

**Kurs 2319 :**  
**Seminar „Ausgewählte Kapitel der Nachrichtentechnik“**  
**im SS 99**

**Thema: Entwicklung der Mobilfunksysteme**  
**„Satellitenfunksysteme“**

**von**

**Braighith Naser**

**Betreuerin: Dipl.-Ing. Heike Bechtloff**

## **Inhaltsverzeichnis:**

	Seite
Einleitung.....	3
1. Überblick über die Entwicklung der Satellitenkommunikation.....	4
2. Satellitenorganisationen.....	5
3. Einsatzfelder.....	6
4. Technische und physikalische Grundlagen.....	6
4.1. Physikalische Grundlagen für die Umlaufbahn.....	6
4.2. Frequenzwahl.....	8
4.3. Frequenzregulierung und Frequenzbänder.....	8
4.4. Elevationswinkel und Ausleuchtzone.....	9
4.5. Modulationsverfahren.....	9
4.6. Zugriffsverfahren.....	10
4.7. Übertragungsqualität einer Satellitenfunkstrecke.....	10
5. Charakterisierung der Hauptkomponenten eines Satellitensystems.....	11
6. Funktionsweise eines Satellitenfunksystems.....	12
7. Satellitensysteme.....	12
7.1. Geostationäre Satellitensysteme.....	13
7.2. Nicht- geostationäre Satellitensysteme.....	14
8. Das IRIDIUM-Projekt.....	15
9. Schluß.....	18
10.Literaturverzeichnis.....	19

## **EINLEITUNG**

Die mobile Kommunikation ist heute bereits fester Bestandteil unseres gesellschaftlichen Lebens geworden. In fast allen Bereichen der mobilen Kommunikation (Mobiltelefon, Funkrufdienst usw.) sind stark steigende Teilnehmerzahlen zu verzeichnen. Viele Reisende wollen auch im Flugzeug oder auf dem Schiff auf den Komfort der mobilen Kommunikation nicht verzichten. Mit der Satellitenkommunikation soll in diesem Beitrag eine weitere Entwicklungsrichtung der mobilen Kommunikation behandelt werden.

Zunächst werden die Entwicklung der Satellitengenerationen, Anwendungen, technische und physikalische Grundlagen und Leistungsmerkmale, sowie Vor- und Nachteile von Satellitenkommunikationssystemen dargestellt. Anschließend werden einige Satellitenprojekte aufgezählt und das Sprachkommunikationssystem IRIDIUM ausführlich betrachtet.

## **1. Überblick über die Entwicklung der Satellitenkommunikation**

Am 4. Oktober 1957 begann der erste künstliche Satellit, der russische „Sputnik“, die Erde zu umkreisen. Von 1959 bis 1963 nutzte die US-Marine den Mond, der selbstverständlich auch ein Satellit der Erde ist, als Reflektor für Funkübertragungen zwischen Washington und Hawaii. Die Raumfahrttechnik diente bis 1962 nur der Forschung und militärischen Zwecken.

Der enorm wachsende Bedarf an Übertragungskapazität für kommerzielle Kommunikationsdienste (Telefon-, und Fernsehübertragung, später auch Datenkommunikation) führte zur Entwicklung neuer leistungsfähiger Generationen von Nachrichtensatelliten vgl. Abb. 1[4].

### **1.Generation:** Feste Satellitenkommunikationssysteme

Sie dienten der Funkkommunikation zwischen den Erdstationen durch Satellitenlink (Up- und Downlink). Das System besteht aus einem Satelliten und Gateway-Erdstationen. Diese sind sehr groß und teuer wegen der komplizierten Antennen. Von Mitte der 60er bis Mitte der 70er Jahre waren die Satelliten sehr klein, so daß sie schwache Leistungen für das Senden auf die Erde besitzen. Deshalb müssen die Erdantennen sehr groß sein, um schwache Signale von diesen Satelliten zu erhalten und starke Signale senden zu können. Typisches Beispiel ist der INTELSAT (EARLY BIRD 1965). Der Antennendurchmesser für die Erdstationen war ca. 30 m groß. Die Erdstationen müssen deshalb auf der Erde fest sein.

Durch den technischen Fortschritt wurden in den 80er Jahren größere Satelliten und kleinere Antennen (ca. 2m) für die Erdstationen entwickelt (z.B. INTELSAT-VII mit einem Gewicht von ca. 1500 kg und weniger als 2m Erdstationantenne). Diese Satelliten mit sehr kleinen Antennen nennt man VSAT-Systeme (*Very Small Aperture Terminals*). Diese kleinen Antennen wurden dann auf die Mobilstationen installiert.

### **2.Generation:** Mobile Satellitenkommunikationssysteme

Sie dienten in den 90er Jahren der Funkkommunikation zwischen mobilen Erdstationen und festen Erdstationen (Gateways) durch Satellitenlink. Das System besteht aus einem Satelliten, festen Erdstationen und Mobilstationen (Schiffe, Flugzeuge und Landfahrzeuge).

Eine direkte Kommunikation zwischen diesen Mobilstationen ist ohne Weitervermittlung über Erdstationen nicht möglich. Der INMARSAT, der seine kommerzielle Dienste weltweit für Schiffe, Flugzeuge und Landmobile anbietet, ist ein Beispiel für diese Generation.

### **3.Generation:** Portable Satellitenkommunikationssysteme



Die privaten Betreiber von Satellitensystemen sowie internationale Firmen und Konzerne beschäftigen sich vor allem mit der Realisierung neuer Konzepte und den weltweiten satellitenbasierten Mobilkommunikationssystemen. Diese Firmen setzen auf eine nahezu flächendeckende Versorgung der Erdoberfläche durch LEO (Low Earth Orbit)- und MEO- (Medium Earth Orbit) Satellitensysteme.

### **3. Einsatzfelder**

Die Satelliten werden hauptsächlich für Verteilungsfunktionen eingesetzt, z.B. von Fern- und Tonprogrammen, aber auch von Daten.

Mobile Satellitensysteme werden zur Zeit hauptsächlich dort eingesetzt, wo keine anderen terrestrischen (drahtlose und drahtgebundene) Kommunikationssysteme zur Verfügung stehen (Hochsee, Wüste). Die vorhandenen Kommunikationsnetze können durch Satellitenanlagen vollständig überbrückt werden.

Typische Anwendungen für Satellitenkommunikation sind Telefon, Notfallkommunikation in Krisen- und Katastrophengebieten, Reportagen aus Kriegsregionen, Flugzeug- und Schiffkommunikation.

Ein Zweig mit völlig neuen Anwendungen ist der Satellitenmobilfunk, der bislang fast ausschließlich in der See- und Luftfahrt sowie in Landfahrzeugen etabliert war.

