

Seminar Informatik  
WS 04/05

# Satellitensysteme

Axel Schöning  
16. November 2004

---

Einleitung

Geschichte

Grundlagen

Umlaufbahnen

Überblick über die Anwendungsgebiete

Iridium



Ein **Satellitensystem** ist ...

... ein Kommunikationssystem

... eine Möglichkeit, Gebiete funktechnisch ohne lokaler terrestrischer Infrastruktur abzudecken

... mit einem hohen Aufwand verbunden

... ein physikalisch und technisch sensibles System

*Satellit v. lat. satelles: Leibwächter*

---

Einleitung

⇒ **Geschichte**

Grundlagen

Umlaufbahnen

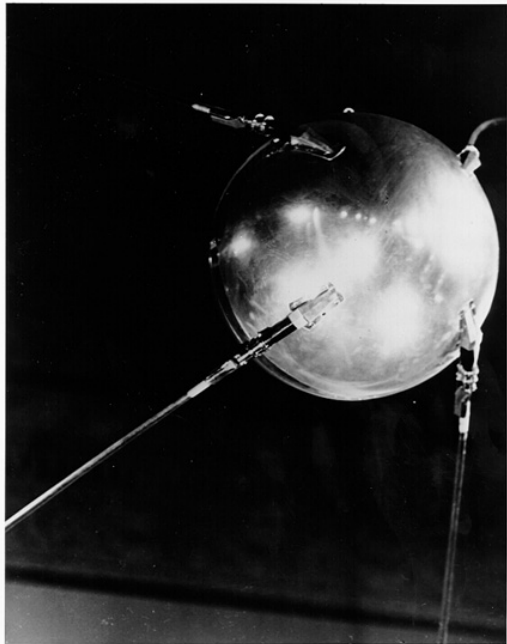
Überblick über die Anwendungsgebiete

Iridium



- Anfänge der Technik nach Ende des zweiten Weltkriegs
  - Arthur C. Clarke (1945):  
Idee von „Satellitensystemen als Kommunikationssysteme“
  - Technische Realisierung durch „**Kalten Krieg**“ forciert:
    - US-Präsident Dwight D. Eisenhower 1955:  
Ankündigung eines Satellitenforschungsprogramm
    - Vier Tage später reagierte die Sowjetunion mit einem ähnlichen Programm
-

## 04.10.1957: Start des ersten künstlichen Satelliten, der sowjetische **Sputnik 1**



- Durchmesser 58cm
- Knapp 83 kg schwer
- Sendete auf 20 und 40 MHz
- Sendeleistung je ein Watt
- Umkreiste Erde in 96 Minuten
- Verglühte nach 96 Tagen

*Sputnik, russ. für Gefährte*

## **Sputnikschock:**

Technologische Fortschritt der UdSSR löste in der westlichen Welt ein Bedrohungsgefühl aus. Sputnik bewies, dass Amerika mit Interkontinentalraketen von der Sowjetunion aus erreichbar war.

⇒ Gründung der NASA

⇒ Verstärkte Anstrengungen im Bildungsbereich

---

## Weitere Meilensteine der Satellitenkommunikation

1958	Explorer 1	Erster US-Satellit
1960	Echo 1/1A	Erster passiver Kommunikationssatellit
1962	Telstar 1	Erster aktiver Kommunikationssatellit
1963	Syncom	Erster geostationärer Kommunikationssatellit
1965	Intelsat 1	Erster kommerzieller Kommunikationssatellit
1976	Marisat	Erstes satellitengestütztes Kommunikationssystem für die Seefahrt
1982	Inmarsat	Erster satellitengestützter Mobildienstanbieter

## Mobile Satellitenkommunikation auf Basis von LEO-Satellitennetzen



- Start des Systems 1998, „Restart“ 2001
- fast komplette, weltweite Abdeckung



- Start des Systems 1999
  - geringere funktechnische Abdeckung
  - Anfang 2002 vor dem Konkursrichter
-

- Anzahl: (geschätzt, 2002) 1.000 aktive Satelliten
  - 90% davon Kommunikationssatelliten (TV/Radio)
  - Betreiberkonzepte nicht immer gesichert (Iridium)
-

Einleitung

Geschichte

⇒ **Grundlagen**

Umlaufbahnen

Überblick über die Anwendungsgebiete

Iridium



## **Wesentliche Aspekte zur Etablierung eines Satellitensystems**

- Überwindung der Schwerkraft
  - Die Umgebungsbedingungen im All:  
Restatmosphäre, Vakuum, Temperaturextrema, Strahlung,  
Weltraumschrott
  - Der begrenzte Treibstoffvorrat eines Satellit
  - Technische Defekte gravierend
-

# Trägerraketen

---

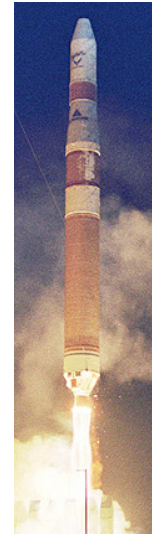
## Ariane V (ESA)

