

# 6 Das Deep Space Network der NASA

Raumsonden fliegen weit ins Sonnensystem hinein und erforschen Planeten wie Mars, Venus, Jupiter und andere. Auch mit ihnen muss kommuniziert werden: Man muss sie auch aus der großen Entfernung steuern und ihre gesammelten Daten empfangen können. Die interstellaren Distanzen erfordern speziell darauf ausgerichtete Sende- und Empfangsanlagen. Das bereits erwähnte ESTRACK-Netzwerk leistet dies mit seinen 35-m-Antennen (Deep Space Antennas). Das bedeutendste Deep Space Network unterhält jedoch die NASA.

## 6.1 Kommunikation über Millionen und Milliarden Kilometer

Wir wissen, dass die Überbrückung der Strecke von 38.000 km beim TV-Empfang z.B. über einen Astra-Satelliten keine technische Herausforderung darstellt und auch mit kleinen Camping-Antennen

gelingt. Wir haben auch die Mathematik für die Nutzung des Mondes als Reflektor für elektromagnetische Wellen kennen gelernt. Dieser ist zehnmal weiter entfernt als ein geostationärer Satellit und bietet für die Signale nur eine kleine Reflexionsfläche mit geringem Wirkungsgrad – und trotzdem pflegen heute Amateure mit überschaubarem Aufwand die Erde-Mond-Erde-Kommunikation. Auch die Sprachkommunikation mit den Astronauten von Apollo 11 bereitete 1969 keine wesentlichen Probleme. (Etwas anders sah es schon mit der Bildübertragung vom Mond aus; hierfür wurde eine leichte Spezialkamera entwickelt, die sehr hohe Umgebungstemperaturen aushielt, nur 7 W Leistung benötigte, mit nur 1/8 der Normfrequenz nur 320 Zeilen abtastete und zehn Bilder pro Sekunde aufbaute.) Die drei Bodenstationen in Frankreich, England und USA waren bei der Mondmission alle 2,5 h für 20 min nutzbar.

Aber wie problematisch ist die Kommunikation mit Raumsonden, welche die Planeten unseres

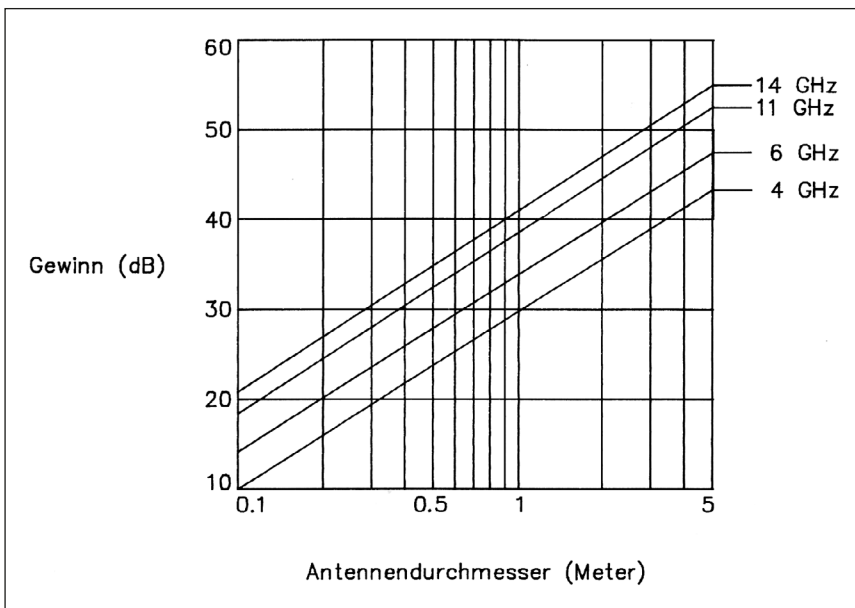


Bild 39: Gewinn bei Antennendurchmessern bis 5 m und Frequenzen im ein- und zweistelligen Gigahertz-Bereich (Wirkungsgrad 55%, P. Lepper: SATTECH)

