahren



# DGPS für automatisierte Landeanflugverfahren

- Allerdings kommt aus sicherheitstechnischen Erwägungen ein solches automatisiertes Landeanflugverfahren derzeit noch nicht in Betracht, da das gesamte System software-driven ist und von daher zuvor eine Validierung der Software vorgenommen werden müsste.
- Diese Ungenauigkeit und vor allem die Abhängigkeit von dem Systembetreiber machen selbst das Differential-GPS System für den Einsatz als Instrumenten-Landesystem derzeit noch indiskutabel.



# WAAS, EGNOS und MSAS

- WAAS-System = *Wide Area Augmentation System* = Erweiterungssystem für einen großen Bereich = satellitengestütztes DGPS.
- D.h.: zum Empfang des Signals benötigt man keinen zusätzlichen Langwellen- oder FM-Empfänger, es werden zur Signalübertragung keine zahlreichen Sendestationen benötigt.
- Datenübertragung vom geostationären Satelliten.
- Das Prinzip ist bei allen drei Systemen gleich, die Systeme sind sogar kompatibel.
- **WAAS** (engl.: *Wide Area Augmentation System*): USA,
- **EGNOS** (engl.: *European Geostationary Navigation Overlay Service*)
- **MSAS** (engl.: *Multi-Functional Satellite Augmentation System*): Japan + Asien



# DGPS für Flugsicherung

- Um als einziges Navigationsmittel zulässig zu sein, ist das GPS-System zum einen nicht genau genug und zum anderen ist keine zuverlässige und rechtzeitige Benachrichtigung des Nutzers über gegebenenfalls auftretende Fehler oder Ausfälle möglich.
- Somit sind Flugzeuge speziell beim Landeanflug ohne oder mit schlechter Sicht heute noch auf ILS-Systeme (engl.: *Instrument Landing System*) angewiesen, die mit hohem finanziellen Aufwand auf jedem Flughafen installiert werden müssen.



# DGPS für Flugsicherung

## Ziel:

- CAT I Anflüge (eingeschränkte Sicht von mindestens 550 m Sichtweite und beleuchteter CenterLine)
- CAT III Anflüge (ganz ohne Sicht) sind allein mit Satellitennavigation zur Zeit nicht möglich.
- ... außerdem:  
**! soft-ware driven system !**



# Ranging and Integrity Monitor Stations

RIMS = *Ranging and Integrity Monitor Stations*

- USA: 25 + 2 (Ost- + Westküste),
- Europa: 10 (im Testbetrieb, im Endausbau 34 ),
- Pazifikraum: Stationen geplant
- Da die RIMS mit beiden GPS-Frequenzen L1 und L2 arbeiten, kann die Signalverzögerung durch die Ionosphäre für jeden einzelnen Satelliten bestimmt werden.





# Ranging and Integrity Monitor Stations

- Die Daten aller RIMS werden nun an ein *Central Processing Center* (Hauptrechenstation) weitergeleitet. Hier werden die Daten aller Stationen miteinander gesammelt und folgende Daten errechnet:
- Langzeitfehler der Satellitenpositionen
- Kurz- und Langzeitfehler der Satellitenuhren
- ein IONO-Korrekturgitter ( IONO = Abk. für Ionosphäre )
- Integritätsinformationen



