

Satellitenempfang



(Quelle: EUTELSAT)

Teil 1

Vor gerade mal 80 Jahren wurden von Hermann Oberth die theoretischen Grundlagen zum Verlassen der Erde mittels Raketen gelegt. Keine 50 Jahre ist es her, als die Sowjetunion mit Sputnik den ersten künstlichen Himmelskörper in den Erdorbit schoss, und vor knapp 40 Jahren stellte Early Bird als erster geostationärer kommerzieller Nachrichtensatellit transatlantische Verbindungen her. Nach einem kleinen historischen Streifzug durch die faszinierenden Anfänge der Satellitentechnik werden die Fragen geklärt: Aus welchen Elementen besteht ein Satellitenübertragungssystem? Warum scheinen Satelliten am Himmel an einem festen Punkt zu „stehen“? Wie beschreibt man die Position eines Satelliten? Mit welchen Größen charakterisiert man den Empfang eines Satelliten?

Historischer Rückblick

Als 1865 Jules Verne in seinem Roman „De la Terre à la Lune“ (Titel der deutschen Übersetzung: „Von der Erde zum Mond“; die englische Übersetzung „From the Earth to the Moon“ kann man im Internet unter www.literature.org/authors/verne-jules lesen) Menschen in einem Hohlgeschoss von einer gigantischen Kanone auf den Mond schießen ließ, entsprach er mit diesem Stoff der Fortschrittsbegeisterung seiner Zeitgenossen (Abbildung 1). Was damals dennoch viele fantasiearme

Mitmenschen als utopische Fantasterei abtaten, wurde bald darauf zur wissenschaftlich abgesicherten Möglichkeit.

Für die angewandte Raumfahrt hat Hermann Oberth (1894–1989) mit seinen theoretischen Arbeiten die wohl wichtigsten Grundlagen geschaffen. Schon als Gymnasiast ließ er sich durch Jules Vernes Romane für die Raumfahrt begeistern und begann erste Raketenpläne auszuarbeiten. 1923 erschien sein erstes Buch „Die Rakete zu den Planetenräumen“, in welchem er die Raketentechnik als Voraussetzung zum Verlassen der Erde beschrieb und Wege zur bemannten Raumfahrt aufzeigte. Da-

Bild 1:
Jules Vernes
Mondreisende
erleben die
Schwerelosigkeit
(Quelle:
NASA)





Bild 2: Hermann Oberth (mit Rakete in der Hand) und seine Mitarbeiter in den 30er Jahren. Wernher von Braun (2. von rechts) war schon als Gymnasiast dabei. (Quelle: NASA)

bei beliebt es Oberth nicht bei der Theorie. Unterstützt vom Gymnasiasten Wernher von Braun, seinem späteren Meisterschüler, experimentierte er in den dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts am ersten Raketenmotor für Flüssigtreibstoffe, der in vervollkommener Form als Antriebsaggregat die amerikanische Raumfahrt ermöglicht (Abbildung 2).

Herman Potocnik (1892–1929, Abbildung 3) beschrieb unter dem Pseudonym Hermann Noordung in seinem einzigen, 1929 erschienenen Buch „Das Problem der Befahrung des Weltraums – Der Raketen-Motor“ die Möglichkeit, einen Satelliten so im Erdumlauf zu positionieren, dass man ständig mit ihm in Kontakt bleiben kann: „Jeder Körper, der die Erde in der Ebene des Äquators, das heißt 42.300 km vom Erdmittelpunkt und 35.900 km von der Erdoberfläche entfernt, in kreisförmigen Bahnen umläuft, verharrt freischwebend beständig über demselben Punkt. Er würde dann gleichsam die Spitze eines ungeheuer hohen Turmes bilden, welcher selbst jedoch gar nicht vorhanden, dessen Tragkraft aber ersetzt würde durch die Wirkung der Fliehkraft. Es entstünde ein Bauwerk, das fest zur Erde gehört, ja dauernd in unveränderlicher Stellung zu ihr verharrt und sich doch weit über der Luft-hülle im leeren Weltraum befindet.“ Damit hatte Potocnik exakt die Position der Satelliten beschrieben, die heute mit feststehenden Antennen empfangen werden. An die-



Bild 3: Herman Potocnik als Hauptmann der österreichisch-ungarischen Armee im 1. Weltkrieg (Quelle: NASA)

se Leistung erinnert eine österreichische Gedenkmarke zu seinem 100. Geburtstag.

Auch Potocniks Entwurf einer Welt-raumstation in Form eines riesigen rotierenden Rades, von ihm Wohnrad genannt, in dessen Radkranz die Menschen durch die Fliehkraft als Ersatz für die Gravitationskraft auf den Untergrund gedrückt würden, war technisch brillant (Abbildung 4).

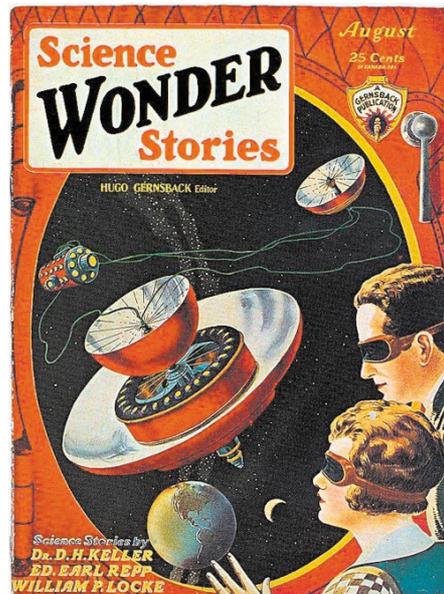


Bild 4: Potocniks Wohnrad in Science Wonder Stories von August 1929

Der am 16. Dezember 1917 geborene Erfinder und Science-Fiction-Autor Arthur C. Clarke lieferte mit seiner Kurzgeschichte „The Sentinel“ die Idee und Vorlage zu Stanley Kubricks Kultfilm „2001: A Space Odyssey“. Hier spielt sich die Handlung weitgehend in einem Raumschiff ab, das Potocniks Wohnrad genau gleicht. Aber Clarks fantasievolle Visionen waren stets technisch untermauert. Sein wissenschaftlicher Hintergrund ist eindrucksvoll in einer großen Zahl von Fachartikeln dokumentiert.

Ein Denkmal hat er sich mit seinem Artikel „Extra-Terrestrial Relays“ mit dem Untertitel „Can Rocket Stations Give

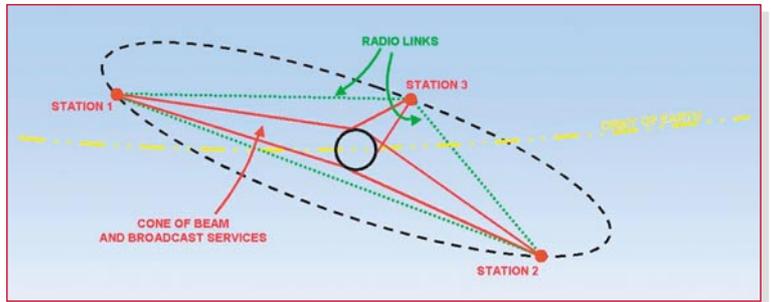


Bild 5: Clarks Vision: drei Satelliten in der erdsynchronen Bahn für die weltweite Kommunikation

World-wide Radio Coverage?“ gesetzt, der im Oktober 1945 in der Zeitschrift Wireless World erschien. Darin beschreibt er mit großer Präzision und Detailliertheit ein Kommunikationssystem aus drei Satelliten, die sich im 120°-Abstand synchron mit der Erde mitdrehen. Die Satelliten können untereinander über direkte Richtfunkverbindungen kommunizieren und sind so in der Lage, jeden Punkt der Erdoberfläche mit Funksignalen zu erreichen.