### **4. Technische und physikalische Grundlagen**

#### **4.1. Physikalische Grundlagen für die Umlaufbahn:**

Es gibt für Kommunikationssatelliten grundsätzlich 3 Umlaufbahnen (Orbits) vgl. Abb. 2:[3]

- a) Umlaufbahnen über dem Äquator
- b) Umlaufbahnen über die Pole
- c) Umlaufbahnen mit unterschiedlichen Neigungswinkeln zur Äquatorebene.

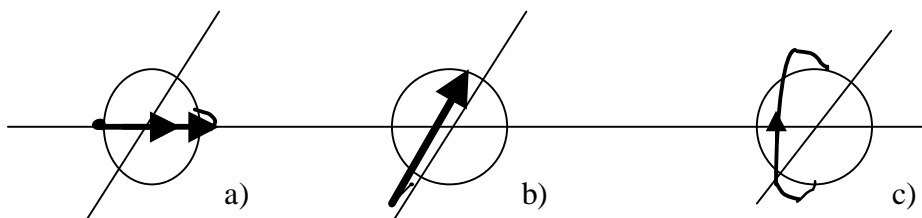


Abbildung 2: Drei Umlaufbahnen für Satelliten

Sichtbarkeitsdauer:

Nur auf der geostationären Bahn sind Satelliten 24 Stunden sichtbar. Auf den anderen Bahnen ist die Sichtbarkeitsdauer von der Bahnhöhe und der Bahnneigung gegen den Äquator abhängig.

Die benötigten Kräfte für Satelliten:

Es muß zwischen der Fliehkraft (Zentrifugalkraft), die auf den Satelliten wirkt, und der Erdanziehung (Gravitation) ein Gleichgewicht herrschen (Keplerschen Gesetze), damit ein Satellit eine vorgegebene Umlaufbahn einhält. Anderenfalls entweicht der Satellit in den freien Raum oder fällt auf die Erde zurück vgl. Abb. 3.

Die Erdanziehungskraft ergibt sich aus folgender Gleichung:  $F_G = -\gamma m_e m_s / r^2$  und die Fliehkraft aus der Gleichung:  $F_z = m_s \omega^2 r$ . Dabei ist  $\gamma$  die Gravitationskonstante,  $m_s$  die Masse des Satelliten,  $m_e$  die Masse der Erde,  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit und  $r$  der Abstand zwischen dem Erdmittelpunkt und dem Satelliten.

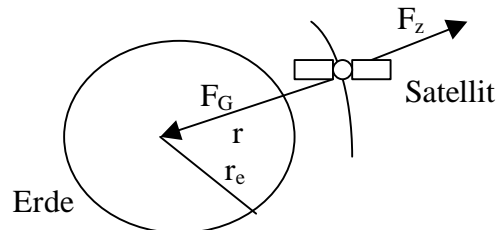


Abbildung 3: Die benötigten Kräfte für Satelliten

Es sind hier zwei physikalische Gesetze zu beachten: Je schneller ein Körper rotiert, desto höher wird die Fliehkraft. Die Erdanziehungskraft nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Daraus folgt eine Beziehung zwischen Umlaufgeschwindigkeit (Rotation), Bahnhöhe (Entfernung zum Erdmittelpunkt), Fliehkraft und Gravitation.

Für jede Bahnhöhe ist eine bestimmte Umlaufgeschwindigkeit erforderlich, damit zwischen der Fliehkraft und der Gravitation Gleichgewicht herrscht (siehe Tabelle 1 als Beispiel). Deshalb spricht man von Gleichgewichtsbahnen.

Höhe km	Geschwindigkeit km/s	Umlaufzeit pro Tag	Umläufe
0	7.91	84.5 min	17
300	7.75	90 min	16
557	7.58	96 min	15
1730	7.05	2 Std.	12
4200	6.15	3 Std.	8
6430	5.60	4 Std.	6
11000	4.80	6.3 Std.	3.8
35900	3.06	24 Std.	1

Tabelle 1: Beziehung zwischen Bahnhöhe und Bahngeschwindigkeit

Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß für eine gewisse Bahnhöhe große Geschwindigkeiten, und für eine hohe Umlaufbahn nur geringe Geschwindigkeit notwendig sind. Wir nehmen als Beispiel die geostationäre Umlaufbahn, die sich parallel zum Äquator in einer Entfernung von 35730 km befindet. Die Umlaufzeit für einen Satelliten auf dieser Bahn beträgt bei einer Geschwindigkeit von 3.06 km/s genau 23 Stunden 56 Minuten und 4 Sekunden. Diese Umlaufzeit entspricht der Erdrotation.

Störungen der Umlaufbahnen:

Verschiedene Faktoren können die geplanten Umlaufbahnen von Satelliten stören, so daß in kurzen Abständen treibstoffzehrende Korrekturmanöver durchgeführt werden müssen. Die Bahnkorrekturen stellen den wichtigsten Grund für die Beschränkung der Lebensdauer von Kommunikationssatelliten dar. Bei den heutigen Nachrichtensatelliten ist der Treibstoffvorrat nach rund 10 Jahren erschöpft.

Satelliten im GEO (Geostationary Orbit) können durch das unterschiedliche Gravitationspotential auf der Erde in ihrer Bahn gestört werden (driften). Zusätzlich erfahren sie Störungen durch Gravitationskräfte der Sonne und des Mondes.

Satelliten mit großen Solarpanelen werden durch den Solardruck (Sonnenenergie) beeinflusst, der aber auch bewußt zur Lagekorrektur genutzt werden kann.

#### **4.2. Frequenzwahl:**

Bei der Wahl der Frequenzen für Satellitenverbindungen ( Aufwärtsstrecke = uplink / Abwärtsstrecke = downlink) sind einige Faktoren hinsichtlich der Anwendung erforderlich, für die der Nachrichtensatellit eingesetzt wird.

Die Faktoren:

- Eigenrauschen: Je höher die Frequenz ist, desto höher wird das Eigenrauschen eines Empfängers. Um dies zu verhindern muß entweder die Sendeleistung des Satelliten oder der Gewinn der Empfängerantenne erhöht werden.
- Antennenöffnungswinkel: Je höher die Frequenz ist, desto kleiner wird der Öffnungswinkel einer vorgegebenen Antenne. Je größer der Antennendurchmesser ist, desto geringer wird der Öffnungswinkel.  
Öffnungswinkel =  $70^\circ/d$ ,      ? : Wellenlänge, d : Antennendurchmesser.