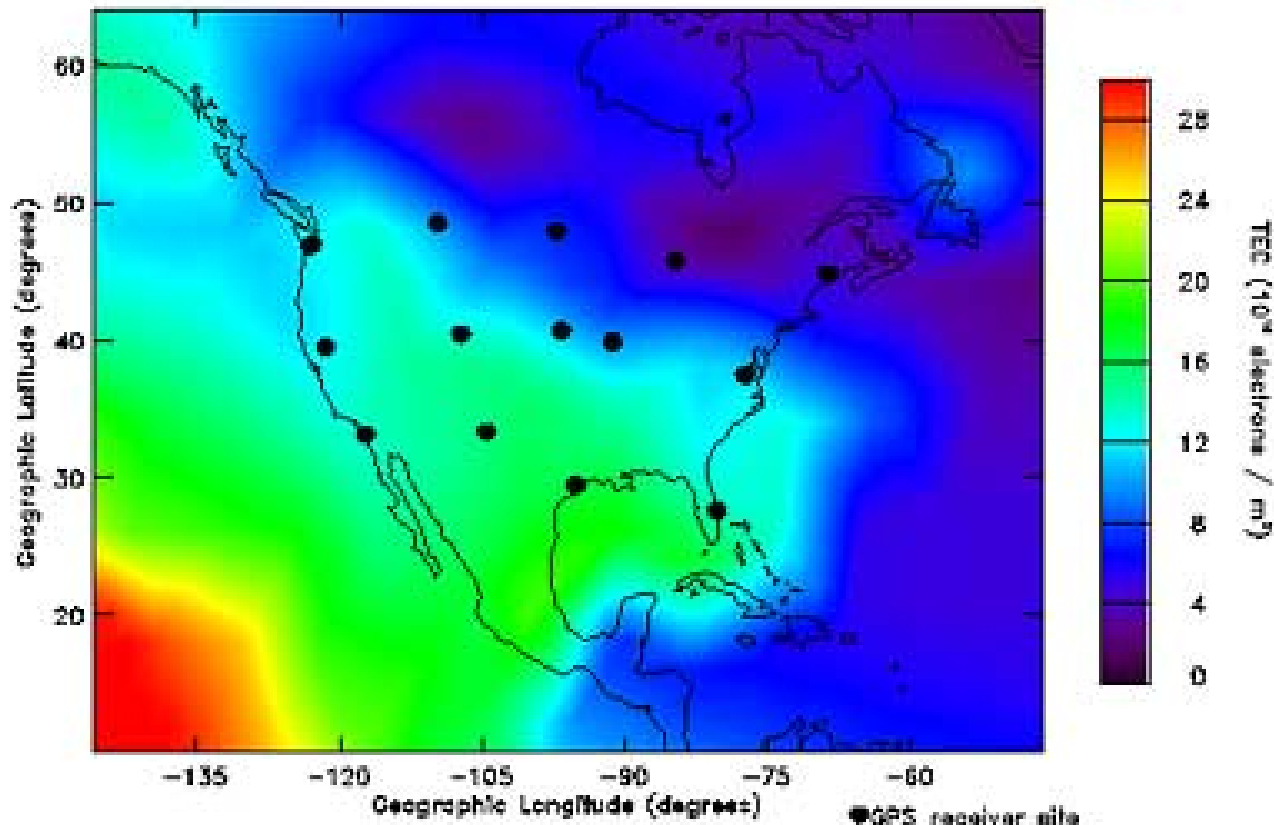
# Ionosphärenkarte

Aus den Daten der RIMS wird eine Ionosphärenkarte erstellt

04/11/97  
03:15 - 03:20 UT

Ionospheric TEC Map (US)