Abbildung 5 ist eine detailgetreue Nachzeichnung aus dem Wireless-World-Artikel, die zum besseren Verständnis mit farbigen Linien ausgeführt wurde. Man erkennt die Satelliten in der „geostationären“ Umlaufbahn (auch Clarke-Orbit, Clarke-Belt, Geostationary Earth GEO oder erdsynchroner Orbit genannt), ihre Funkverbindungen untereinander und die Abstrahlungen zur Erde. Die Entwicklung ausreichend starker Raketen für das Einschleusen von Satelliten in den geostationären Orbit war für Clarke damals nur eine Angelegenheit weniger Jahre. Die von ihm für diesen Zweck als notwendig erachteten mehrstufigen Raketen bringen heute tatsächlich jede Nutzlast in den Weltraum.

Mit dem Start von Sputnik (Abbildung 6), dem ersten Flugkörper, der außer-

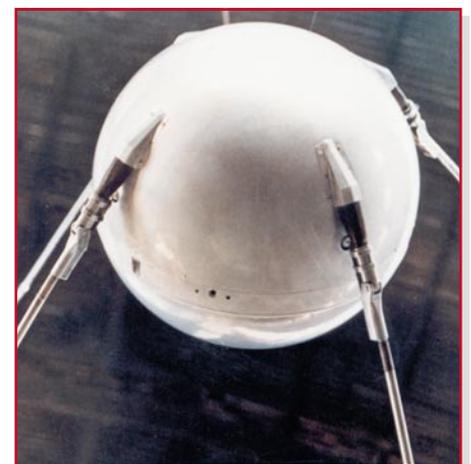


Bild 6: Sputnik, der erste künstliche Erdtrabant (Quelle: NASA)

halb der Erdatmosphäre unseren Planeten umrundete, läutete die Sowjetunion am 4. Oktober 1957 das Zeitalter der praktizierten Raumfahrt ein.

Von nun an ging es Schlag auf Schlag: 1965 stellte Early Bird als erster kommerzieller Nachrichtensatellit der INTELSAT-Reihe eine transatlantische Satellitenverbindung für 240 Telefongespräche oder ein Fernsehprogramm her, 1976 der erste INMARSAT-Satellit Marisat, im Dezember 1986 ASTRA 1A, 1987 der erste EUTELSAT-Satellit ECS sowie der erste deutsche Satellit TV-SAT, gefolgt vom deutschen Forschungssatelliten Kopernikus (1989).

Die Auswahl der genannten Visionäre und Wissenschaftler, die all dies ermöglichen, ist bei weitem nicht vollständig. Viel mehr Namen wären zu erwähnen, wollte man alle Wegbereiter der heutigen Satellitentechnik würdigen: von Johannes Kepler über Eugen Sänger und Konstantin Ziolkowski bis zu Robert Goddard. Von den Nachrichtentechnikern, deren Forschungen und Erkenntnisse die Nutzlast Satellit erst ermöglichten, ganz zu schweigen. Wir sollten uns aber bewusst sein, dass wir Zeitzeugen einer Entwicklung sind, deren Rasanz ungebremst ist, ja vielleicht noch zunimmt. Von Ziolkowski ist das Zitat überliefert: „Die Erde ist die Wiege der Menschheit, der Mensch kann aber nicht ewig in der Wiege bleiben.“ Viele staunenswerte Dinge werden in naher Zukunft noch geschehen, verlernen wir deshalb das Staunen nicht!

Das Satellitensystem

Ein Satellitensystem besteht aus einem oder mehreren Satelliten, die ihre Steuerinformationen und die Nutznachrichten über eine Bodenstation zugesandt bekommen, die Nutznachrichten frequenzmäßig umsetzen und in die Empfangsstation(en) im Zielgebiet (footprint) einstrahlen. Die Einrichtungen auf der Erdoberfläche nennt man Erd- oder Bodensegment, der Satellit stellt das Raumsegment dar. Der Teil des Übertragungsweges von der Bodenstation zum Satelliten heißt „Uplink“, derjenige vom Satelliten zur Empfangsantenne „Downlink“.

Beim Bodensegment unterscheidet man im Wesentlichen drei Typen von Funkstellen:

- Betriebsstation: sie dient dem Satellitenbetreiber zur Steuerung und Überwachung des Satelliten (telemetry and tracking center (TTC))
- Kontrollstation(en) zur Überwachung der Parameter der Satellitenfunkstrecken und der Qualität der übertragenen Dienste
- feste und mobile Sende- und Empfangsfunkstellen für die Übertragung der Nutzsignale

Bild 7: Von der Quelle bis zur Senke (Point-to-Multipoint)

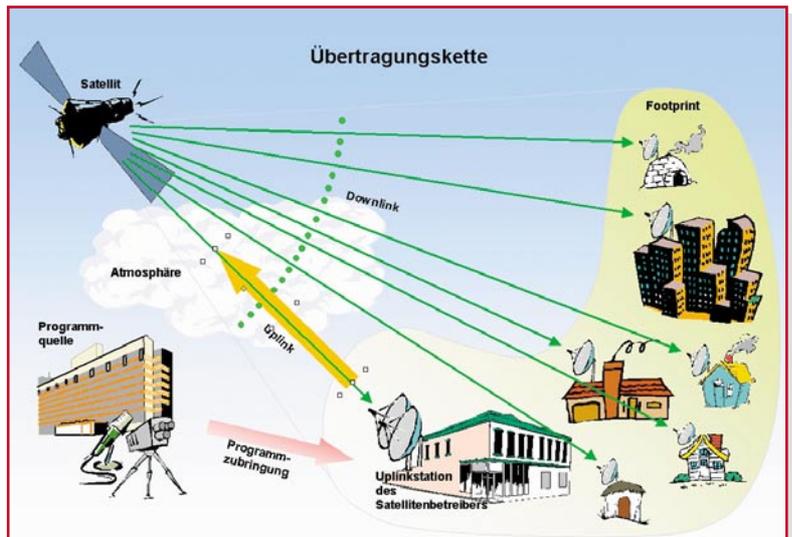
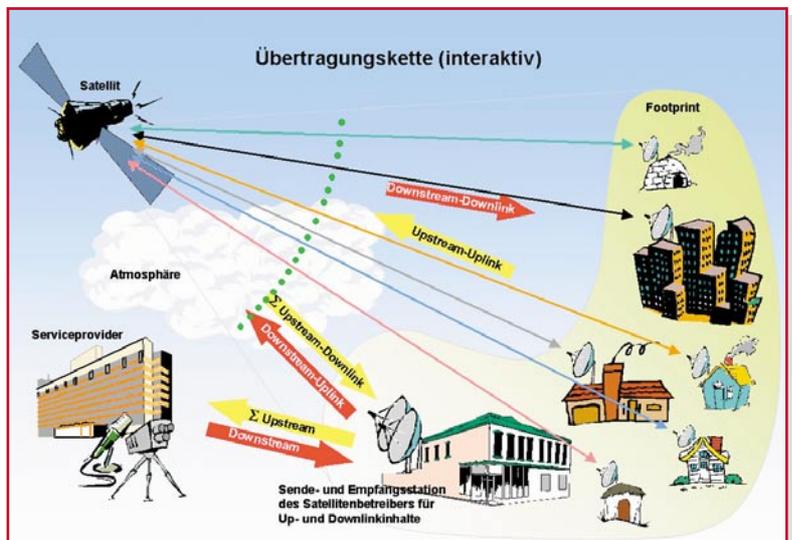


Bild 8: Von der Quelle bis zur Senke (Interaktiv)



Ein Satellitensystem kann für Radio- und Fernsehprogramme, Telefon- und Datensignale, meteorologische und navigatorische Daten, militärische Zwecke u. v. m. ausgestaltet sein. Je nach ihren Aufgaben unterscheidet man Fernmelde- und Rundfunksatelliten. Während Fernmeldesatelliten mit wenigen Ausnahmen nicht für den Empfang durch jedermann freigegeben sind, übertragen Rundfunksatelliten Hör- und Fernsehprogramm für den allgemeinen Empfang. In den letzten Jahren wurde die Technik entwickelt und erschwinglich, mit der ein Teilnehmer sowohl empfangen als auch senden kann. Über den Rückweg zum Satellitenbetreiber bzw. Diensteanbieter via Satellit sind interaktive Anwendungen möglich geworden, ohne zusätzliche erdgebundene Übertragungswege in Anspruch nehmen zu müssen.