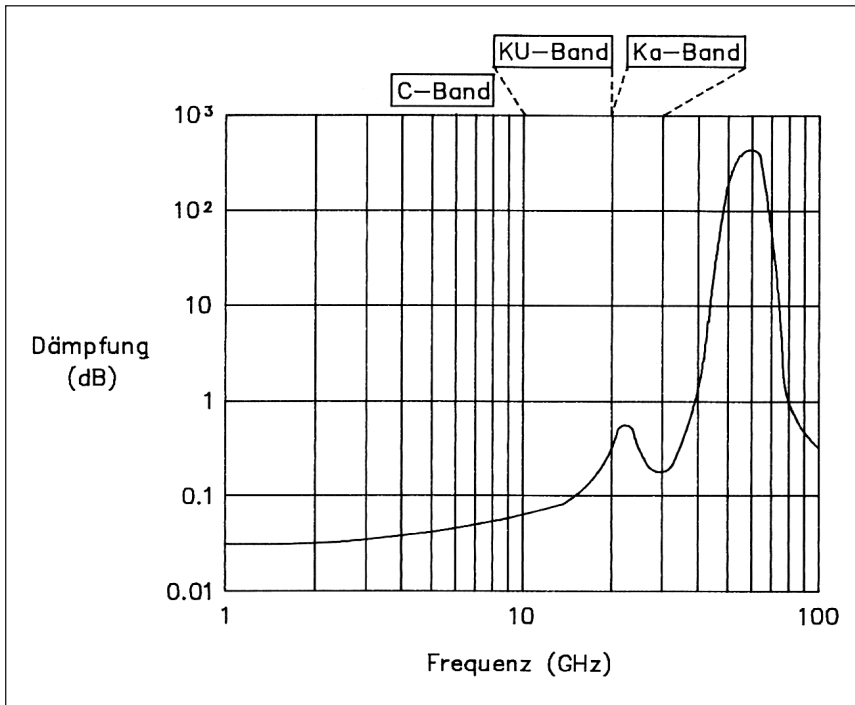


Bild 40: Die typische atmosphärische Dämpfung über der Frequenz (Quelle: P. Lepper: SATTECH)

Sonnensystems als Ziel haben? Diese Entfernungen sind in Millionen oder sogar Milliarden Kilometern zu messen. Bleiben wir nur einmal beim Mars, der mit etwa 56 bis 401 Mio. km zu den erdnäheren Planeten gehört. Setzen wir die höchste Entfernung von 401 Mio. km zur Entfernung des Mondes (0,384 Mio. km) ins Verhältnis, erhalten wir 1044. Gegenüber dem Mond müssen bei einer Marsmission also Entfernungen überbrückt werden, die etwa 100 bis 1000 mal größer sind! Die entsprechende Streckendämpfung ist enorm. Daher werden alle Register gezogen, um die Kommunikation sicherzustellen. Es ist interessant, sich diese prinzipiellen Möglichkeiten einmal vor Augen zu führen:

- **Sendeleistung**

Die Ausgangsleistung des Senders schlägt sich direkt in der Reichweite nieder. Am Boden kann man in diesem Punkt viel ausrichten, da zumindest die Energieversorgung kein Problem ist. Anders bei den Raumflugkörpern selbst, deren Versorgungsenergie begrenzt ist.

- **Antennendurchmesser (Gewinn)**

Die Richtschärfe einer Parabolantenne wächst mit deren Durchmesser (Bild 39). Außerdem

wird mit zunehmendem Gewinn weniger Rauschen aus dem All aufgenommen. Daher gilt für die Antennen am Boden im Prinzip: So groß als möglich! Enge Grenzen gibt es bei den Antennendimensionen hingegen bei den Raumsonden wegen dem begrenzten Platz in der Trägerrakete und aus Gewichtsgründen.