Für Mobilkommunikation hat der Öffnungswinkel der Antenne eine besonders große Bedeutung. Je kleiner der Öffnungswinkel einer Sende- / Empfangsantenne ist, desto genauer muß sie ausgerichtet sein, bzw. nachgeführt werden. Je größer der Öffnungswinkel ist, um so weniger genau und schnell muß nachgeführt werden, damit der Sichtkontakt zur Antenne nicht verloren geht.

Bei fest auf Fahrzeugen installierten Antennen ist eine automatische Nachführung noch in gewissem Umfang möglich, für Antennen von tragbaren Geräten wird dies außerordentlich problematisch. Hier ist die geeignetste Antenne ein Rundumstrahler (omnidirektionale Antenne). Es muß also ein geeigneter Kompromiß zwischen Antennenöffnungswinkel und Frequenz gefunden werden. Für Anwendungen in der Mobilkommunikation kann nur der niedrigste Frequenzbereich zwischen 1.5 GHz und 1.6 GHz in Frage kommen.

#### **4.3. Frequenzregulierung und Frequenzbänder:**

Die Mitgliedsländer der internationalen Fernmeldeunion ITU (International Telecommunications Union) sind an die Beschlüsse der *World Radio Conference* (WRC) gebunden. Die Frequenzvergabe für Satellitensysteme wird bei der amerikanischen Regulierungsbehörde *Federal Communications Commission* (FCC) beantragt.

Der kommerzielle Satellitenfunk benutzt zur Zeit Frequenzen im C- und Ku-Band. Im C-Band sind dies der Bereich 5.925-6.425 GHz für den Uplink und der Bereich 3.7-4.2 GHz für den Downlink, im Ku-Band die Frequenzbereiche 11.7-12.2 GHz für den Downlink und 14-14.5 GHz für den Uplink. Es wurden 1992 von WCR zusätzlich Frequenzen im S- und im K/Ka-Band für den Satellitenfunk reserviert. Im S-Band sind die Frequenzbänder 1980-2010 für Uplink und 2170-2200 MHz für den Downlink für das sogenannte Satellitensegment des

UMTS bereitgestellt worden. Mit jeweils 3.5 GHz Bandbreite (27.5-31 GHz und 17.7-21.2 GHz) wird im Ka-Band erheblich mehr Bandbreite zur Verfügung stehen als in den bisher bereitgestellten Frequenzbändern.

Die FCC hat für mobile Satellitensysteme Frequenzen im Frequenzband 1610-1626,5 MHz als erste vergeben. Es wurden 5,15 MHz an das IRIDIUM-TDMA-System sowie 11,35 MHz an die CDMA-Systeme Odyssey und Globalstar vergeben, die sich dieses Frequenzband teilen werden vgl. Tabelle 2.

Frequenzband (kommerziell)	Uplink	Downlink
C – Band	5.925 – 6.425 GHz	3.7 – 4.2 GHz
Ku – Band	14 – 14.5 GHz	11.7 – 12.2 GHz
S – Band	1980 – 2010 MHz	2170 – 2200 MHz
Ka – Band	27.5 – 31 GHz	17.7 – 21.2 GHz
L – Band	1610 – 1626.5 MHz	1525 – 1530 MHz

Tabelle 2: Frequenzbänder für Satellitenkommunikation

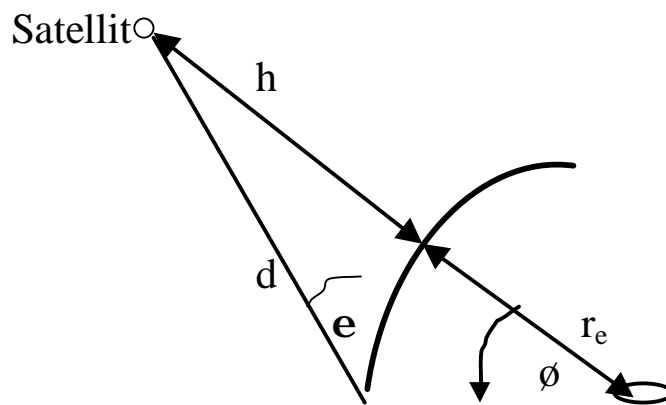
#### 4.4. Elevationswinkel und Ausleuchtzone:

Die Größe der Ausleuchtzone wird bestimmt durch den minimalen Elevationswinkel  $e_{min}$ , der sich aus dem maximal möglichen Abstand eines Mobilterminals von dem Satelliten bestimmen läßt vgl. Abb. 4 [8], für die Elevation  $e$  gilt:  $e = \arccos [((r_e + h) / d) \sin \phi]$ . Um größere Bereiche ohne Funkversorgung wegen Abschattung zu vermeiden, ist man auf die Einhaltung eines minimalen Elevationswinkels  $e_{min}$  angewiesen.

Der Radius einer Ausleuchtzone hängt vom Erdradius  $r_e$  und der Bahnhöhe  $h$  des Satelliten über der Erdoberfläche ab:  $r_{cov} = r_e [\arccos (r_e \cos e_{min} / (r_e + h)) - e_{min}]$ . Bei gegebenen maximalen Abstand  $d_{max}$  und minimaler Elevation  $e_{min}$  ergibt sich die Bahnhöhe aus:

$$h = \sqrt{d_{max}^2 + 2 d r_e \sin e_{min} + r_e^2} - r_e$$

Die von einem Satelliten versorgte Fläche ist dann:  $A_{cov} = 2\pi r_e^2 (1 - \cos \phi)$ . Aus diesen Gleichungen kann man nun den Radius der Ausleuchtzone, die Bahngeschwindigkeit des Satelliten und die Umlaufzeit um die Erde bestimmen. z.B. IRIDIUM-Satellit (auf 780 km Bahnhöhe) mit ca. 28 500 km/h über einen ortsfesten Erdpunkt ist von dort nur ca. 5-7 min lang zu sehen.



#### **4.5. Modulationsverfahren:**

Die auf einer Funkstrecke zu übertragende Information wird einer elektromagnetischen Welle, dem Träger, aufmoduliert. Von den vier Parametern einer Welle, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Amplitude  $\hat{u}$ , Frequenz  $\omega$  und Phase  $\mathbf{j}$ , können die letzten drei variiert werden. Das Trägersignal  $u_T(t) = \hat{u}_T \sin(\omega_T t \pm \mathbf{j}_T)$  wird durch das Signal  $u_M(t) = \hat{u}_M \sin(\omega_M t \pm \mathbf{j}_M)$  moduliert. Entsprechend spricht man von:

- Amplitudenmodulation (*Amplitude Shift Keying, ASK*),  
 $u_{AM}(t) = k u_M(t) \sin(\omega_T t \pm \mathbf{j}_T)$
- Frequenzmodulation (*Frequency Shift Keying, FSK*)  
 $u_{FM}(t) = \hat{u}_T \sin(k u_M(t) t \pm \mathbf{j}_T)$
- Phasenmodulation (*Phase Shift Keying, PSK*)  
 $u_{PM}(t) = \hat{u}_T \sin(\omega_T t \pm k u_M(t))$  k: Multiplikationsfaktor

#### **4.6. Zugriffsverfahren:**

Vielfachzugriffsverfahren für die Satellitenkommunikation können in folgende Klassen unterteilt werden:

- *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*,
- *Time Division Multiple Access (TDMA)*,
- *Code Division Multiple Access (CDMA)* und
- *Space Division Multiple Access (SDMA)*.