Abbildung 7 zeigt die Übertragungskette eines nicht-interaktiven Point-to-Multipoint-Satellitensystem. Der Verteilungsweg in Teilnehmerrichtung wird Downstream genannt. Komplizierter wird es, wenn der Teilnehmer in umgekehrter Rich-

tung, im Upstream, Informationen versenden kann (Abbildung 8). In diesem Fall haben wir es mit einer Multipoint-to-Point-Übertragung zu tun.

Der GEO

Aufgrund des 1. Kepler'schen Gesetzes bewegen sich Planeten auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Wir können Planet durch Satellit und Sonne durch Erde ersetzen und haben die Aussage auf die Satellitenbahnen übertragen. Die Satellitenbahnen können beliebig gegen die Erdachse geneigt sein (Abbildung 9).

Stets wird der Satellit nur mit nachgeführten Antennen, wenn er sich gerade über dem Horizont im sichtbaren Teil des Himmels aufhält, zu empfangen sein. Es gibt aber eine einzige Satellitenumlaufbahn, wo der Satellit dauerhaft mit Festantennen zu empfangen ist, den GEO.

Satelliten werden mittels Trägerraketen in eine Erdumlaufbahn außerhalb der Erdatmosphäre gebracht. Beim Start der Trägerrakete kann man die Umfangsgeschwin-

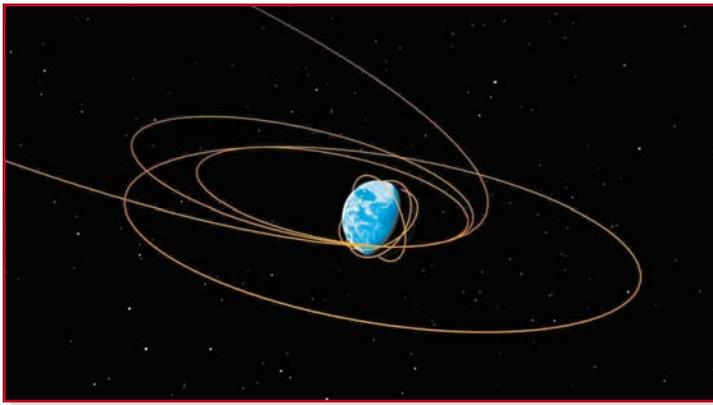


Bild 9: Mögliche Satellitenbahnen (Quelle: EADS)

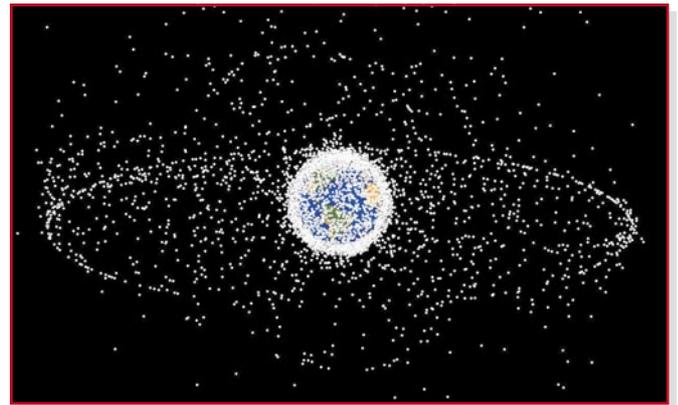


Bild 11: Von Menschen in den Erdumlauf gebrachte Trabanten (Quelle: NASA)

digkeit der sich von Ost nach West drehenden Erde ausnutzen. Sie ist am Äquator maximal (Erdumfang/24 h=40.000 km/24 h = 1667 km/h) und an den Polen null. Aus wirtschaftlichen Gründen sind deshalb Startorte in Äquaturnähe besonders interessant, z. B. startet die europäische Raumfahrtindustrie ihre Ariane-Raketen für geostationäre Satelliten in Kourou (5° 14' N, 52° 45' W) in Französisch-Guyana an der Nordostküste von Südamerika.

Ein Satellit wird nicht direkt in seine geostationäre Umlaufbahn geschossen, sondern zunächst in den sog. Transferorbit (Abbildung 10). Das ist eine stark elliptische Bahnkurve, in deren erdnächstem Punkt (Perigäum) die Rakete den Satelliten absetzt. Am erdfernsten Punkt der Bahnkurve (Apogäum) werden die Apogäumsmotoren gezündet, wodurch der Satellit in den Driftorbit übergeht. Hier erfolgt mit kleinen Korrekturschüben die Überführung in den GEO.

Der Satellit führt nur einen begrenzten Treibstoffvorrat für die Apogäumsmotoren und die Lagekorrekturdüsen mit. Deshalb sind alle Manöver möglichst effizient durchzuführen, damit ausreichend Treibstoff für die Positionsstabilisierung während der gesamten Satellitenlebensdauer verbleibt. Falsche Manöver würden die

Nutzungsdauer des Satelliten senken, was einem hohen Geldverlust gleichkommt.

Der GEO ist dann erreicht, wenn die Umlaufzeit T des Satelliten 24 h (ganz exakt ist ein Sternentag zu Grunde zu legen, der 3 Minuten und 56 Sekunden kürzer ist: $T = 86.164$ sec), die Flugbahn des Satelliten exakt kreisförmig ist und in der Äquatortalebene liegt (keine Inklination).

Wegen des Gleichgewichts zwischen Zentrifugalkraft im GEO und der dort wirkenden Anziehungskraft durch die Erde lässt sich der Radius des GEO leicht bestimmen:

$$m\omega^2 r = g \frac{mM}{r^2} \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

(Satellitenmasse m kürzt sich heraus!)
nach r auflösen:

$$r = \sqrt[3]{\frac{MgT^2}{4\pi^2}}$$

Mit $M = 5,976 \cdot 10^{24}$ kg (Erdmasse),
 $g = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$ (Gravitationskonstante)
 $T = 86.164$ s (Sternentag)
ergibt sich der Radius r des geostationären Erdorbits zu $r = 42.168$ km

Das entspricht dem 6,61fachen des Erdradius (6.378 km). Der Abstand des Satelliten im GEO senkrecht zum Äquator be-

trägt $42.168 \text{ km} - 6.378 \text{ km} = 35.790 \text{ km}$. Wie man an der Formel sieht, spielt die Masse des Satelliten keine Rolle. Andernfalls würden unterschiedlich schwere Satelliten unterschiedliche erdsynchrone Bahnen erfordern.

Satelliten im GEO

Mittlerweile sind hunderte Satelliten im GEO und tausende in anderen, meist tiefer gelegenen Umlaufbahnen. Dabei wird die Erde auch von einer Wolke zahlloser Schrottkörper (debris) auf unterschiedlichsten Umlaufbahnen umgeben. Auf Abbildung 11 ist gut die höhere Satellitendichte im GEO zu erkennen, ebenso die dichte Hülle der vielen, die Erde auf niedrigeren Bahnen in wenigen Stunden umlaufenden Satelliten (Low Earth Orbiter, LEO), z. B. für Navigationszwecke (GPS), Wetterbeobachtung, Telefonie etc.

Im von Deutschland aus „sichtbaren“ Teil des GEO sind zur Zeit über 150 Satelliten im Umlauf. Je näher ein Satellit von der Erdoberfläche aus betrachtet über dem Horizont steht, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, ihn problemlos empfangen zu können. Schließlich ist die Horizontlinie oft durch natürliche und vom Menschen verursachte Hindernisse (Berge, Bäume, Gebäude) versperrt.