- **Arraying/Diversity**

Durch die Zusammenschaltung mehrerer Antennen (Arraying) kann man gewissermaßen den Antennendurchmesser insgesamt erhöhen und die Richtschärfe verbessern. Das wird am Boden gemacht. Bei den Raumsonden kann eine Automatik dafür sorgen, dass je nach Lage des Raumflugkörpers, eine von mehreren Antennen benutzt wird (Diversity).

- **Antennenstandort**

An jedem Antennenstandort auf der Erde sollte die Belastung durch unerwünschte Signale minimal sein. Daher verbietet sich etwa die Nähe zu Großstädten. Außerdem sollte ein Atmosphäre typisch sein, die möglichst wenig dämpft. Die Luftverschmutzung sollte also minimal sein. Weiter sollte der Standort so gewählt sein, dass es von möglichst wenigen Standorten aus möglich ist,

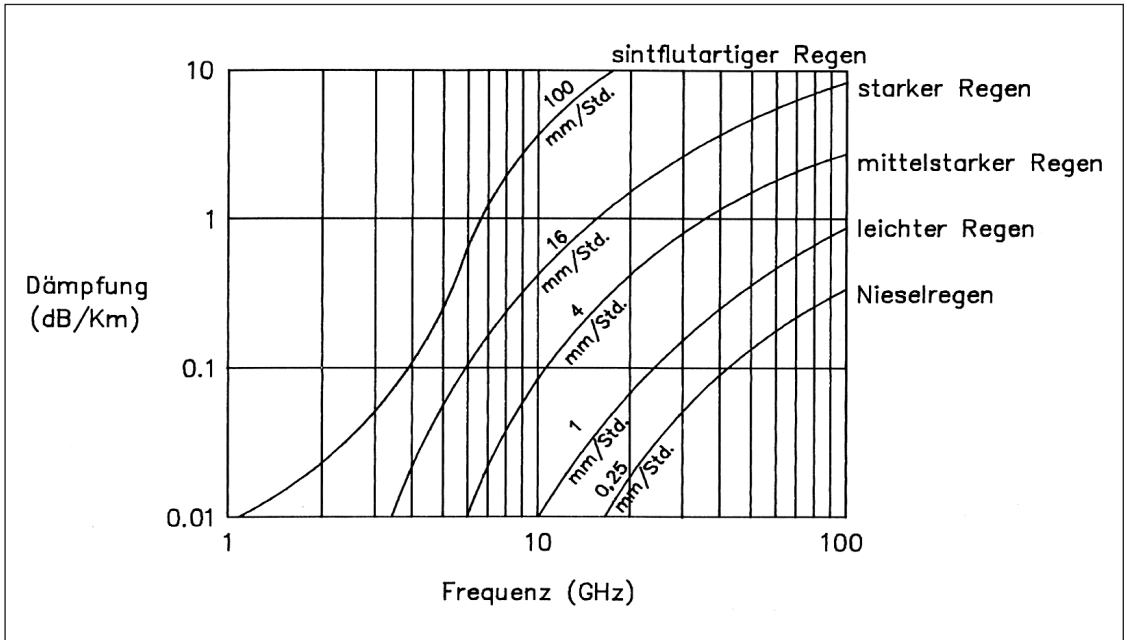


Bild 41: Regendämpfung über der Frequenz (Quelle: P. Lepper: SATTECH)

trotz der Erdrotation ständigen oder langandauernden Kontakt zu sichern.