- Transportiert 6,8 t Nutzlast in geostationären Orbit



## Delta 4 Medium (Boeing)

- Transportiert 4,2-6,5 t Nutzlast in geostationären Orbit



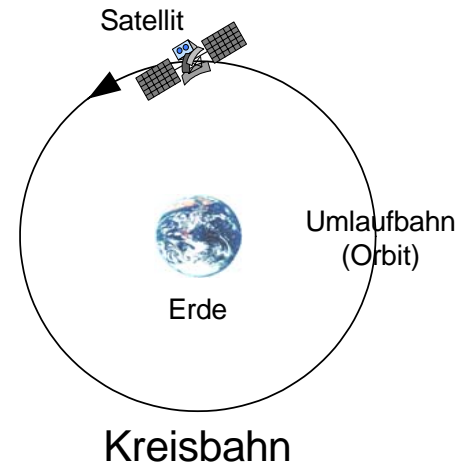
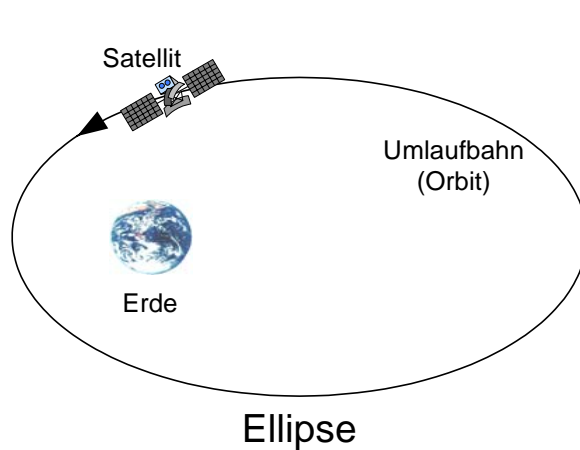
## Proton-Trägerrakete (Russland)

- Transportiert 2,5 t Nutzlast in geostationären Orbit



Satellitenumlaufbahnen gehorchen den drei Keplerschen Gesetzen

1. Gesetz von der Gestalt der Bahn
2. Gesetz der Fläche
3. Gesetz der Umlaufzeiten



# 1. Kosmische Geschwindigkeit

Satellitenumlaufbahn (Orbit) stabil, wenn ...

... die *Fliehkraft* eines Satelliten **gleich** der *Anziehungskraft* ist

Fliehkraft  $F_z = m * v_1^2 / r$

Anziehungskraft  $F_g = m * g$

mit:

r	der Abstand vom Mittelpunkt
g	die Gravitationsbeschleunigung (an der Erdoberfläche ca. 9,81 m/s <sup>2</sup> )
m	die Masse des Satelliten
v <sub>1</sub>	die gesuchte Geschwindigkeit

# 1. Kosmische Geschwindigkeit

---

Berechnung der Geschwindigkeit:

Fliehkraft = Anziehungskraft

$$m * v_1^2 / r = m * g \quad \Leftrightarrow \quad v_1 = \text{SQR}(g * r)$$

Mit eingesetzten Werten (Erdoberfläche:  $r = 6.370 \text{ km}$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

$$v_1 = 7.905 \text{ m/s}$$

ergibt sich die 1. kosmische Geschwindigkeit

(für den Bereich der Erdoberfläche)

---

# 1. Kosmische Geschwindigkeit

---

Aber: Die Gravitationskraft der Erde nimmt mit zunehmender Entfernung ab

Also: Mit zunehmender Entfernung von der Erde sinkt die notwendige Geschwindigkeit für eine stabile Umlaufbahn

Berechnung  $g = G * M / r^2$  mit

Gravitationskonstante  $G = (6,673 \pm 0,001) * 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg s}^2$

Masse der Erde  $M = 5,98 * 10^{24} \text{ kg}$

---

## 2. Kosmische Geschwindigkeit

Wie hoch ist die Geschwindigkeit, ab der ein Gravitationsfeld verlassen wird?

Kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * m * v_2^2$$

potenzielle Energie der  
Gravitation

$$E_g = G * M * m / r$$

mit:

m	die Masse des Satelliten
$v_2$	die gesuchte Geschwindigkeit
G	die Gravitationskonstante
M	die Masse der Gravitationsquelle
r	der Abstand vom Mittelpunkt

## 2. Kosmische Geschwindigkeit

Berechnung der Geschwindigkeit:

*Kinetische Energie = potenzielle Energie der Gravitation*

$$\frac{1}{2} * m * v_2^2 = G * M * m / r \quad \Leftrightarrow \quad v_2 = \text{SQR}(2 * G * M / r)$$

Mit eingesetzten Werten (Erdoberfläche:  $r = 6.370 \text{ km}$ )