Satellitenposition und Antennenausrichtung

Weil sich geostationäre Satelliten auf einer festen Kreisbahn in der Äquatortalebene synchron mit der Erde drehen, ist die Beschreibung ihrer Position durch die Angabe eines einzigen Winkelwertes eindeutig möglich. Meistens wird der Punkt im GEO, der über dem Schnittpunkt des Greenwich-Meridians mit dem Äquator liegt, als Bezugspunkt mit 0° gewählt. Von hier aus werden Satellitenpositionen in westlicher Richtung mit dem Zusatz W(est) und in östlicher Richtung mit dem Zusatz O(st) beschrieben (Abbildung 12), z. B. PanAm-

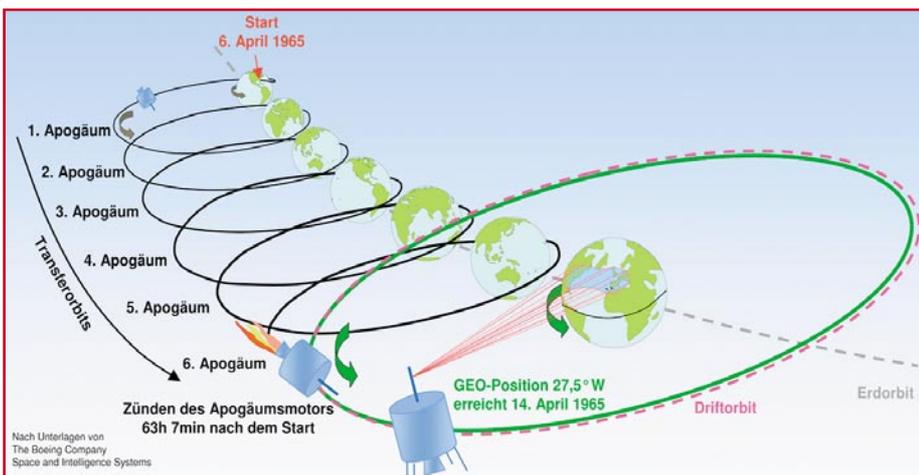


Bild 10: Der Weg in den geostationären Orbit

Ort	ÖL	NB	62 °O		42 °O		28,2 °O		19,2 °O		16 °O		13 °O		10 °O		5 °O		1 °W		5 °W		8 °W		30 °W		45 °W	
			Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.	Az.	EI.
Jena	11,6	50,9	122,7	15,3	142,9	25,1	159,0	29,6	170,2	31,3	174,3	31,6	178,2	31,7	182,1	31,7	188,5	31,4	196,1	30,5	201,0	29,6	204,6	28,8	228,8	20,0	242,9	11,8
Kaiserslautern	7,8	49,4	118,7	13,9	138,2	24,7	153,9	30,1	165,1	32,3	169,3	32,8	173,2	33,1	177,1	33,3	183,7	33,3	191,5	32,7	196,7	32,0	200,4	31,3	225,6	22,9	240,0	14,8
Karlsruhe	8,4	49,0	119,1	14,5	138,6	25,3	154,5	30,6	165,8	32,8	170,0	33,3	173,9	33,6	177,9	33,8	184,5	33,7	192,4	33,1	197,5	32,3	201,3	31,6	226,4	22,9	240,7	14,6
Kassel	9,5	51,3	120,9	13,9	140,8	23,9	156,6	28,7	167,6	30,6	171,7	31,0	175,5	31,2	179,4	31,3	185,8	31,1	193,4	30,4	198,3	29,7	202,0	29,0	226,6	20,7	240,9	12,8
Kornstanz	9,2	47,7	119,3	15,6	138,9	26,7	155,0	32,2	166,5	34,4	170,8	34,8	174,8	35,1	178,9	35,2	185,6	35,1	193,6	34,3	198,9	33,5	202,7	32,7	227,8	23,5	241,9	14,8
Leipzig	12,3	51,3	123,5	15,5	143,8	25,0	159,9	29,4	171,2	30,9	175,3	31,2	179,1	31,3	182,9	31,2	189,3	30,9	196,9	29,9	201,8	29,1	205,4	28,2	229,4	19,3	243,4	11,2
Leverkusen	7,0	51,0	118,6	12,7	138,0	23,0	153,5	28,3	164,5	30,5	168,5	31,0	172,3	31,3	176,1	31,5	182,6	31,6	190,3	31,1	195,3	30,5	199,0	29,9	224,1	22,1	238,7	14,4
Lößnitz	7,6	47,6	117,8	14,7	137,1	26,0	153,0	31,8	164,5	34,2	168,7	34,8	172,7	35,1	176,7	35,3	183,5	35,3	191,6	34,7	196,9	34,0	200,7	33,3	226,2	24,4	240,6	15,8
Lübeck	10,7	53,9	122,9	13,1	143,0	22,2	158,7	26,4	169,5	28,0	173,5	28,3	177,2	28,4	180,9	28,5	187,0	28,2	194,4	27,5	199,2	26,8	202,7	26,1	226,8	18,3	241,1	10,8
Magedeburg	11,7	52,1	123,2	14,7	143,5	24,1	159,4	28,4	170,5	30,0	174,6	30,3	178,4	30,4	182,2	30,4	188,5	30,1	195,9	29,2	200,8	28,4	204,4	27,6	228,5	19,1	242,6	11,2
Mainz	8,3	50,0	119,4	13,9	139,0	24,4	154,7	29,6	165,9	31,7	170,0	32,2	173,9	32,5	177,8	32,7	184,3	32,6	192,1	32,0	197,1	31,3	200,9	30,6	225,9	22,2	240,3	14,2
Mannheim	8,5	49,5	119,4	14,3	139,0	24,9	154,8	30,2	166,0	32,3	170,2	32,8	174,1	33,1	178,0	33,2	184,6	33,1	192,4	32,5	197,5	31,8	201,3	31,1	226,3	22,5	240,6	14,3
Mönchengladbach	6,5	51,2	118,2	12,3	137,5	22,6	153,0	27,9	163,9	30,2	167,9	30,7	171,7	31,1	175,5	31,3	181,9	31,4	189,6	31,0	194,6	30,4	198,4	29,8	223,5	22,2	238,2	14,5
München	11,6	48,1	121,6	16,9	141,8	27,5	158,2	32,5	169,8	34,3	174,1	34,6	178,1	34,7	182,1	34,7	188,8	34,4	196,7	33,4	201,8	32,5	205,6	31,6	230,0	21,9	243,9	13,1
Münster	7,6	51,9	119,4	12,6	139,0	22,6	154,5	27,6	165,4	29,6	169,4	30,1	173,2	30,4	177,0	30,6	183,3	30,6	190,9	30,1	195,9	29,5	199,5	28,8	224,4	21,2	239,0	13,6
Nürnberg	11,1	49,5	121,7	15,8	141,8	26,1	158,0	30,9	169,4	32,7	173,6	33,0	177,5	33,2	181,4	33,2	188,0	32,9	195,7	32,1	200,8	31,2	204,5	30,4	228,9	21,9	242,9	12,8
Offenbach/Main	8,8	50,1	119,9	14,2	139,5	24,6	155,3	29,7	166,5	31,7	170,3	32,2	174,5	32,4	178,4	32,6	184,9	32,5	192,7	31,8	197,8	31,1	201,5	30,4	226,5	22,2	238,2	13,8