- Frequenzwahl

Funksignale von und zu Raumsonden müssen die Atmosphäre der Erde durchqueren. Hier werden sie frequenzabhängig durch verschiedene Faktoren gedämpft. Dies ist in Bild 40 dargestellt. Man erkennt, dass Signale mit Frequenzen zwischen etwa 1 und 10 GHz am wenigsten gedämpft werden. Neben dieser terrestrischen Dämpfung erfolgt auch noch eine Dämpfung im Kosmos. Auch hier ergibt sich ein „Fenster“ im Frequenzbereich von etwa 1 bis 10 GHz. Bild 41 informiert zur Dämpfung bei Regen. Weiter für die Frequenzwahl entscheidend sind die technischen Möglichkeiten, für bestimmte Frequenzen leistungsfähige Sender zu bauen und die technischen Möglichkeiten, das Eigenrauschen eines Empfängers auf bestimmten Frequenzen gering zu halten. Nicht zu vergessen: Der Gewinn einer Parabolantenne wächst mit der Signalfrequenz (+3 dB pro Frequenzverdopplung).

- Eigenrauschen des Empfängers

Hier hat man am Boden die Möglichkeit, durch Kühlung der elektronischen Schaltung das Rauschmaß des Empfängers zu senken. Im All ist das aus

energetischen Gründen kaum möglich. Die Halbleitertechnik ist heute auch in punkto Rauscharmut weit vorangeschritten und erlaubt Empfangsverstärker für den Gigahertzbereich mit einem Rauschmaß um 0,3 dB bei Zimmertemperatur. Das ist weniger als der Wert, mit dem bei Frequenzen über 1 GHz auch der „kalte“ (bewölkte) Himmel rauscht. Ein weiteres Absenken des Empfänger-Rauschmaßes brächte daher keinen Vorteil mehr.

- Bandbreite des Übertragungskanals

Das im Hochfrequenzbereich anzutreffende Rauschen ist frequenzunabhängig („weißes Rauschen“). Wenn man daher die Bandbreite des Übertragungskanals z.B. halbiert, so halbiert sich auch die Rauschleistung im Kanal. Übertragungsverfahren für die Kommunikation über große kosmische Entfernungen sind daher Schmalbandverfahren.

- Übertragungsverfahren

Neben der Schmalbandigkeit sollte das Übertragungsverfahren einen möglichst geringen Signal/Rausch-Abstand zulassen. Dies ist mit digitalen Verfahren möglich. Bild 42 beweist, dass ein Signal, welches schwächer ist als das Rauschen, nicht als verloren angesehen werden muss, nur weil man es mit dem Ohr nicht mehr wahrnehmen kann.