Bei FDM wird ein Übertragungskanal in mehrere Unterkanäle mit schmaler Bandbreite unterteilt. Diese werden durch Schutzbänder getrennt, um eine Störung der Subkanäle zu vermeiden. Teilen sich mehrere Teilnehmer die durch FDM erstellten Unterkanäle, so daß eine Station einen Subkanal exklusiv nutzen kann, dann spricht man von Frequenzaufteilungsvielfachzugriff bzw. FDMA. Der Teilnehmer kann bei diesem Verfahren zu jeder Zeit senden.

Beim Zeitaufteilungszugriff bzw. TDMA steht dem Teilnehmer die gesamte Bandbreite zur Verfügung, dieser darf aber nur zu bestimmten Zeiten senden. Deshalb wird der Übertragungskanal in Zeitscheiben (Slots) unterteilt, die nach gewissen Regeln von verschiedenen Stationen genutzt werden. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Slots muß jeweils ein Schutzkanal (Guard-Time) vorgesehen werden, der eine unterschiedliche Synchronisation der auf die beiden Slots zugreifenden Stationen ausgleicht.

Beim Codeaufteilungsvielfachzugriff bzw. CDMA können mehrere unterschiedliche codierte Übertragungen gleichzeitig auf denselben Kanal erfolgen. Beim Raumaufteilungsvielfachzugriff bzw. SDMA können gleiche Übertragungsfrequenzen mehrfach in verschiedenen engen begrenzten Ausleuchtzonen (Spot Beams) des Satelliten benutzt werden. Die verschiedenen Vielfachzugriffsverfahren können kombiniert werden z.B. CDMA und TDMA.

#### **4.7. Übertragungsqualität einer Satellitenfunkstrecke:**

Eine Satellitenstrecke besteht aus zwei Funkstrecken (Uplink und Downlink), wobei der Satellit als Empfänger des Uplinks und als Sender des Downlinks fungiert.

Drei Faktoren bestimmen die Übertragungsrate und Übertragungsqualität einer Satellitenstrecke:

- Der Sender (Sendeleistung, Antennengewinn, Modulationsverfahren, usw.),
- Die Funkstrecke (Freiraum- Atmosphärische und Regendämpfung, usw.)
- Der Empfänger (Antennengewinn, Rauschtemperatur des Empfängers).

## **5. Charakterisierung der Hauptkomponenten eines Satellitensystems**

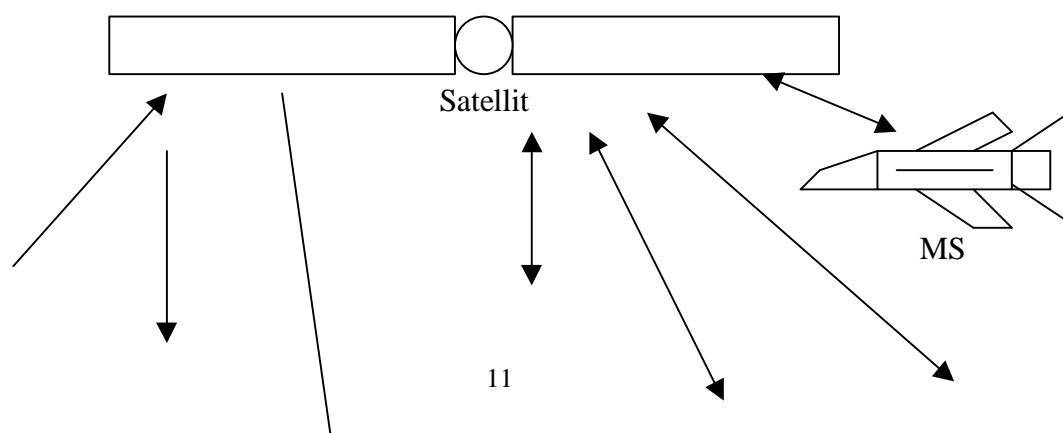
Ein Satellitenfunksystem besteht grundsätzlich aus drei Teilen: dem Raumsegment (Satelliten), der Erd- oder Bodenstation und dem mobilen Endgerät (MS). Das Raumsegment wird durch den Satelliten gebildet. Das Bodensegment enthält die Erdfunkstellen (Sende- und Empfangseinrichtungen) vgl. Abb. 5.

Der Satellit übernimmt in der Regel nur die Übertragungsfunktion. Für Nachrichtensatelliten ist es auch typisch, daß alle Vermittlungsaufgaben von der Bodenstation erledigt werden. Es ist von großer Bedeutung, daß die zukünftigen Satelliten auch Vermittlungsaufgaben übernehmen können (*On-Board Processing*). Der Satellit ist somit nur die Repeater-Station für Signale, die ihn in einem engen fokussierten Strahl auf einer bestimmten Trägerfrequenz von der Bodenstation erreichen und die er verstärkt in einem anderen Frequenzbereich auf die Erde zurücksendet.

Der Grad der Bedeckung auf der Erde ist vom Öffnungswinkel der Sendeantenne des Raumsegments und der Ausrichtung dieser Antenne abhängig. Je größer der Durchmesser der Sendeantenne bei einer vorgegebenen Frequenz ist, desto enger ist die Strahlungskeule (kleine Gebietsabdeckung).

Das Erdsegment, in dem der wesentliche Teil der Systemintelligenz zusammengebracht ist, besteht aus verschiedenen Bodenstationen. Die Bodenbetriebsstation dient der Überwachung und Steuerung des Satelliten, z.B. bekommt der Satellit Steuerbefehle zur Lagekontrolle und Korrekturen. Die Kontrollstation überwacht die Einhaltung der technischen Eigenschaften der Satellitenstrecke.

Alle anderen Erdfunkstellen dienen der Übertragung der Nutzsignale zum Satelliten. Dabei sind große Erdfunkstellen mit mehreren Antennenanlagen ausgestattet und ständig mit Personal besetzt. Kleine Erdfunkstellen laufen automatisch. Die mobilen Uplink-Stationen werden weltweit zur aktuellen Berichterstattung eingesetzt.