Oldenburg	8,2	53,1	120,3	12,3	140,1	21,9	155,5	26,6	166,3	28,5	170,3	28,9	174,0	29,2	177,7	29,3	184,0	29,2	191,4	28,7	196,3	28,1	200,0	27,5	224,5	20,0	239,1	12,6
Osnabrück	8,0	52,3	119,9	12,6	139,6	22,4	155,1	27,3	166,0	29,3	169,9	29,7	173,7	30,0	177,5	30,2	183,8	30,1	191,3	29,6	196,3	29,0	199,9	28,4	224,6	20,7	239,2	13,1
Paderborn	8,8	51,7	120,4	13,3	140,2	23,2	155,8	28,1	166,8	30,0	170,9	30,5	174,7	30,7	178,5	30,8	184,8	30,7	192,4	30,1	197,4	29,4	201,0	28,8	225,7	20,8	240,1	13,0
Passau	13,5	48,6	123,6	17,7	144,1	27,8	160,7	32,4	172,4	33,9	176,7	34,2	180,7	34,2	184,7	34,1	191,3	33,6	199,0	32,5	204,0	31,4	207,7	30,5	231,7	20,5	245,3	11,7
Pforzheim	8,7	48,9	119,3	14,7	138,9	25,5	154,8	30,8	166,2	33,0	170,4	33,4	174,3	33,7	178,3	33,9	184,9	33,8	192,8	33,1	197,9	32,4	201,7	31,6	226,8	22,9	241,0	14,5
Recklinghausen	7,2	51,6	118,9	12,5	138,4	22,6	153,9	27,7	164,8	29,9	168,8	30,4	172,6	30,7	176,4	30,9	182,8	30,9	190,4	30,4	195,4	29,8	199,1	29,2	224,1	21,6	238,7	13,9
Regensburg	12,1	49,0	122,4	16,7	142,7	26,9	159,1	31,7	170,6	33,4	174,8	33,7	178,8	33,8	182,8	33,7	189,4	33,4	197,1	32,4	202,2	31,4	205,9	30,5	230,1	21,0	244,0	12,4
Rostock	12,1	54,1	124,3	13,7	144,6	22,5	160,4	26,5	171,3	27,9	175,2	28,1	178,9	28,2	182,6	28,2	188,7	27,9	196,0	27,1	200,8	26,3	204,3	25,6	228,1	17,5	242,3	10,0
Saarbrücken	7,0	49,2	117,9	13,6	137,2	24,4	152,9	30,0	164,1	32,4	168,2	32,9	172,1	33,3	176,0	33,5	182,6	33,5	190,5	33,0	195,7	32,4	199,5	31,7	224,9	23,5	239,4	15,3
Satzgitter	10,4	52,0	122,0	14,0	142,0	23,7	157,8	28,2	168,9	29,9	172,9	30,3	176,7	30,5	180,5	30,5	186,8	30,3	194,4	29,6	199,3	28,8	202,9	28,1	227,2	19,8	241,5	12,0
Schwelm	11,4	53,6	123,5	13,7	143,7	22,7	159,4	26,9	170,3	28,4	174,3	28,6	178,0	28,8	181,7	28,8	187,9	28,5	195,3	27,7	200,1	27,0	203,6	26,2	227,6	18,2	241,9	10,6
Seebad Ahbeck	14,2	53,9	126,2	14,9	146,9	23,4	162,9	27,1	173,8	28,3	177,8	28,4	181,5	28,4	185,2	28,3	191,3	27,9	198,6	26,9	203,3	26,0	206,8	25,2	230,3	16,7	244,3	9,0
Siegen	8,0	50,9	119,4	13,3	139,0	23,6	154,6	28,7	165,7	30,7	169,7	31,2	173,6	31,5	177,4	31,7	183,9	31,6	191,5	31,1	196,6	30,4	200,3	29,8	225,2	21,7	239,7	13,9
Solingen	7,1	51,2	118,7	12,6	138,2	22,9	153,7	28,1	164,6	30,3	168,6	30,8	172,4	31,1	176,3	31,3	182,7	31,3	190,3	30,9	195,4	30,3	199,1	29,7	224,1	21,9	238,8	14,2
Straubing	12,6	48,9	122,9	17,0	143,2	27,2	159,7	31,9	171,3	33,5	175,5	33,8	179,5	33,9	183,4	33,8	189,0	33,8	196,8	32,4	202,8	31,4	206,5	30,5	230,7	20,8	244,4	12,1
Stuttgart	9,2	48,8	119,7	15,1	137,4	25,8	155,4	31,1	166,8	33,2	171,0	33,6	175,0	33,9	178,9	34,0	185,6	33,8	193,4	33,1	198,6	32,3	202,7	31,6	227,3	22,7	241,5	14,2
Weil am Rhein	7,6	47,6	117,9	14,7	139,2	26,0	153,0	31,7	164,5	34,1	168,7	34,7	172,7	35,1	176,8	35,3	183,5	35,3	191,6	34,7	196,8	33,9	200,7	33,2	226,2	24,4	240,6	15,8
Wolfsburg	10,8	52,4	122,5	14,0	142,6	23,5	158,4	27,9	169,4	29,6	173,4	29,9	177,2	30,0	181,0	30,1	187,3	29,8	194,8	29,1	199,7	28,3	203,3	27,6	227,5	19,3	241,7	11,5
Würzburg	9,9	49,8	120,7	15,0	140,6	25,3	156,6	30,3	167,9	32,2	172,0	32,6	175,9	32,8	179,9	32,9	186,4	32,7	194,2	32,0	199,2	31,2	202,9	30,4	227,6	21,6	241,8	13,3
Wuppertal	7,1	51,3	118,7	12,6	138,2	22,8	153,7	28,0	164,6	30,2	168,7	30,7	172,5	31,0	176,3	31,2	182,7	31,2	190,3	30,8	195,4	30,2	199,1	29,6	224,1	21,8	238,7	14,2
Zwickau	12,6	50,7	123,6	16,0	143,9	25,7	160,2	30,1	171,5	31,8	175,6	31,8	179,5	31,9	183,4	31,9	189,8	31,5	197,4	30,5	202,3	29,6	205,9	28,7	229,9	19,6	243,8	11,3