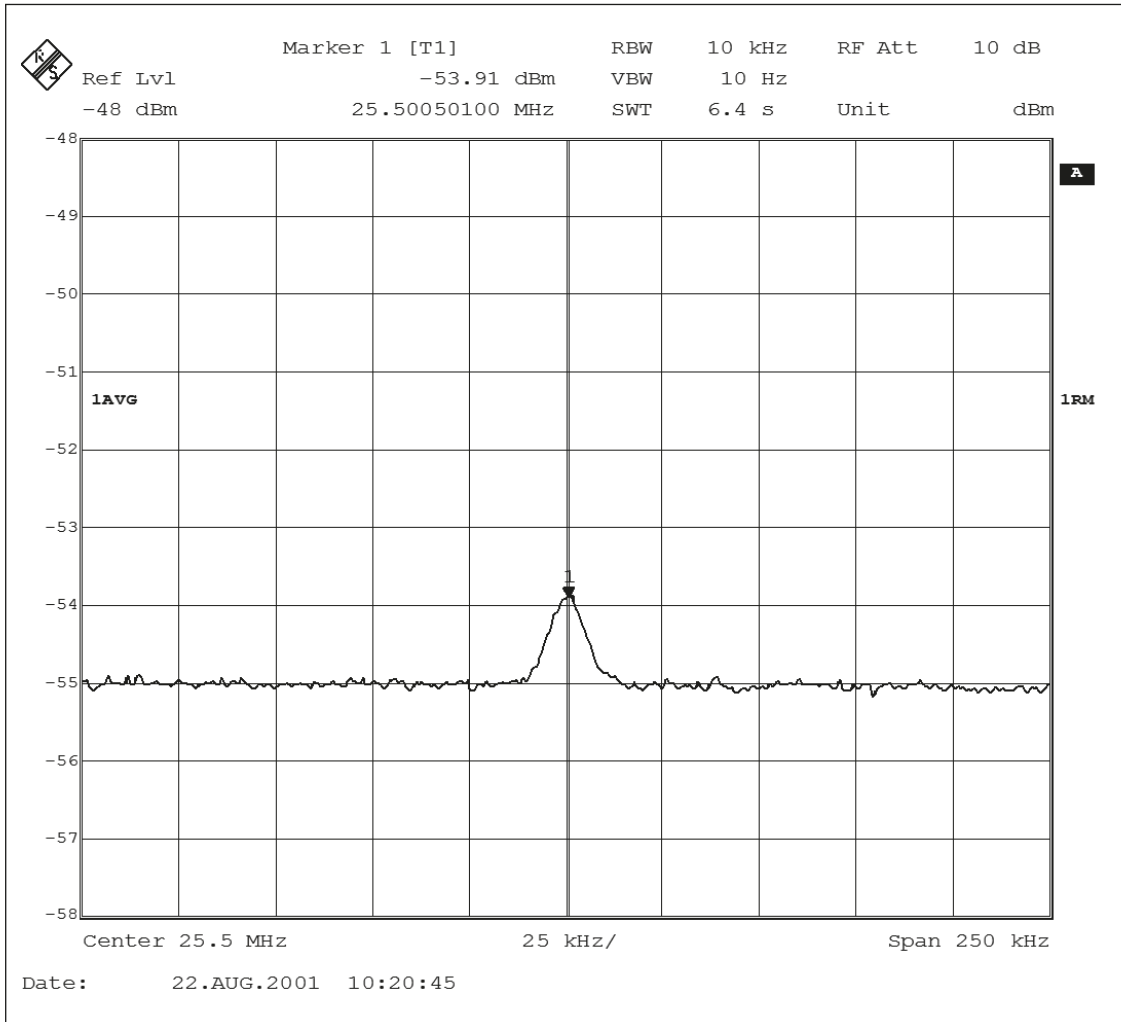


Bild 42: Darstellung eines Dauertonssignals 3 dB unter dem Rauschen. Das Signal ist nicht hörbar, aber klar erkennbar und somit elektronisch auswertbar (Quelle: R. Rudersdorfer)

Man spricht von Weak-Signal-Verfahren. WSJT wurde bereits erwähnt, andere Verfahren heißen beispielsweise PSK31, WSPR oder FFTDSP.

• Datenrate

Wir wissen, dass man das Rauschen in einem Kanal reduzieren kann, wenn man die Bandbreite einengt. Durch Bandbreitenreduktion lässt sich also „fehlender“ Antennengewinn ausgleichen. Mit sinkender Bandbreite muss aber auch eine sinkende maximal mögliche Datenübertragungsrate hingenommen werden. Hier der Zusammenhang zwischen Datenübertragungsrate, Bandbreite und Signal/Rausch-Verhältnis:

$$C = B \times \log_2(1 + S/N)$$

C ... Datenübertragungsrate in Bit/s

B ... Bandbreite in Hz

S ... absolute Signalleistung

N ... absolute Rauschleistung

Dazu ein Beispiel mit 3 kHz Bandbreite und einem S/R von 20 dB:

$$C = 3 \text{ kHz} \times \log_2(1+20 \text{ dB}) = 3 \text{ kHz} \log_2(1+10^{20/10}) = 20 \text{ kBit/s}$$

Den Logarithmus zur Basis 2 beherrschen ein-

fache Taschenrechner nicht, es gibt aber im Internet solche Rechner (Log Base 2 Calculators). Damit lässt sich leicht errechnen, dass  $\log_2(1+100)$  rund 6,66 ist.

Der obige Zusammenhang gebietet es, die nominelle Datenrate etwa für die Übertragung wissenschaftlicher Informationen mit sich weiter von der Erde entfernender Sonde und somit infolge zunehmender Streckendämpfung abnehmendem Signal/Rausch-Verhältnis sukzessive zu verringern.