JPL

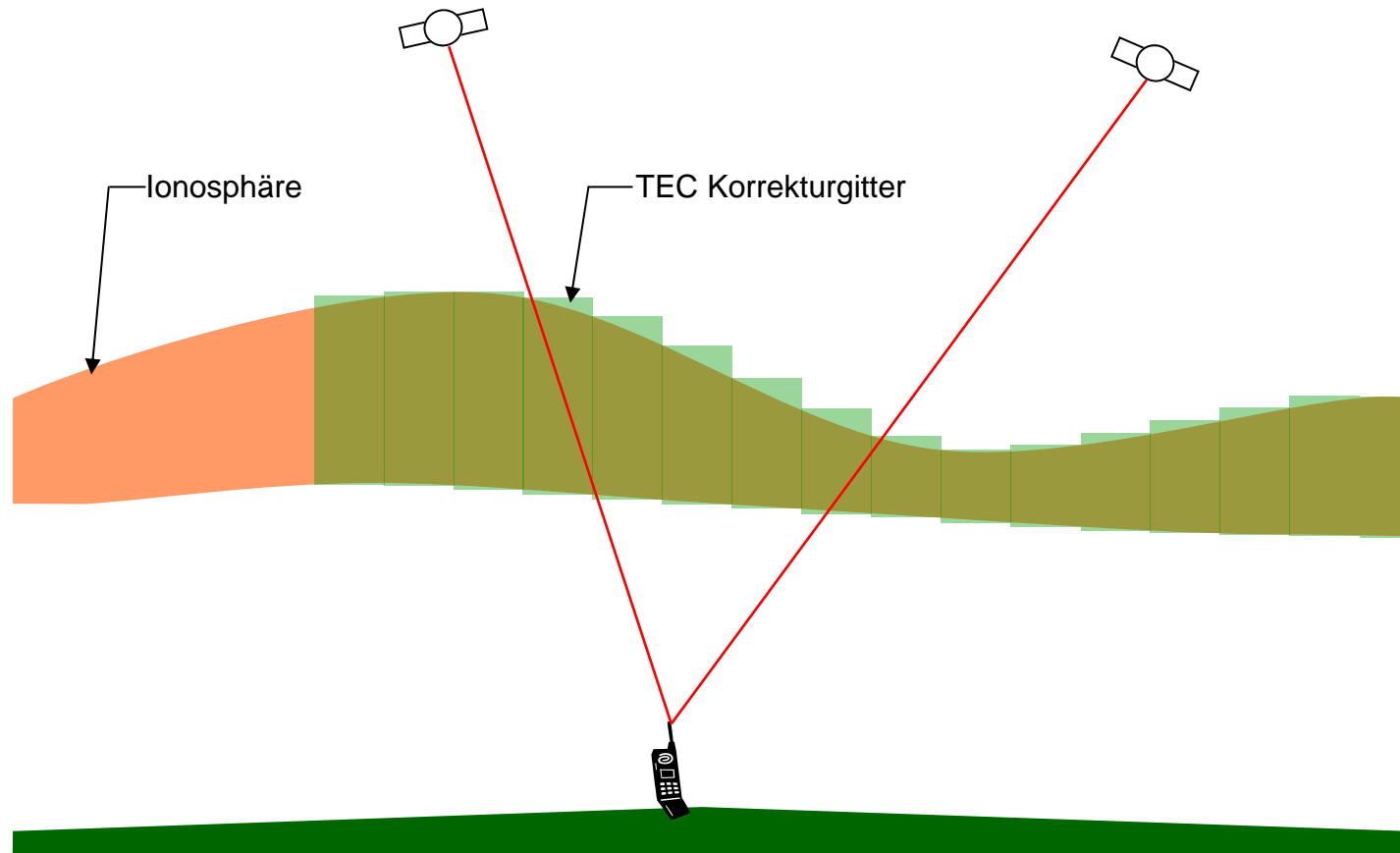


# IONO-Korrekturgitter

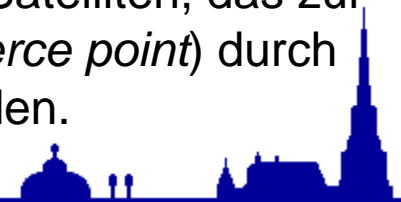
- Das für zivile Nutzer wohl wichtigste Ergebnis ist das IONO-Korrekturgitter.
- Aus den Messdaten der RIMS wird nun eine Karte mit der Gesamtelektronenmenge (TEC = *Total Electron Content*) des Gebietes berechnet, das von den Empfangsstationen abgedeckt wird.
- Diese Informationen werden nun an geostationäre Satelliten gesendet:  
für das EGNOS-Testsystem (ESTB) von Aussaguel (Frankreich, bei Toulouse) an den IMARSAT AOR-E und von Fucino (Italien) aus an INMARSAT IOR;



# Zweidimensional vereinfachte Darstellung des IONO-Korrekturgitters



Mit dieser Ionosphären-Karte kann nun für jedes Signal eines GPS-Satelliten, das zur Positionsberechnung verwendet wird, der Durchtrittspunkt (engl.: *pierce point*) durch die Ionosphäre bestimmt und die Signalverzögerung berechnet werden.