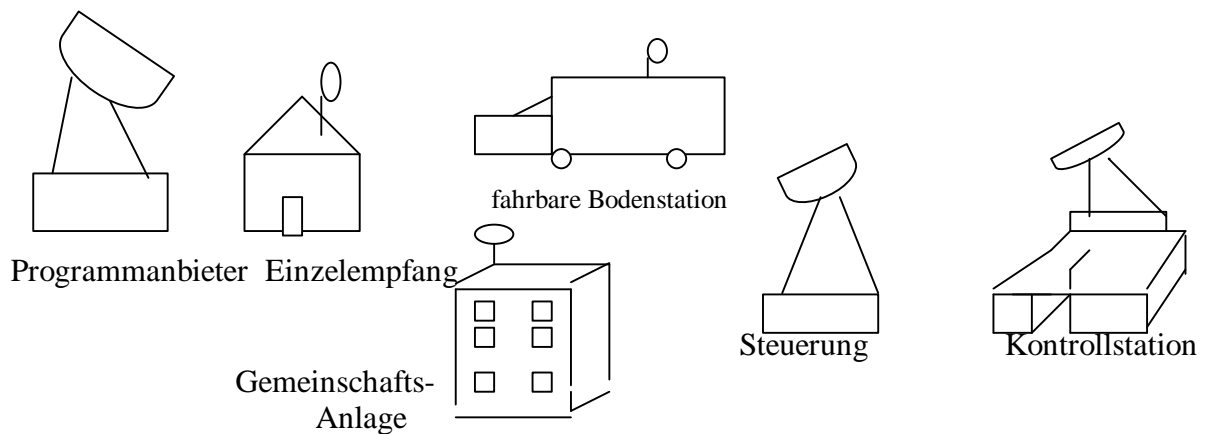


Abbildung 5: Hauptkomponenten eines Satellitensystems

### 6. Funktionsweise eines Satellitenfunksystems

Die Übertragungskapazität eines Satellitensystems wird durch Multiplexen mehreren Nutzern an einer Sendestation zur Verfügung gestellt. Anschließend werden die zu übertragenden Daten mit einem Kanalcodierungsverfahren gegen Fehler gesichert und auf die gewünschte Trägerfrequenz für den Uplink aufmoduliert. Der Satellit empfängt das Signal, setzt es auf die Downlink-Frequenz um, verstärkt es und sendet es an die Empfangsstation, die entsprechend das Signal demoduliert, decodiert und demultiplext. Ein *On-Board-Processing*-Satellit führt prinzipiell die gleichen Funktionen wie eine Erdfunkstelle durch (siehe Abb. 6).

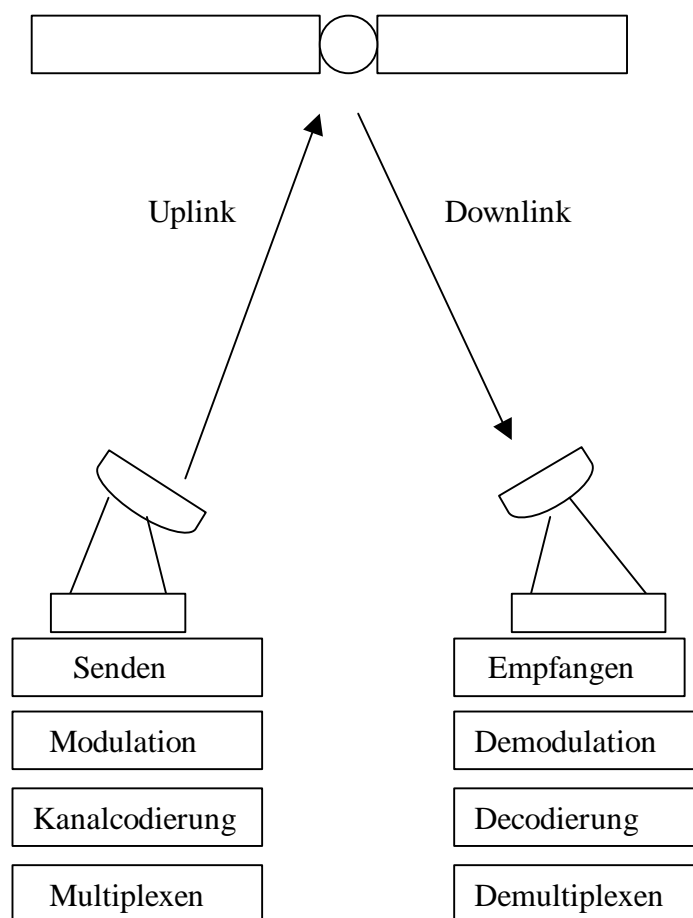


Abbildung 6: Funktionsweise eines Satellitenfunksystems

## 7. Satellitensystem:

Entsprechend den Versorgungsgebieten eines Satellitensystems unterscheidet man weltweit regionale und nationale Systeme. Bezüglich der institutionellen und organisatorischen Gestaltung lassen sich internationale, nationale und private Betreiber von Satellitensystemen unterscheiden. Der wichtigste Aspekt bei der Dimensionierung von Satellitensystemen ist die Bahnhöhe. Die Systeme unterteilt man in:

- *Low Earth Orbit-* (LEO),
- *Medium Earth Orbit-* (MEO),
- *Highly Elliptical Orbit-* (HFO) und
- *Geostationary Orbit-System* (GEO) vgl. Abb. 7 [8].