Raumsonden verwenden auch einfache Antennen mit sehr geringem Gewinn (z.B. sogenannte Rundstrahlantennen). Diese sind an der Sonde so angeordnet, dass mindestens eine von ihnen mehr oder weniger gut aus jeder Richtung angesprochen werden kann. Gerät ein Raumflugkörper in dem Sinne außer Kontrolle, dass seine dem Empfang der Steuerkommandos von der Erde dienende Antenne aufgrund ihres geringen Öffnungswinkels Signale von der Erde nicht mehr empfangen können, schlägt die Stunde der einfachen Antennen. Beim Ausbleiben von erwarteten Steuersignalen über die regulär dafür vorgesehene Antenne schaltet die Sonde automatisch auf die einfachen Antennen um und reduziert die Empfängerbandbreite soweit wie nur möglich. Dann ist unter Nutzung der besten Antennen auf der Erde mit sehr geringer Datenrate von beispielsweise 10 Bit/s die Steuerung der Sonde und somit die Optimierung ihrer Lage immer noch möglich.

Die Datenrate

- nimmt mit der Sendeleistung linear zu,
- nimmt quadratisch mit der Entfernung ab,
- nimmt quadratisch mit der Frequenz zu und
- nimmt quadratisch mit dem Durchmesser der Sende- oder Empfangsantenne zu.

#### • Repetierung/Integration

Ein Trick, das Rauschen zu senken, besteht darin, ein Signal mehrmals auszusenden und zu empfangen und dabei aufzuzeichnen. Wenn nun die einzelnen Aufzeichnungen überlagert werden, so addieren sich die Teilsignale voll zu einem Gesamtsignal. Anders beim Rauschen. Da dieses zufällig ist, löscht es sich teilweise aus! Durch das mehrmalige Aussenden (Repetieren, Integration, hier als Aufaddieren zu verstehen) mit entspre-

## Frequenzbänder

Als Teilbereiche des Spektrums der zur Kommunikation verwendeten elektromagnetischen Wellen wurden Frequenzbänder festgelegt. International sind allerdings verschiedene Bezeichnungen und Bandgrenzen in Gebrauch, oft willkürlich nach dem aktuellen Stand in der Hochfrequenzphysik festgelegt. Ähnlich ist es bei den Bezeichnungen. So war L möglicherweise die Abkürzung für Longband, S für Shortband und C für Compromise between L and S. K soll für Kay, Ka für Kay-ay Band stehen. In einer neuen Standardisierung durch die IEEE werden die Frequenzbänder systematisch gemäß den unterschiedlichen Eigenschaften der Frequenzen mit logarithmisch ansteigender Bandgröße eingeteilt.

chender Auswertung erzielt man schließlich einen höheren Signal/Rausch-Abstand als bei jeder einzelnen Aussendung.

## 6.2 Beispiel: Das Venus-Experiment der Amateure

Was vor über 50 Jahren Profis mithilfe riesiger Antennen erstmalig gelang, haben Anfang 2009 deutsche Funkamateure mit deutlich weniger spektakulärer Technik wiederholt: den Empfang eigener Echos, die von der Venus (45 bis 260 Mio. km Entfernung) reflektiert wurden. Es wurde ein Zeitpunkt gewählt, an dem die Venus der Erde am nächsten kam. Das Signal benötigte für die rund 90 Mio. km eine Zeit von 5 min. Dies ist nicht einfach eine Wartezeit, sondern eine weitere Herausforderung, da sich in dieser Zeit sowohl Venus als auch Erde relevant weitergedreht haben (Doppler-Effekt). Bild 43 zeigt stark vereinfacht die Sende- und Empfangsanlage. Wie wurden hier die oben genannten Möglichkeiten zur Erzielung einer hohen Reichweite ausgenutzt?

- Sendeleistung  
Sie betrug 5 kW. Die entsprechende Endstufe