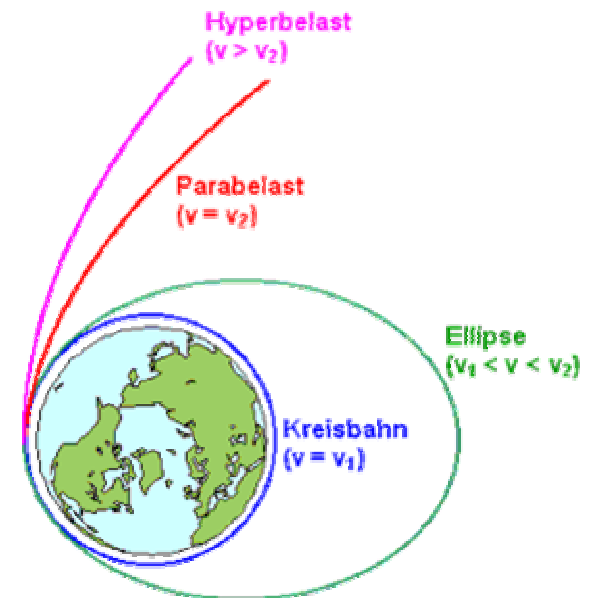
$$v_2 \approx 11.193 \text{ m/s}$$

ergibt sich die 2. kosmische Geschwindigkeit

(für den Bereich der Erdoberfläche)

Zusammenfassung: Satellit mit Geschwindigkeit  $v$ . Wenn ...

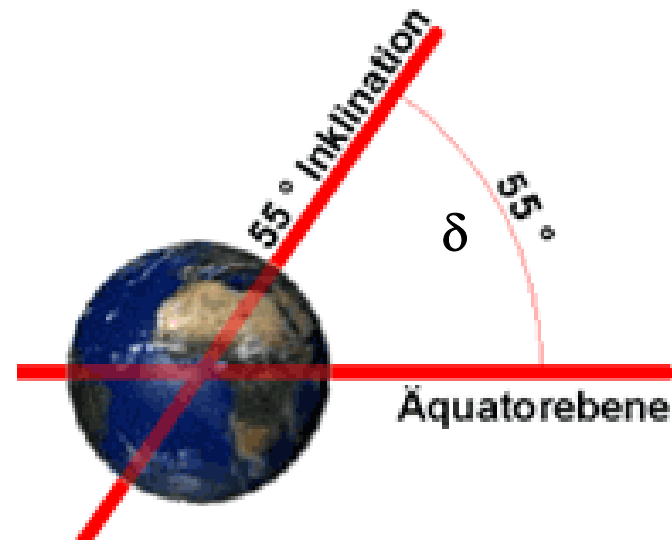
- ...  $0 < v < v_1$   $\Rightarrow$  Absturz
- ...  $v = v_1$   $\Rightarrow$  Satellit auf Kreisbahn
- ...  $v_1 < v < v_2$   $\Rightarrow$  Satellit auf Ellipse
- ...  $v = v_2$   $\Rightarrow$  Satellit auf Parabel
- ...  $v > v_2$   $\Rightarrow$  Satellit auf Hyperbel



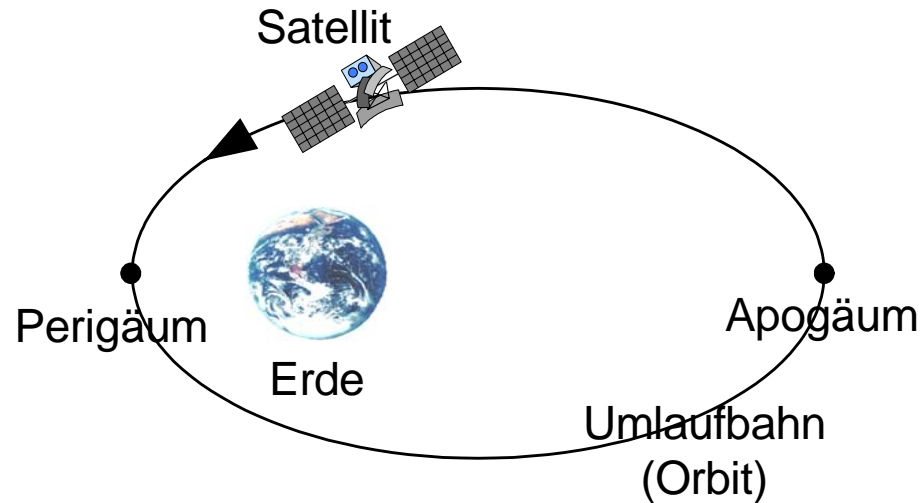
wobei  $v_1$  und  $v_2$  jeweils von der Entfernung abhängen!