Sat-Position	ÖL	NB	62 °O		42 °O		28,2 °O		19,2 °O		16 °O		13 °O		10 °O		5 °O		1 °W		5 °W		8 °W		30 °W		45 °W	
			Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.	Az.	Ei.
Aachen	6,1	50,8	117,7	12,3	137,0	22,8	152,3	28,2	163,3	30,5	167,3	31,1	171,1	31,4	175,0	31,7	181,4	31,8	189,1	31,4	194,2	30,9	199,0	30,3	223,3	22,7	238,0	15,0
Augsburg	10,9	48,4	121,1	16,3	141,1	26,9	157,4	32,0	169,0	33,9	173,2	34,2	177,2	34,4	181,2	34,4	187,9	34,1	196,7	33,2	200,9	32,3	204,6	31,5	229,2	22,1	243,1	13,4
Berchtesgaden	13,0	47,6	122,7	18,0	143,1	28,5	159,8	33,3	171,6	35,0	175,9	35,2	180,0	35,3	184,1	35,2	190,8	34,8	198,7	33,6	203,7	32,6	207,5	31,6	231,6	21,5	245,2	12,4
Bergisch-Gladbach	7,1	51,0	118,6	12,7	138,1	23,1	153,6	28,3	164,6	30,5	168,6	31,0	172,4	31,3	176,3	31,5	182,7	31,6	190,4	31,1	195,4	30,5	199,1	29,9	224,2	22,1	238,8	14,3
Berlin	13,1	52,4	124,7	15,3	145,1	24,4	161,2	28,4	172,3	29,8	176,3	30,0	180,1	30,1	183,9	30,0	190,2	29,6	197,6	28,7	202,4	27,8	206,0	26,9	229,7	18,2	243,7	10,2
Bielefeld	8,5	52,0	120,2	13,0	140,0	22,9	155,6	27,7	166,5	29,7	170,5	30,1	174,3	30,4	178,1	30,5	184,4	30,4	192,0	29,8	196,9	29,2	200,6	28,5	225,3	20,7	239,8	13,0
Bochum	7,2	51,5	118,9	12,5	138,4	22,7	153,9	27,8	164,8	30,0	168,8	30,5	172,6	30,8	176,4	31,0	182,8	31,0	190,4	30,6	195,4	29,9	199,1	29,3	224,1	21,6	238,7	14,0
Bonn	7,1	50,7	118,5	12,9	138,0	23,3	153,5	28,6	164,5	30,8	168,6	31,3	172,4	31,7	176,3	31,9	182,7	31,9	190,4	31,4	195,5	30,8	199,2	30,2	224,3	22,3	238,9	14,5
Boltpop	6,9	51,5	118,6	12,4	138,1	22,6	153,5	27,8	164,4	29,9	168,4	30,4	172,2	30,8	176,0	31,0	182,4	31,0	190,1	30,6	195,1	30,0	198,8	29,4	223,8	21,8	238,5	14,2
Braunschweig	10,5	52,3	122,2	13,9	142,2	23,5	158,0	28,0	169,1	29,6	173,1	30,0	176,8	30,1	180,6	30,2	186,9	30,0	194,4	29,2	199,3	28,5	202,9	27,8	227,2	19,5	241,5	11,7
Bremen	8,8	53,1	120,9	12,6	140,7	22,1	156,2	26,7	167,1	28,6	171,0	29,0	174,8	29,2	178,5	29,3	184,7	29,2	192,2	28,6	197,1	28,0	200,7	27,4	225,2	19,7	239,7	12,3
Bremenhaven	8,6	53,5	120,8	12,3	140,6	21,7	156,1	26,3	166,9	28,1	170,8	28,5	174,5	28,8	178,3	28,9	184,5	28,8	191,9	28,3	196,7	27,6	200,3	27,0	224,8	19,5	239,3	12,2
Chemnitz	12,9	50,8	123,9	16,1	144,3	25,7	160,6	30,0	171,9	31,5	176,0	31,7	179,9	31,8	183,7	31,7	190,2	31,3	197,7	30,3	202,6	29,4	206,2	28,6	230,2	19,4	244,1	11,1
Collbus	14,3	51,7	125,5	16,3	146,2	25,4	162,5	29,4	173,8	30,7	177,8	30,8	181,7	30,8	185,5	30,7	191,8	30,2	198,2	29,1	204,0	28,1	207,6	27,3	231,2	18,1	245,0	9,9
Darmstadt	8,7	49,9	119,7	14,2	139,3	22,9	154,2	27,9	165,2	30,0	169,2	30,5	173,0	30,8	176,8	31,0	183,2	31,0	190,8	30,5	195,8	29,9	199,5	29,3	224,4	21,5	239,0	13,8
Dortmund	7,5	51,5	119,2	12,7	138,7	22,9	154,2	27,9	165,2	30,0	169,2	30,5	173,0	30,8	176,8	31,0	183,2	31,0	190,8	30,5	195,8	29,9	199,5	29,3	224,4	21,5	239,0	13,8
Dresden	13,8	51,1	124,8	16,4	145,4	25,8	161,7	29,9	173,1	31,3	177,2	31,5	181,0	31,5	184,9	31,4	191,3	30,9	198,8	29,8	203,6	28,9	207,2	28,0	230,9	18,7	244,8	10,4
Düsseldorf	6,8	51,2	118,4	12,5	137,8	22,8	153,3	28,0	164,2	30,2	168,3	30,7	172,1	31,1	175,9	31,3	182,3	31,4	190,0	30,9	195,0	30,3	198,7	29,7	223,8	22,1	238,5	14,4
Duisburg	6,8	51,4	118,5	12,4	137,9	22,6	153,4	27,8	164,3	30,0	168,3	30,5	172,1	30,9	175,9	31,1	182,3	31,1	189,9	30,7	195,0	30,1	198,7	29,5	223,7	21,9	238,4	14,3
Eisenach	10,2	51,0	121,4	14,5	141,4	24,4	157,3	29,2	168,5	31,0	172,6	31,3	176,4	31,5	180,3	31,6	186,7	31,4	194,3	30,6	199,3	29,9	202,9	29,1	227,4	20,6	241,6	12,6
Erfurt	11,0	51,0	122,2	14,9	142,3	24,7	158,3	29,4	169,5	31,1	173,6	31,4	177,4	31,6	181,3	31,6	187,7	31,3	195,3	30,5	200,3	29,7	203,9	28,9	228,2	20,2	242,3	12,1
Essen	7,0	51,5	122,7	12,4	138,2	22,6	153,6	27,8	164,6	29,9	168,6	30,4	172,4	30,8	176,2	31,0	182,6	31,0	190,2	30,6	195,2	30,0	198,9	29,4	223,9	21,7	238,6	14,1
Flensburg	9,4	54,8	122,0	12,0	142,0	20,9	157,4	25,2	168,1	28,9	171,9	27,2	175,6	27,4	179,3	27,5	185,4	27,4	192,7	26,8	197,4	26,1	201,0	25,5	225,1	18,2	239,7	11,1
Frankfurt/Main	8,7	50,1	119,8	14,1	139,4	24,5	155,2	29,7	166,4	31,7	170,5	32,2	174,4	32,4	178,3	32,6	184,8	32,5	192,6	31,8	197,6	31,1	201,4	30,4	226,2	22,0	240,6	13,9
Frankfurt/Oder	14,5	52,4	126,0	16,0	146,7	24,9	162,9	28,7	174,1	29,9	178,1	30,1	181,9	30,1	185,7	29,9	191,9	29,4	199,3	28,4	204,1	27,4	207,6	26,5	231,1	17,5	245,0	9,5
Freiburg/Breisgau	7,9	48,0	118,3	14,7	137,7	25,8	153,5	31,5	165,0	33,8	169,2	34,3	173,2	34,6	177,2	34,8	183,9	34,8	191,9	34,2	197,1	33,5	201,0	32,7	226,3	23,9	240,7	15,4
Garmisch-Partenkirchen	11,1	47,5	120,9	16,9	140,9	27,7	157,4	32,9	169,1	34,8	173,4	35,2	177,4	35,4	181,5	35,4	188,2	35,1	196,2	34,2	201,4	33,2	205,2	32,3	229,8	22,6	243,6	13,7
Geisenkirchen	7,1	51,5	118,8	12,5	138,3	22,7	153,8	27,8	164,7	30,0	168,7	30,5	172,5	30,8	176,3	31,0	182,7	31,0	190,3	30,6	195,3	30,0	199,0	29,4	224,0	21,7	238,6	14,0
Gera	12,1	50,9	123,2	15,6	143,5	25,3	159,6	29,8	170,9	31,3	175,0	31,6	178,8	31,7	182,7	31,7	189,1	31,3	196,7	30,4	201,6	29,5	205,2	28,7	229,3	19,7	243,3	11,5
Göppingen	9,7	48,7	120,1	15,4	139,9	26,1	156,0	31,3	167,4	33,4	171,6	33,8	175,6	34,0	179,6	34,1	186,2	33,9	194,1	33,2	199,2	32,3	203,0	31,6	227,9	22,5	242,0	14,0
Göttingen	9,9	51,5	121,4	14,0	141,3	23,9	157,1	28,6	168,2	30,4	172,2	30,8	176,0	31,0	179,9	31,1	186,3	30,9	193,8	30,2	198,8	29,4	202,4	28,7	226,9	20,4	241,2	12,5
Hagen/Westfalen	7,5	51,4	119,1	12,8	138,7	22,9	154,2	28,0	165,2	30,1	169,2	30,6	173,0	30,9	176,8	31,1	183,2	31,1	190,8	30,6	195,8	30,0	199,5	29,4	224,5	21,6	239,0	13,9
Halle	12,0	51,5	123,3	15,2	143,6	24,7	159,6	29,1	170,8	30,7	174,9	30,9	178,7	31,0	182,6	31,0	188,9	30,7	196,4	29,8	201,3	28,9	204,9	28,1	229,0	19,4	243,1	11,3
Hamburg	9,7	53,6	121,9	12,8	141,9	22,0	157,4	26,5	168,3	28,2	172,2	28,5	175,9	28,7	179,6	28,8	185,8	28,6	193,2	28,0	198,1	27,3	201,6	26,7	225,9	18,9	240,3	11,5
Hamm	7,8	51,7	119,5	12,8	139,1	22,8	154,6	27,8	165,6	29,9	169,6	30,3	173,4	30,6	177,2	30,8	183,6	30,8	191,2	30,3	196,1	29,6	199,8	29,0	224,7	21,2	239,2	13,6
Hannover	9,7	52,4	121,5	13,4	141,4	23,0	157,1	27,7	168,1	29,4	172,1	29,8	175,8	30,0	179,6	30,1	185,9	29,9	193,4	29,3	198,3	28,5	201,9	27,9	226,3	19,8	240,7	12,1
Heidelberg	8,7	49,4	119,5	14,5	139,1	25,1	155,0	30,3	166,3	32,4	170,4	32,9	174,3	33,2	178,3	33,3	184,9	33,2	192,7	32,6	197,8	31,8	201,6	31,1	226,5	22,5	240,8	14,2
Heilbronn	9,2	49,1	119,8	14,9	139,5	25,5	155,5	30,8	166,9	32,8	171,0	33,3	175,0	33,5	178,9	33,7	185,5	33,5	193,4	32,8	198,5	32,0	202,3	31,3	227,2	22,5	241,4	14,1
Henne	7,2	51,5	118,9	12,5	138,4	22,7	153,9	27,8	164,8	30,0	168,8	30,5	172,6	30,8	176,4	31,0	182,8	31,0	190,4	30,6	195,4	29,9	199,1	29,3	224,1	21,6	238,7	14,0
Hilleshelm	9,9	52,2	121,6	13,7	141,6	23,3	157,3	27,9	168,3	29,7	172,3	30,0	176,1	30,2	179,9	30,3	186,2	30,1	193,7	29,4	198,6	28,7	202,2	28,0	226,6	19,9	241,0	12,1