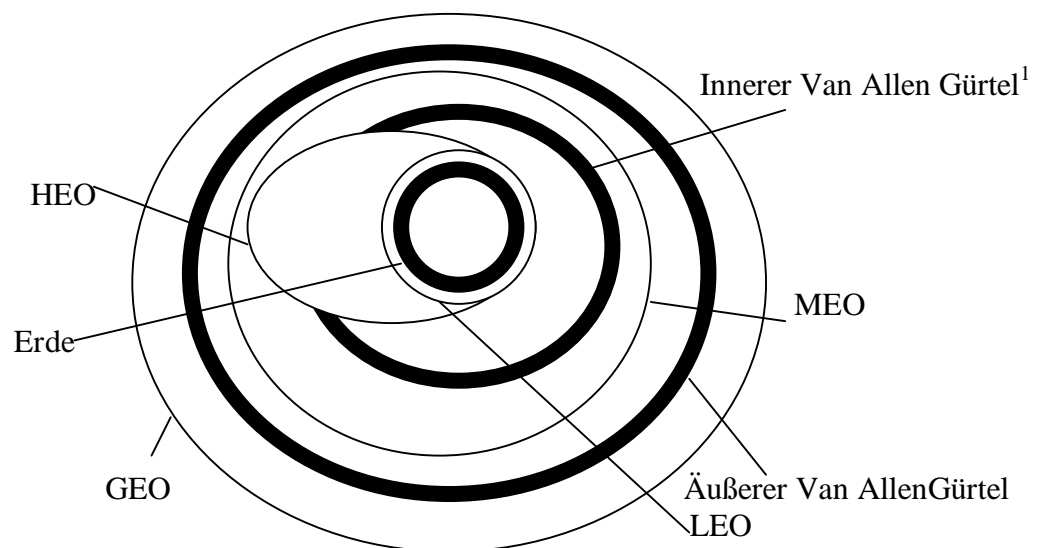


Abbildung 7:Umlaufbahnen der Satellitensysteme

### 7.1. Geostationäre Satellitensysteme

Die geostationäre Bahn ist eine Umlaufbahn, die sich parallel zum Äquator in einer Höhe von 35.786 km befindet. Satelliten in dieser zirkulären Umlaufbahn haben eine Winkelgeschwindigkeit (3.06km/s), die gleich der Rotationsgeschwindigkeit der Erde ist. Die Umlaufzeit entspricht der Erdrotation (23 Std. 56 Min 4sek). Deshalb scheint es für einen Beobachter auf der Erde, daß dieser Satellit an einem Punkt feststeht.

**Die Vorteile von geostationären Satellitensystemen gegenüber nicht-geostationären Systemen** sind:

- einfache Konfiguration
- Abdeckung großer Gebiete mit nur einem Satelliten. Große Distanzen können leicht überbrückt werden.
- Mit drei geostationären Satelliten läßt sich praktisch ein großer Teil der Erde funktechnisch bedecken vgl. Abb. 8. Die Satelliten bedecken 24 Std. immer die gleiche

<sup>1</sup> Benannt nach James Alfred van Allen, 1914, amerikanischer Physiker. Die Van Allen Gürtel sind Strahlungsgürtel der Erde (Zonen ionisierender Strahlung hoher Intensität).

Fläche auf der Erde. Sie verhalten sich dabei fast wie ortsfeste Sendeanlagen. Empfangsantennen für den Direktempfang können deshalb auf einen Satelliten ausgerichtet und fixiert werden.

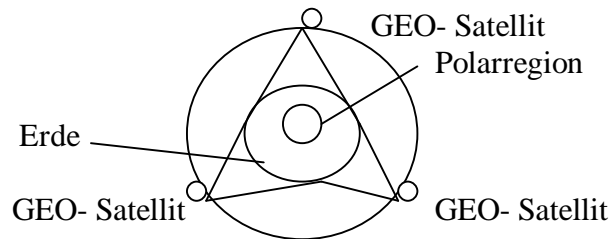


Abbildung 8: Abdeckung der Erde mit drei GEO- Satelliten

- Teure und aufwendige Systeme für Nachführung der Empfangsantennen entfallen.
- Geringe Routingsprobleme in den Versorgungsgebieten aufgrund großer Ausleuchtzonen der Satelliten.
- Die geringe Relativbewegung zur Erde verursacht nur unerhebliche Dopplerverschiebungen der Signale.

***Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:***

- Aufgrund der Entfernung und der Dämpfung werden hohe Sendeleistungen und große Empfangsantennen benötigt.
- Regionen hoher geographischer Breite können nicht versorgt werden. Für Funkverbindungen von und zu einem Nachrichtensatelliten ist Sichtverbindung erforderlich. Der mit zunehmender geographischer Breite sinkende Elevationswinkel unterschreitet für Breitengrade  $f > 72^\circ$  eine Elevation von  $10^\circ$ . In diesen Regionen stehen die geostationäre Satelliten nur ganz niedrig über dem Horizont und können deshalb von Hindernissen in der optischen Achse zum Satelliten (Gebäude, Wald, Hügel und Berg) leicht verdeckt werden.
- Die Versorgung von städtischen Gebieten ist abschattungsbedingt problematisch. In Deutschland ( $47^\circ$ - $55^\circ$ nördlicher Breite) werden Elevationswinkel zwischen  $20$  und  $30^\circ$  erreicht. Der Empfang in diesen Breitengraden ist nur mit gerichteten Antennen möglich.
- Der Transfer der Satelliten in den geostationären Orbit ist teuer (viel Energie, große leistungsstarke Raketen).
- Ein geostationärer Satellit kann bis zu  $60$  km von seiner Position driften, deshalb sind Positionskorrekturen des Satelliten unerlässlich.

Aufgrund dieser genannten Nachteile sind geostationäre Satellitensysteme für Mobilfunksysteme ungeeignet, die persönliche Kommunikation ermöglichen sollen. Sie sind primär für ortsfeste Dienste geeignet.

**7.2. Nicht- geostationäre Satellitensysteme:**

Mit steigendem Interesse an mobiler Kommunikation über Satelliten wurde die Entwicklung von Systemen mit niedrigen Umlaufbahnen beschleunigt. Die Satelliten der LEO-Systeme befinden sich zwischen  $200$  km Höhe und dem inneren Van Allen Gürtel auf  $1500$  km Höhe. Die Satelliten der MEO-Systeme befinden sich zwischen den beiden Van Allen Gürteln zwischen  $5000$  und  $13000$  km. Neben den zirkularen Systemen gibt es auch HEO-Systeme, die durch elliptische Bahnen eine bessere Abdeckung stärker bevölkerter Gebiete erreichen können, ohne auf die Vorteile niedriger Bahnen verzichten zu müssen.

**Vorteile von LEO- und MEO/ICO-Systemen gegenüber GEO-Systemen**

- Geringere erforderliche Sendeleistungen durch geringe Bahnhöhe.
- Höhere durchschnittliche Elevationswinkel; wegen der großen Anzahl von Satelliten kann immer der Satellit für die Kommunikation ausgewählt werden, der die geringste Distanz zum Mobilfunkteilnehmer hat.
- Hohe Betriebssicherheit durch erhöhte Redundanz.
- Gute Versorgung von Regionen hoher geographischer Breite (z.B. Polarregionen).
- Geringe Signallaufzeit.

**Aufgrund der niedrigen Bahnen ergeben sich aber auch Nachteile:**

- Kurze Verbindungsdauer zum Satelliten unter sich ändernden Elevationswinkeln.
- Kleinere Versorgungsgebiete pro Satellit.
- Großer Aufwand bei der Systemsteuerung.