# Begriffe: Inklination

- Inklination  $\delta$  ist die Neigung der Bahnebene gegenüber dem Himmelsäquator
- Geostationäre Orbits: Inklination =  $0^\circ$
- Polare Orbits: Inklination =  $90^\circ$



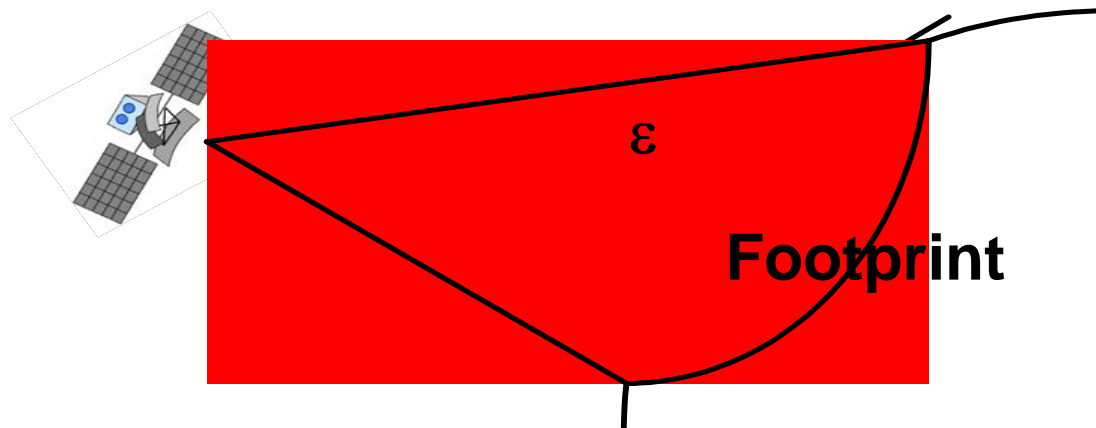
# Begriffe: Perigäum, Apogäum



- Perigäum: erdnächste Punkt des Orbits (höchste Geschwindigkeit)
- Apogäum: erdfernste Punkt des Orbits (niedrigste Geschwindigkeit)
- Kreisbahn: Perigäum = Apogäum

# Begriffe: Elevation, Footprint

- Elevation  $\varepsilon$  ist der Winkel zwischen der Geraden vom Beobachtungspunkt zum Satelliten und einer tangentialen Ebene zur Erdoberfläche
- Der Footprint ist das Ausleuchtungsgebiet



## Sendesignale im Bereich von Mikrowellen:

Band	Frequenzbereich
L	1.0–2.0GHz
S	2.01–4.0GHz
C	4.01–8.0GHz
X	8.01–12.0GHz
Ku	12.01–18.0GHz
K	18.01–27.0GHz
Ka	27.01–40.0 GHz

Klassifizierung der  
Frequenzbänder

Uplink- Frequenzen	Downlink- Frequenzen
5.925–6.425GHz	3.700–4.200GHz
7.900–8.400GHz	7.250–7.750GHz
14.00–14.50GHz	11.70–12.20GHz
27.50–30.00GHz	17.70–20.20GHz

Frequenzbereiche  
Up- und Downlink

Dämpfung der Signale beim Durchgang durch die Erdatmosphäre

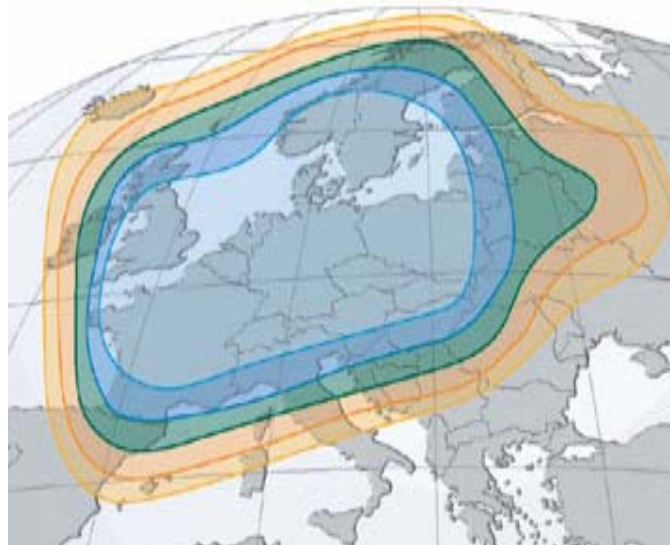
## **Einflussfaktoren Dämpfung**

- Abstand zwischen Satellit und Empfänger
- Elevation des Satelliten
- Atmosphärische Störungen, Wetter (Regen, Nebel)



## Leistung

- Uplink: Hohe Leistung (ca. 500 Watt), hohe Richtwirkung
- Downlink: Geringere Leistung (ca. 40 Watt)