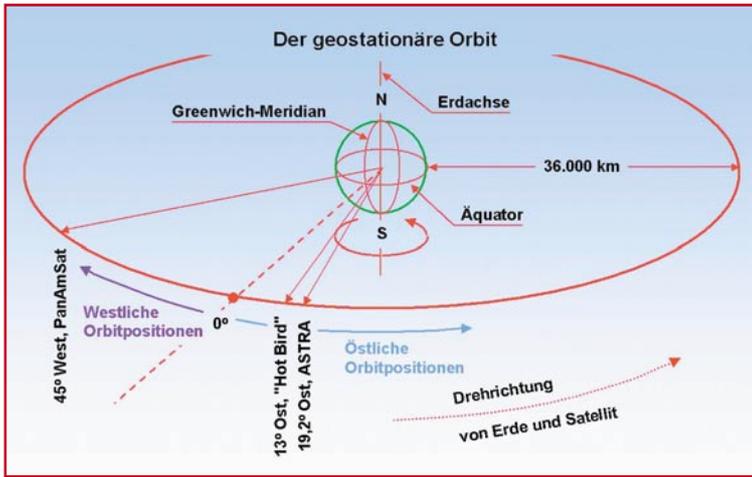


Bild 12:
Positions-
beschreibung
von geo-
stationären
Satelliten

Sendeleistung und Ausleuchtung

Ein Satellit im Orbit verfügt über nur geringe elektrische Leistung. Sie wird von Solarzellen erzeugt, die zu flügelähnlichen Paneelen angeordnet und der Sonne zugewandt sind. Bei den EUTELSAT-II-Satelliten beträgt die Spannweite dieser „Flügel“ 22,4 m (Abbildung 15). Am Ende der Lebensdauer des Satelliten erzeugen sie noch 3000 W elektrische Leistung.

Die Hochfrequenzleistung der Wanderfeldröhren der Sendestufen eines Transponders liegt bei etwa 50 W. Damit trotz dieser geringen Leistung nach knapp 40.000 km auf der Erde noch ein verwertbares Signal ankommt, muss die Sendeleistung scharf in das Zielgebiet (Ausleuchtezone, footprint = Fußabdruck) gebündelt werden. Abbildung 16 zeigt aus dem EUTELSAT II Handbook Linien gleicher Empfangsstärke. Sie sind in dBW, der Maßeinheit für die so genannte EIRP, beschriftet.

EIRP

Die „äquivalente, isotrop abgestrahlte

Sat 45°W, EUTELSAT „Hot Bird“ 13°O und ASTRA 19,2°O.

Nun stellt sich die Frage: „Wie finde ich von meinem irdischen Standpunkt aus einen Satelliten, dessen Orbitalposition mir bekannt ist?“ Dazu muss ich zunächst meine Koordinaten auf der Erde kennen (in Deutschland östliche Länge und nördliche Breite) – der Rest ist sphärische Geometrie. Um sich das Auswerten länglicher Formeln zu ersparen, kann man die Antennenausrichtwerte Azimut und Elevation für die wichtigsten Orte Deutschlands den Tabellen auf den beiden vorherigen Seiten entnehmen.

Der Azimutwinkel (Seitenwinkel) beschreibt dabei die horizontale Auslenkung der „Blickrichtung“ der Antenne aus der Nordrichtung im Uhrzeigersinn. 90°, 180° und 270° bedeuten also Ost, Süd und West. Elevationswinkel (Erhebungswinkel) werden von der Waagrechten nach oben gemessen. 0° Elevation entspricht der Antennenausrichtung auf den Horizont, 90° senkrecht nach oben. Abbildung 13 verdeutlicht das Gesagte.

Danach muss man die Antenne unter leichter Erhebung (Elevation 30°) in südöstliche Richtung (Azimut 150°) drehen,

damit sie zum Satelliten zeigt. Generell kann man festhalten: Je nördlicher die Antenne, desto geringer die Elevation, und umgekehrt.

Der Orbitalbogen sieht also an jedem Ort Deutschlands etwas anders aus. Die Verhältnisse für drei Satelliten an drei deutschen Orten Seebad Ahlbeck (extrem nordöstlich), Frankfurt (zentral) und Weil am Rhein (extrem südwestlich) zeigt Abbildung 14.

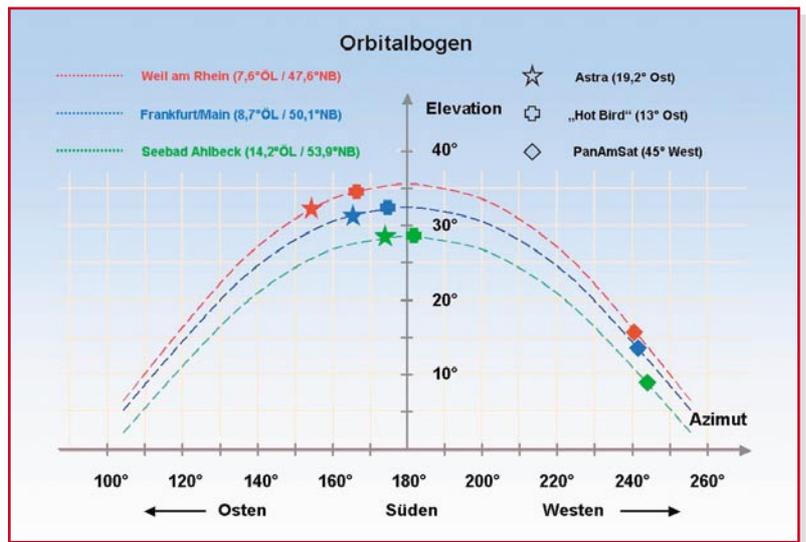


Bild 14:
Satelliten
im
Orbital-
bogen

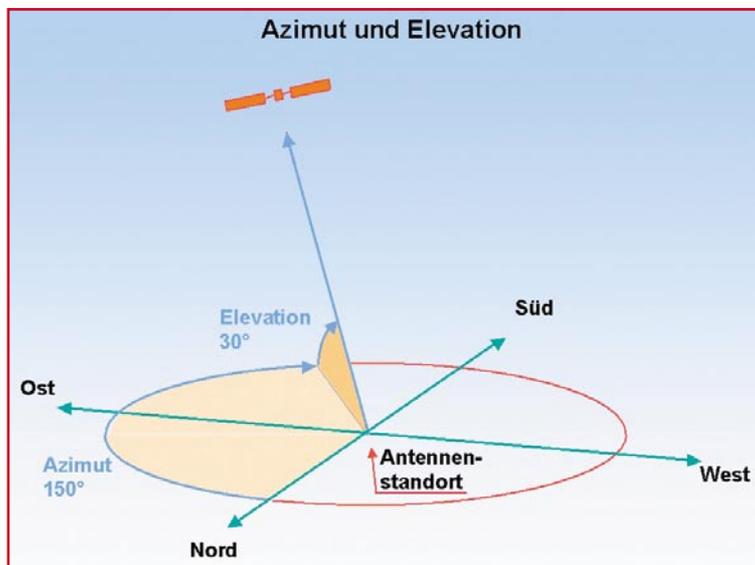


Bild 13:
Azimut- und
Elevations-
winkel der
Antenne

Leistung“ (Equivalent Isotropically Radiated Power) ist eine fiktive Größe. Sie gibt im logarithmischen Maßstab an, welche Leistung eine Antenne am Ort des Satelliten rundum gleichförmig in alle Richtungen (isotrop) abstrahlen müsste, um die gleichen Empfangsbedingungen im Zielgebiet auf der Erde zu erzeugen wie die reale Sendeanenne des Satelliten mit ihrer Richtwirkung. Im Kern der Ausleuchtezone liegt die EIRP bei modernen Rundfunksatelliten bei 50 bis 55 dBW. Die EIRP ist wie folgt definiert:

$$\frac{\text{EIRP}}{\text{dBW}} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ W}} \quad (P: \text{ äquivalente Sendeleistung in Watt})$$

bzw.