Die HEO-Satelliten nähern sich in ihrem erdnächsten Punkt (Perigäum) bis auf wenige hundert Kilometer der Erdoberfläche, um die größte Entfernung (Apogäum) im Bereich des geostationären Orbits zu erreichen. Dort werden sie für Kommunikationszwecke eingesetzt, da ihre Bahngeschwindigkeit dort am geringsten ist und ein Satellit somit von einem bestimmten Punkt lange sichtbar bleibt. Satelliten in diesen Bahnen durchstoßen immer wieder die Van Allen Gürtel und sind damit einer erhöhten Strahlenbelastung ausgesetzt. Tabelle 3 zeigt den Vergleich zwischen drei verschiedenen Satellitensystemen.

	GEO	LEO	HEO
<b>Umlaufbahn (Orbits)</b>	parallel zum Äquator zirkular Höhe: 35786 km	Polarbahn zirkular ca.780 km	elliptisch Perigäum:500 km Apogäum: 40000 km
<b>Satellit</b>	Anzahl: 1	6	4
	Umlaufzeit: 23 Std. 56 Min. u.4 s	1Std.40 Min.	12 Std.
	Min. Elevations- winkel: 5°	8°	80°
	Gewicht: ca.1500 kg	ca.700 kg	ca.1000 kg
	Anzahl pro Orbit: 3	66 (11/Orbit)	12 (3/Orbit)
	Sichtbarkeitzeit: 24 Std.	10 Min.	8 Std.
<b>Beispiel :</b>	Inmarsat, COMETS	Iridium	Molniya

Tabelle 3: Vergleich zwischen drei Satellitensystemen

**8. Das IRIDIUM-Projekt**

Der Projektname ist von dem Atom des chemischen Elements Iridium (77 Elektronen) abgeleitet. Die amerikanische Firma Motorola hat 1990 die Entwicklung dieses Systems bekannt gegeben.

Iridium ist ein LEO-System, das den Einsatz von Teilnehmergeräten in der Größe von mobilen GSM-Endgeräten erlaubt. Es ist das erste Satellitentelefonnetz für mobile Endgeräte (Mobilfunknetz). Das System besteht aus knapp 700 kg schweren LEO-Satelliten mit

Vermittlungsfunktion und 21 Bodenstationen weltweit. Dieses System benutzt Zwischen-satellitenverbindungen (Satellit-Satellit).

Das Iridium- System basiert auf einer Konstellation von 66 Satelliten, die sich auf einer Höhe von 780 km auf polaren Bahnen mit einer Bahninklination (Winkel zwischen Bahn und Äquatorebene) von  $86^\circ$  um die Erde bewegen, und 12 Reservesatelliten. Es sind jeweils 11 Satelliten auf sechs Umlaufbahnen angeordnet, so daß die gesamte Erdoberfläche versorgt wird. Das Iridium-Netz soll den Teilnehmern Telefon-, Fax-, Personenruf-, und Datenübertragungsdienste sowie Ortungsfunkdienst an allen Orten des Erdballs bieten.

Das Mobilterminal hat ein Taschenformat. Es handelt sich um ein Dualmode-Gerät, das sowohl die Verbindung zum Satelliten als auch zu einem terrestrischen Mobilfunknetz ermöglicht. In Deutschland genehmigte die Regulierungsbehörde für Satellitentelefonie eine Frequenz von 1621.35-1626.50 MHz. Die Telefone sollen mit einer Leistung von maximal 0,645 Watt senden.

Für die Verbindung Satellit – MS (Mobilstation ) wird das L-Band (1621.35-1626.5 MHz) und für die Verbindungen Satellit – Satellit (23.18-23.38 GHz), Satellit – Bodenstation (Gateway) wird das Ka-Band (Downlink: 19.4-19.6 GHz, Uplink: 29.1-29.3 GHz) verwendet vgl. Abb. 9.

Iridium ist ein zellulares Mobilfunksystem, bei dem sich der Teilnehmer nicht im Netz bewegt, sondern das Netz sich kontinuierlich über dem Teilnehmer fortbewegt. Aufgrund der niedrigen Umlaufbahn der Satelliten folgt eine relativ hohe Geschwindigkeit der Satelliten bezogen auf die Erdoberfläche, so daß die Beams sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 450 km/min über die Erdoberfläche hinweg bewegen. Da jeder Beam nur ca. 400-600 Km abdeckt, muß bei einer Gesprächsverbindung von einem Teilnehmergerät zu einem Satelliten durchschnittlich jede Minute ein Handover ausgeführt werden. Der Handover erfolgt dabei entweder von einem Beam zu einem anderen Beam desselben Satelliten oder von Satellit zu Satellit. Der Zellwechsel erfolgt beim Iridium-System weniger komplex als bei einem terrestrischen Mobilfunknetz.

Die Luftschnittstelle des Iridium-Systems verwendet ein Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)-Modulationsverfahren. Bei diesem Verfahren werden vier diskrete Phasenlagen für die Umtastung verwendet. Das Digitalsignal wird in den vier Phasenlagen von  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  umgetastet. Jeder Phasenzustand repräsentiert zwei zusammengefaßte Bits, ein sogenanntes Dibit. Die FCC hat für IRIDIUM nur noch 5,15 MHz in L- Band zugeteilt. Die Kanalbreite beträgt 31,5 KHz.

Der Vielfachzugriff erfolgt bei dieser Luftschnittstelle mit einem Kombinierten FDMA / TDMA / TDD- Verfahren. Der vorgesehene TDMA-Rahmen ist 90 ms lang und enthält jeweils vier Up- und Downlinkkanäle sowie einen Kanal zur Signalisierung und für Funkrufzwecke. Die Übertragungsrate beträgt 4800 Bit/s für Sprache und 2400 Bit/s für Daten.

Das Frequenzband von 5.15 MHz, ist in 124 Träger unterteilt, die jeweils vier Duplexkanäle enthalten. Es stehen insgesamt also 496 Kanäle zur Verfügung. Da bei der gegebenen Zellstruktur, die Frequenzen pro Satellit viermal wiederverwendet werden (12 Zellen pro Cluster, 48 Zellen pro Satellit), können theoretisch 1984 Verbindungen pro Satellit gleichzeitig bestehen. Aufgrund der benutzten verfügbaren Batterieleistung von 1400 Watt kann der Satellit jedoch nur 1100 Verbindungen gleichzeitig betreiben.

### Probleme und Kritiken an Iridium:

Je näher sich die Satelliten zur Polarregion hinbewegen, um so mehr überschneiden sich die Beams der verschiedenen Satelliten. Dies führt dazu, daß Beams zeitweise ausgeschaltet werden müssen. Dies bedeutet von den insgesamt 3168 Zellen (66 x 48) können nur 2150 Zellen gleichzeitig aktiv sein.