Einleitung

Geschichte

Grundlagen

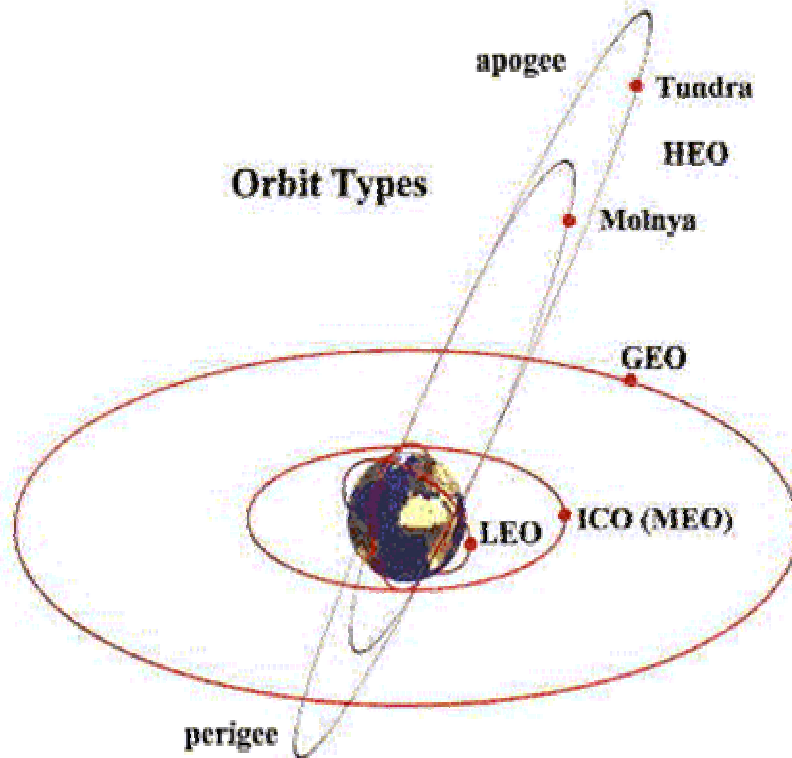
⇒ **Umlaufbahnen**

Überblick über die Anwendungsgebiete

Iridium

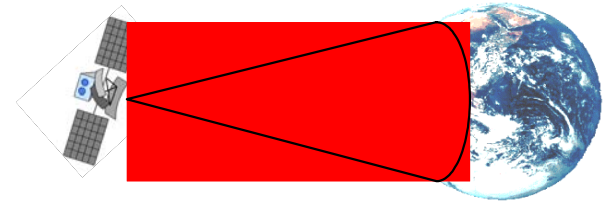


## Einteilung der Orbits nach Entfernung und Lage zur Erde



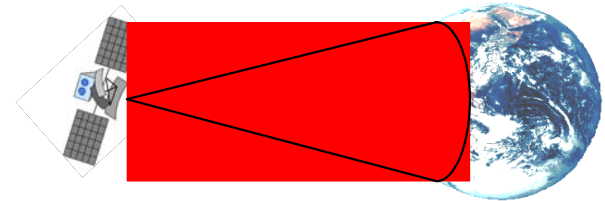
- GEO (geosynchronous transfer orbit) geostationärer Orbit
- LEO (low earth orbit) niedrige Erdorbits
- MEO (medium earth orbit) mittlere Erdorbits
- HEO (high elliptical orbit) hoch elliptische Erdorbits

## Geostationäre Satelliten (GEO)



- Entfernung von Erde 35.786 km
  - Satellit scheint am Himmel „zu verharren“
  - Umlaufdauer exakt der Rotationsdauer der Erde:  
Ein siderischer Tag: 23 h, 56 min, 4,09 s
  - Inklination  $0^\circ$  (Satellit kreist über Äquator)
  - Geosynchron: Inklination  $> 0^\circ$
-

## Geostationäre Satelliten (GEO)



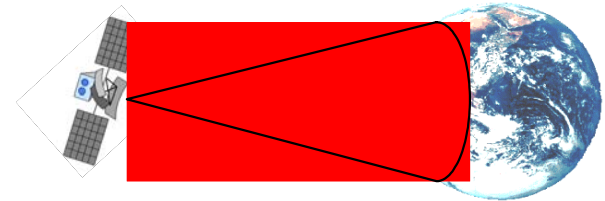
### Vorteile

- Theoretisch nur drei Satelliten, um Erde funktechnisch abzudecken
  - Antennen müssen nicht ausgerichtet werden
-

## Geostationäre Satelliten (GEO)

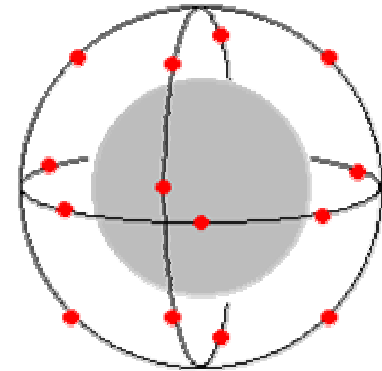
### Nachteile

- Hohe Sendeleistung bei mobiler Kommunikation (10 Watt)
- Signallaufzeit relativ hoch: 0,25s
- Verstärkt Empfangsprobleme ab 60° Breitengrad (Elevation)
- Empfangsprobleme in Städten (hohe Gebäude)
- Kein gleichzeitiges Nutzen von Frequenzen (Überlagerung)