$$\frac{P}{\text{W}} = 10^{\frac{\text{EIRP}_{\text{dBW}}}{10}}$$



Bild 15: Satellit mit „Sonnenpaddeln“ und Sende- und Empfangsantennen (Quelle: EUTELSAT)

Im Kerngebiet strahlt der Satellit mit dem Footprint aus Abbildung 16 mit 51 dBW ein. Dem entspricht eine Leistung von $P = 10^{5.1} \text{ W} = 125.893 \text{ W}$. In Wirklichkeit sendet der Satellit aber mit nur 50 W, entsprechend einer EIRP von $10 \log 50 \text{ dBW} = 17 \text{ dBW}$. Die Differenz $51 \text{ dBW} - 17 \text{ dBW} = 34 \text{ dBW}$ ist der Bündelungsgewinn der Sendeantenne.

PFD

Eine andere Art, die Empfangsverhältnisse in der Ausleuchtezone zu charakterisieren, bietet die Leistungsflussdichte PFD (Power Flux Density) in dBW/m². Sie gibt an, welche Leistung am Empfangsort senkrecht in eine Fläche von 1 m² einfällt. Dazu denkt man sich eine Kugel, in deren Mittelpunkt sich der Satellit mit einem isotropen Strahler und auf deren Oberfläche sich die Empfangsantenne befindet. Durch einen Quadratmeter der Kugeloberfläche fällt nun eine Leistung entsprechend der EIRP, dividiert durch die gesamte Kugeloberfläche $4 \pi D^2$ in m², wobei D der Abstand zwischen Satellit und Empfangsantenne in m ist. Es gilt:

$$\frac{\text{PFD}}{\text{dBW}} = 10 \log \frac{P}{4\pi D^2} = 10 \log \frac{P}{W} - 10 \log \frac{4\pi D^2}{\text{m}^2}$$

Der Term $-10 \log(4 \pi D^2/\text{m}^2)$ wird auch Ausbreitungsdämpfung (Ls: Spreading Loss) genannt. Er beschreibt die Leistungsverteilung im Raum. D ist in Deutschland im Mittel 38.500.000 m, woraus sich ergibt: $10 \log(4 \pi D^2/\text{m}^2) = 162,7$. In guter Näherung kann man deshalb sagen:

$$\frac{\text{PFD}}{\text{dBW}} = \frac{\text{EIRP}}{\text{dBW}} - 163$$

Der obigen EIRP-Angabe von 51 dBW entspricht also die PFD-Angabe von $(51 - 163) \text{ dBW/m}^2 = -112 \text{ dBW/m}^2$.

Wer es ganz genau wissen will, kann sich die Entfernung D zwischen seiner Empfangsantenne und dem Satelliten (slant distance) genau berechnen:

$$D = \sqrt{R_E^2 + R_S^2 - 2R_E R_S \cos \varphi_{\text{Ant}} \cos(l_{\text{Ant}} - l_{\text{Sat}})}$$

- Dabei ist:
- $R_E = 6.378.000 \text{ m}$ Erdradius
- $R_S = 42.168.000 \text{ m}$ Radius der geostationären Bahn
- φ_{Ant} = Breitengrad des Antennenstandorts
- l_{Ant} = Längengrad des Antennenstandorts
- l_{Sat} = Orbitalposition des Satelliten

Mit den rechnerisch ermittelten Werten von D wurde die Ausbreitungsdämpfung Ls in der folgenden Tabelle für einige Werte für die Längendifferenz $\Delta l = l_{\text{Ant}} - l_{\text{Sat}}$ zwischen Empfangsantenne und Satellit und der geographischen Breite der Empfangsantenne φ_{Ant} exakt bestimmt.

Die Tabelle rechtfertigt die näherungsweise Annahme einer mittleren Ausbreitungsdämpfung von -163 dBW/m^2 in Deutschland. **ELV**

Ls/dBW/m ²	$\Delta l = 0^\circ$	$\Delta l = 20^\circ$	$\Delta l = 40^\circ$	$\Delta l = 60^\circ$
$\varphi_{\text{Ant}} = 30^\circ$	-162,3	-162,4	-162,6	-162,8
$\varphi_{\text{Ant}} = 40^\circ$	-162,5	-162,6	-162,8	-163,0
$\varphi_{\text{Ant}} = 50^\circ$	-162,7	-162,7	-162,9	-163,2
$\varphi_{\text{Ant}} = 60^\circ$	-162,9	-162,9	-163,1	-163,3
$\varphi_{\text{Ant}} = 70^\circ$	-163,1	-163,1	-163,2	-163,3

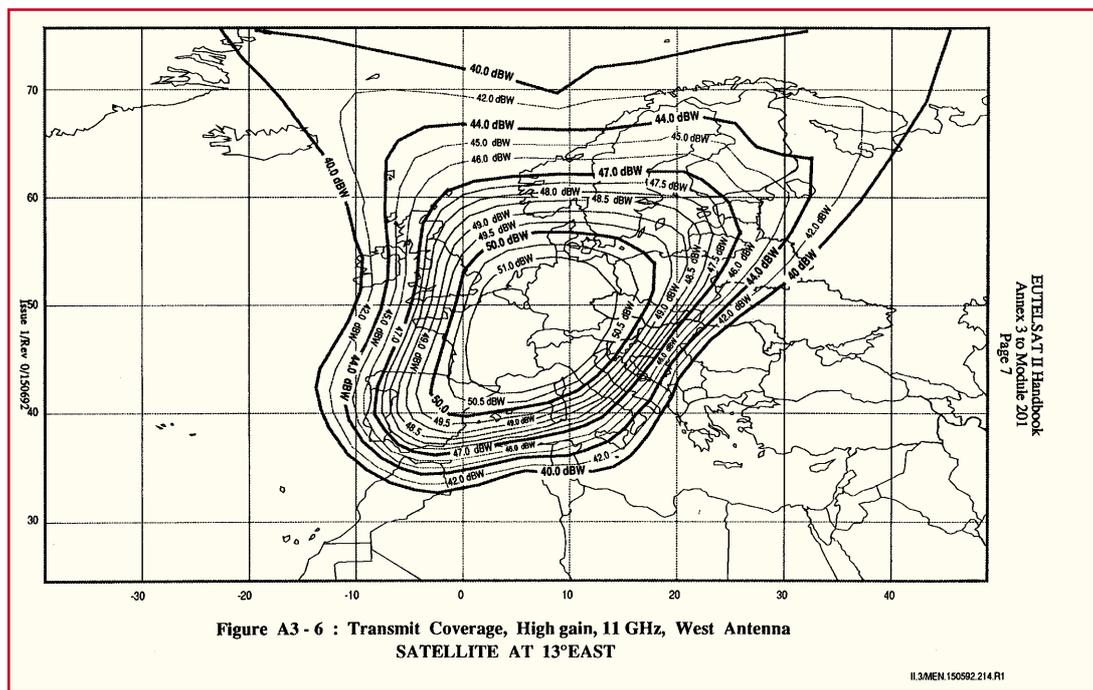


Bild 16: Der „Footprint“ (Ausleuchtezone) eines Satelliten

Figure A3 - 6 : Transmit Coverage, High gain, 11 GHz, West Antenna SATELLITE AT 13°EAST

IL3MEN 150592.214.R1