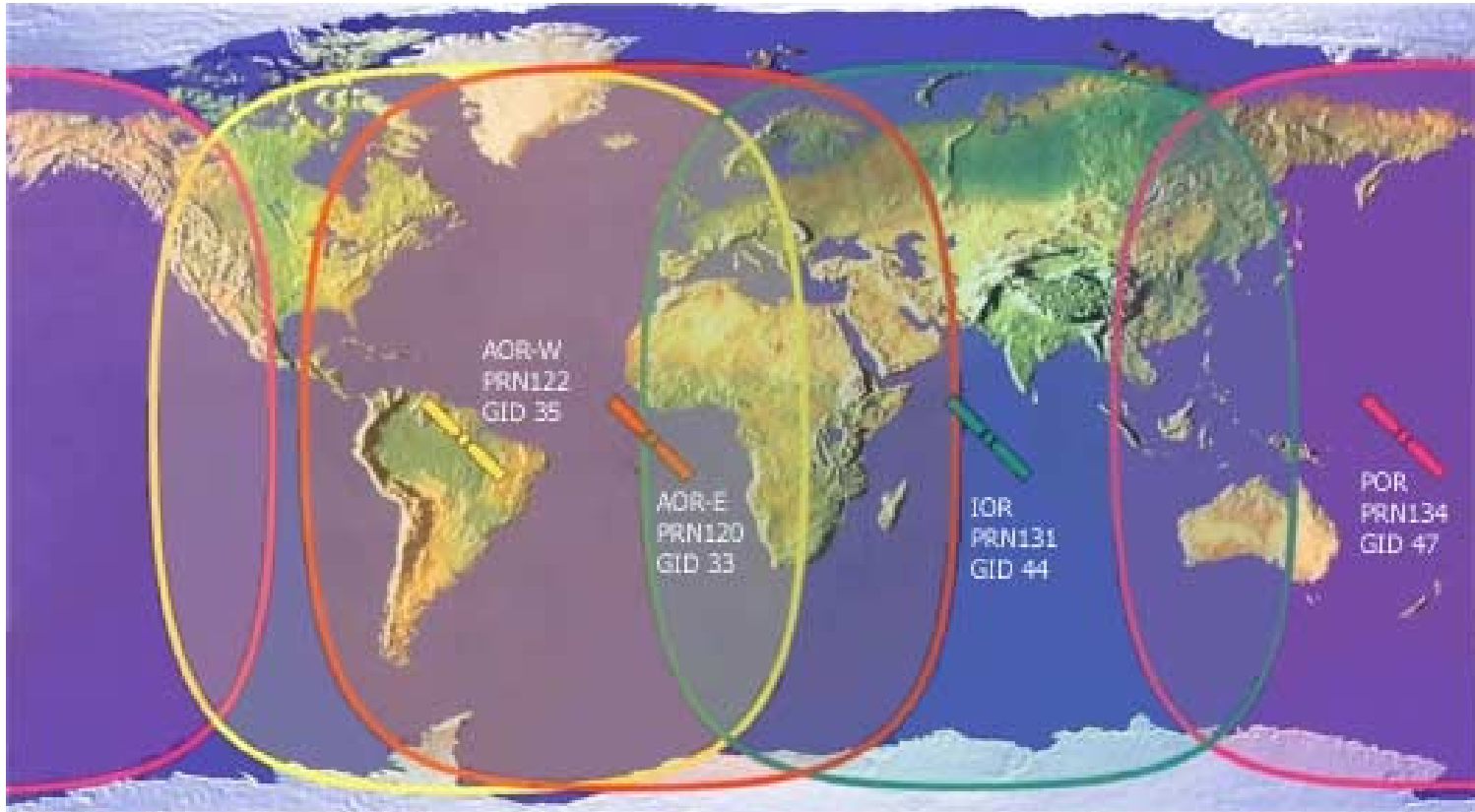


# Abdeckungsbereich der geostationären Satelliten

- Der Bereich, in dem WAAS, EGNOS und MSAS verfügbar sind, hängt zum einen davon ab, wo überall RIMS stehen, deren Informationen zur Berechnung verwendet werden und zum anderen davon, wo die Signale der geostationären Satelliten empfangen werden können.
- Als Satelliten zur Ausstrahlung der Korrektursignale werden INMARSAT-Satelliten verwendet, die alle eine geostationäre Umlaufbahn (ca. 36.000 km) haben und eigentlich Telefonsatelliten für Telefongespräche von und zu Schiffen sind.



# Abdeckungsbereich der geostationären Satelliten



Diese Abbildung zeigt einige zur Ausstrahlung verwendeten Satelliten und deren "*Footprint*" als den Bereich, in dem die Signale empfangen werden können. INMARSAT-Satelliten und deren Ausleuchtungsbereich

- ENDE