## Niedrig fliegende Satelliten (LEO)

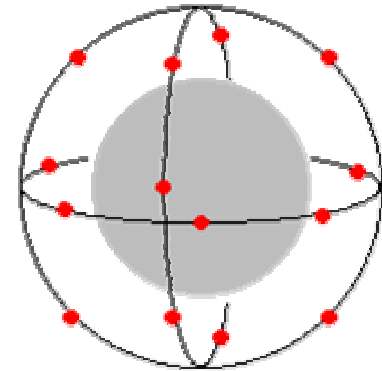
- Orbit in 100 bis 2.000 km
- Umlaufdauer zwischen 95 und 120 Minuten
- Footprint 3.000 bis 4.000 km
- Nur ca. 10 Minuten Sichtbarkeit



## Niedrig fliegende Satelliten (LEO)

### Vorteile

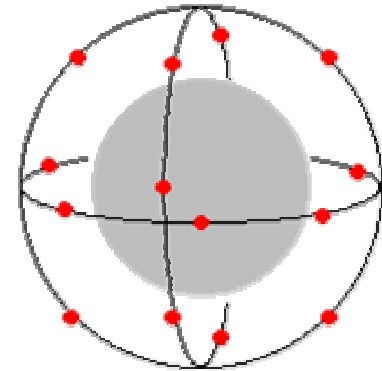
- Erreichbar mit geringer Sendeleistung (ca.1 W)
- geringe Signallaufzeit von ca. 0,01s
- Wiederverwendung von Frequenzen
- Relativ Niedrige Kosten beim Start eines LEO-Satelliten



## Niedrig fliegende Satelliten (LEO)

### Nachteile

- Für Abdeckung Erde wird hohe Satellitenzahl erforderlich
- kurze Sichtbarkeiten erfordern Verbindungsübergabemechanismen zwischen Satelliten
- Relativ kurze Lebensdauer aufgrund atmosphärischer Einflüsse und Strahlung

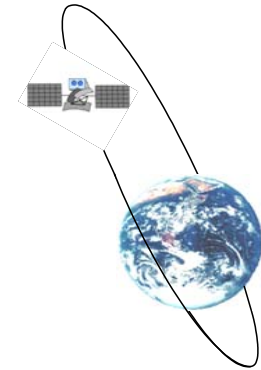


## Satelliten auf mittleren Umlaufbahnen (MEO)

- kreisförmige Orbits auf einer Höhe von 6.000 bis 20.000 km
  - Umlaufdauer 4 bis 12 Stunden
  - Sichtbarkeitsdauer mehrere Stunden
  - Mischform zwischen GEO / LEO
  - Vereint Vor- und Nachteile von GEO / LEO
-

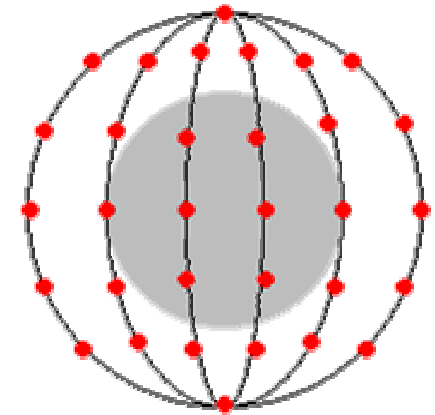
## Satelliten mit hochelliptischen Bahnen (HEO)

- Elliptische Bahn
- Perigäum bei ca. 500 km,  
Apogäum bei ca. 40.000 km
- Inklination etwa  $63,4^\circ$
- Umlaufzeit zwischen 8 und 24 Stunden
- erscheint Quasistationär (meiste Zeit im Apogäum)
- Unterschiedliche Signallaufzeiten während Bahnverlauf



## Satelliten mit polarem Orbit

- Inklination von  $90^\circ$  mit Bahn über beide Pole
- Orbit fest im Raum, Erde rotiert darunter
- Die meisten LEO-Orbits sind polar positioniert



Einleitung

Geschichte

Grundlagen

Umlaufbahnen

⇒ **Überblick über die Anwendungsgebiete**

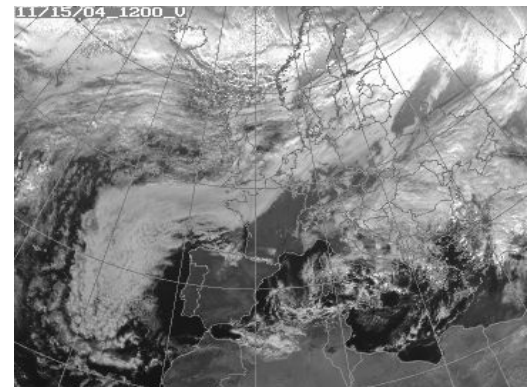
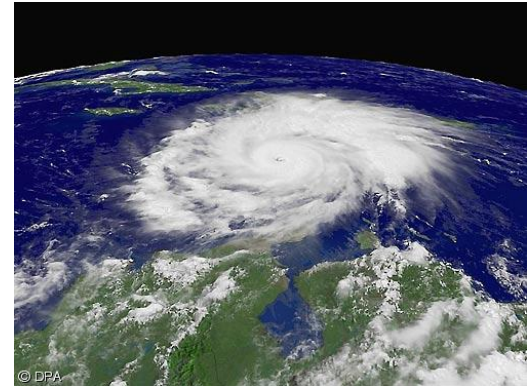
Iridium