Die Sprache wird mit nur 4,8 kbit/s digital übertragen. Die Teilnehmerkapazität eines terrestrischen Mobilfunknetzes im GSM/Standard (ca. 50 Mio. Teilnehmer) ist viel höher als beim Iridium (ca. 3 Mio. Teilnehmer im Jahr 2008). Deshalb zielt Iridium mit seinem Angebot in erster Linie auf professionelle Nutzer wie vielreisende Geschäftsleute, Journalisten, Arbeiter auf Öl- oder Gasbohrinseln, Transportorganisationen oder Mitglieder des Katastrophenschutzes ab. Iridium wird überall dort Anwendungen finden, wo heute noch wenig Infrastruktur für Telekommunikation vorhanden ist und wo Mobilfunknetze fehlen oder überlastet sind. Im Jahr 2008 soll Iridium mit ca. 3 Millionen Teilnehmern seine maximale Kapazität erreicht haben.

Die Anzahl der Bodenstationen ist gering, die Frequenzzuteilung erfolgt sehr langsam, die Telefongeräte sind teuer (2000 - 3000 US\$) und wenig auf dem Markt zu finden, die Gesprächsgebühren im Vergleich zu terrestrischen Mobilfunknetzen sind hoch (ca. 3 US\$/Minute). Es stellen sich hier zwei Fragen: Kann Iridium die terrestrischen Kommunikationsnetze ersetzen, und in welchen Ländern wird es möglich sein mit Handygeräten per Satellit anzurufen ?

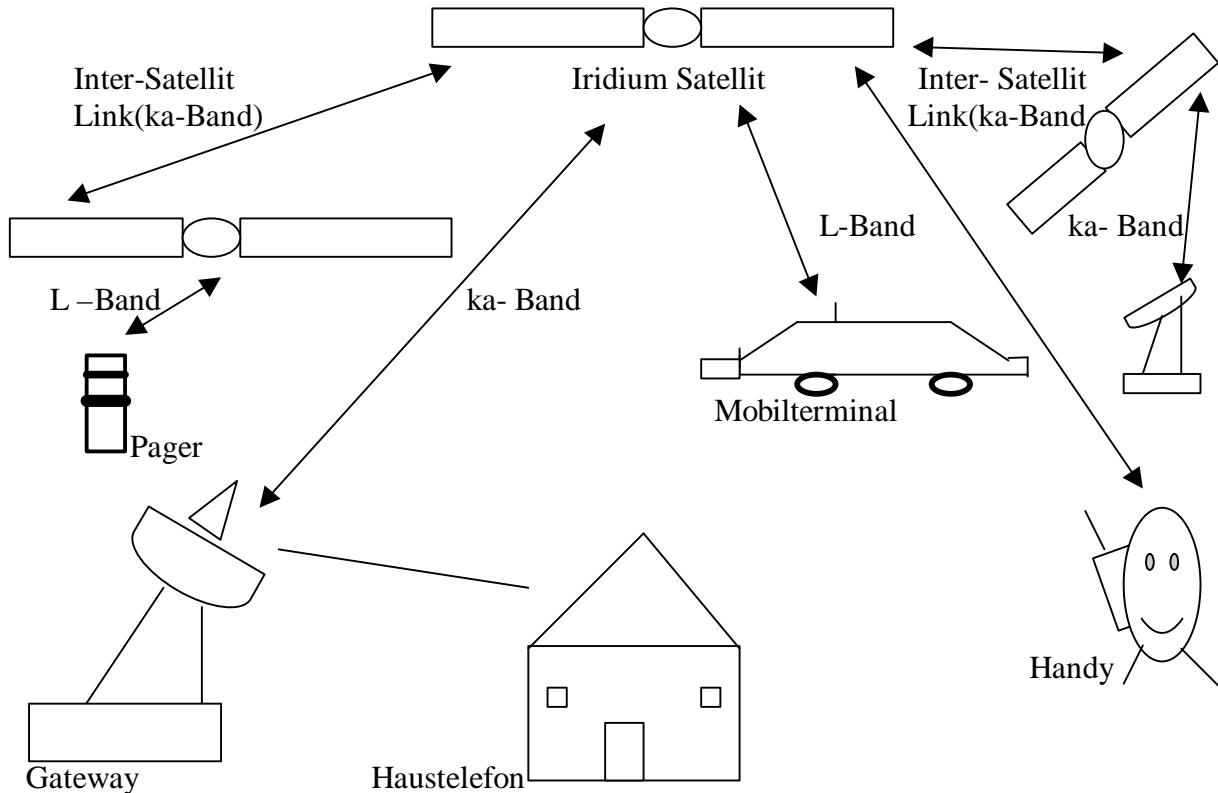


Abbildung 9: Netzwerkkonfiguration bei Iridium

## **Schluß**

Kommunikationssatelliten erlauben im Prinzip die gleiche Anwendung wie auch die terrestrischen (drahtlosen und drahtgebundenen ) Netze. Den Vorteilen der Satelliten wie die schnelle flächendeckende Versorgung, Flexibilität in den Übertragung, Kostenunabhängigkeit von der Entfernung, stehen Nachteile wie begrenzte Kanalkapazität durch die verfügbaren Frequenzen und Orbitpositionen, hohe Anfangsinvestition und verhältnismäßig große Signallaufzeiten gegenüber. Dies hat dazu geführt, daß sich in der Vergangenheit nur bestimmte Einsatzgebiete für Satelliten entwickelt haben.

Der Start des ersten Satellitentelefonnetzes für Handies (Iridium-Projekt) soll eine neue Dimension in der Entwicklung der Mobilkommunikation mit größeren Vorteilen gegenüber der terrestrischen Netze eröffnen.

### ***Literaturverzeichnis***

- [1] **Brinkmann**, Wolfgang: *Schaltungstechnik für den Satellitenempfang*. Verlag Technik, Berlin 1995.
- [2] **David**, Klaus/ Thorsten Benkner: *Digitale Mobilfunksysteme*. Teubner, Stuttgart, 1996.
- [3] **Lobensommer**, Hans: *Die Technik der modernen Mobilkommunikation*. Franzis-Verlag, München 1994.
- [4] **Ohmori**, Shingo/ Hiromitsu Wakana, Seiichiro Kawase: *Mobile Satellite Communications*.
- [5] **Pfaffenberger**, Ulrich/ Stefan Gneiting: *Iridium startet Satellitennetz*; in: *Funkschau*. Heft 20/98, S. 22-27.
- [6] **Quernheim**, Ulrich: *Satellitenkommunikation – Kanalmodellierung und Protokollbewertung*. Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1993.
- [7] **Scheele**, Peter: *Mobilfunk in Europa*. R.v. Decker's Verlag, G. Schenck, Heidelberg 1992.
- [8] **Walke**, Bernhard: *Mobilfunknetze und ihre Protokolle*. Teubner, Stuttgart, 1998.