## Unterstützung der Wettervorhersage durch Satellitensysteme

Messung diverser Parameter:

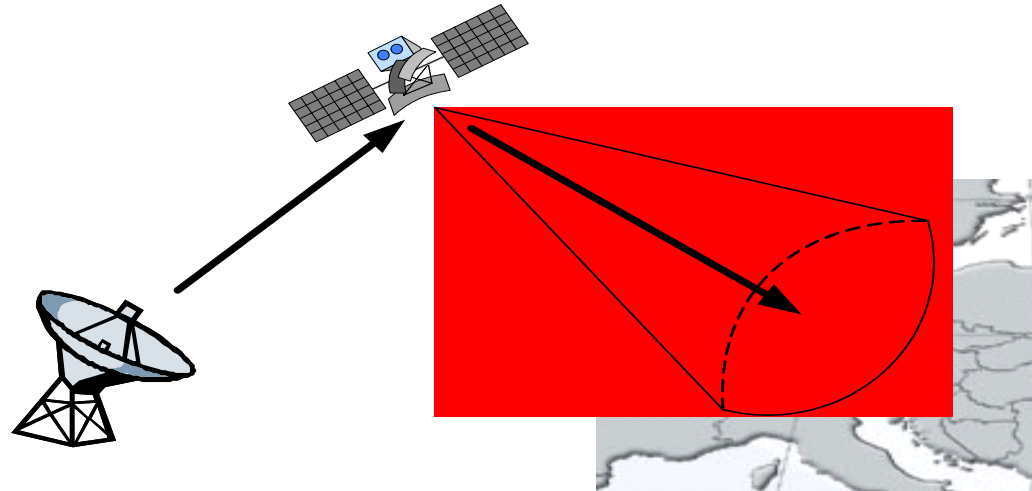
- Wind, Lufttemperaturen,  
Oberflächentemperatur von  
Wasser- / Landflächen,  
Zustand der Atmosphäre
- Fernsehkameras, Infrarot-Radiometern,  
Strahlungsmessgeräte





## Aufgabe

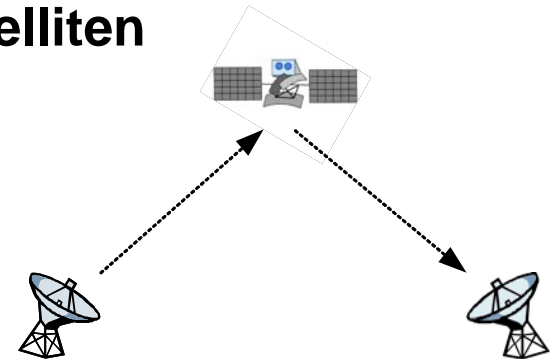
Hochleistungssatelliten verstärken empfangene Signale der Bodenstation, setzen sie um und strahlen sie über Richtantennen in Versorgungsgebiete aus („Repeater“)



## Unterscheidung Fernmelde- und Direktsatelliten

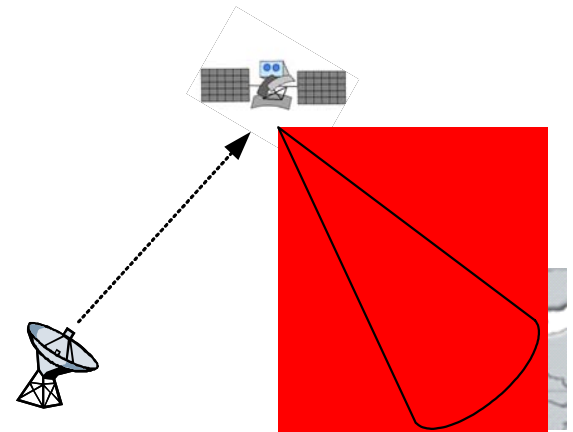
### Fernmeldesatelliten

- punktuelle Weiterverbindung:  
kleine Flächen, geringe Leistung



### Direktsatelliten (DBS, Direct Broadcast)

- Großflächige Distribution:  
große Flächen, hohe Leistung



- Radio- / Fernsehsatelliten geostationär positioniert
  - Signalverzögerung ca. 0,25 s unerheblich, da unidirektionaler Datentransfer (anders bei DFÜ, Sprachübertragung)
  - Basiseinheiten im Satellit: Transponder empfängt, verstärkt und sendet Signale
  - Ein Satellit besitzt mehrere Transponder  
⇒ Intelsat 10-02 (2004): 70 C-Band, 36 Ku-Band
  - Unterschiedliche Modulationen  
TDMA, FDMA, DAMA
-

- Zum Empfang keine aufwendige Technik mehr nötig („einfache“ Parabolantenne und Receiver ausreichend)  
⇒ Konkurrenz zu Kabelnetzen

## **Kommerzielle Betreiber**

SES Global (Astra), Intelsat, Eutelsat

## **Dienste**

TV und Radio, Breitband-DFÜ (Internet), Kommunikation

---

## **Satelliten zur Positionsbestimmung und Landvermessung**

- Global Positioning System (GPS)
    - Ursprünglich vom US-Militär entwickelt (1973)
    - 24 Satelliten auf Orbits in Höhe von ca. 20.000 km
  
  - Europäisches System GALILEO in Entwicklung (ab 2008)
    - Für zivile Nutzung konzipiert
    - Verringerung der Abhängigkeiten vom GPS
-

Einleitung

Geschichte

Grundlagen

Umlaufbahnen

Überblick über die Anwendungsgebiete

⇒ **Iridium**



## Erstes weltumspannendes, mobiles Satellitenkommunikationssystem

- Firmenkonsortium unter Führung von Motorola Inc.
- Idee 1987:
  - eine Rufnummer weltweit
  - Unabhängigkeit von terrestrischen Kommunikationsnetzen
  - Verbindung auf See, Land und in der Luft
  - Digitale Sprachübertragung
  - Satellitentelefone (Handys)



# Iridium

---

- ursprünglich 77 Satelliten geplant
  - seit 1996/1997 bis Ende 1998 Start der Satelliten (ca. 80 Stück)
  - ging am 1.11.1998 mit 66 Satelliten in Betrieb
-

## **Im Frühjahr 2000 Konkurs**

- 1,5 Mrd. Dollar Schulden (1999)
- Plan: Iridium abstürzen zu lassen

## **Mitte/Ende 2000 neue Geldgeber**

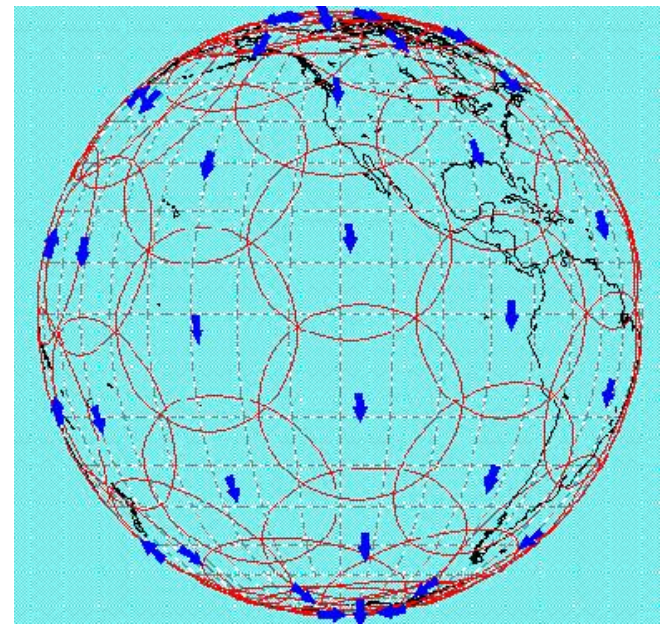
- u.a. US Verteidigungsministerium, Boeing
  - Reorganisation / der Unternehmung
  - Wiederaufnahme Betrieb im Frühjahr 2001
-

- Momentan 66 aktive Satelliten und 13 Reservesatelliten
- Höhe 780 km, Umlaufdauer 100 Min.
- Satelliten mit ISL (Intersatellite Link) ausgestattet  
⇒ Kommunikation zwischen Iridium-Nutzern wird  
zwischen den Satelliten aufgebaut
- 1.100 Kanäle Kapazität pro Satellit



# Iridium

- Satelliten auf sechs polaren LEOs stationiert
- 11 Satelliten pro Orbit
- Komplette Abdeckung der Erde (Ozeane, Polregionen)
- Footprint 4.800 km
- Drei Bodenstationen für u.a. Verbindung ins Festnetz



- Kommunikationsnetzwerk für Sprache und Daten
  - DFÜ bis zu 2,4 KBit/s
  - Internet bis zu 10 KBit/s
- Weitere Dienste: Paging, SMS, Notruf-Systeme
- Sichtverbindung empfohlen
- Kosten:
  - Iridium-Iridium: 0,65 \$/Min
  - Iridium-Festnetz: 1,40 \$/Min
  - Festnetz-Iridium: 2,50 €/Min
- Gerätepreis (Handy): 1.598,00 €

