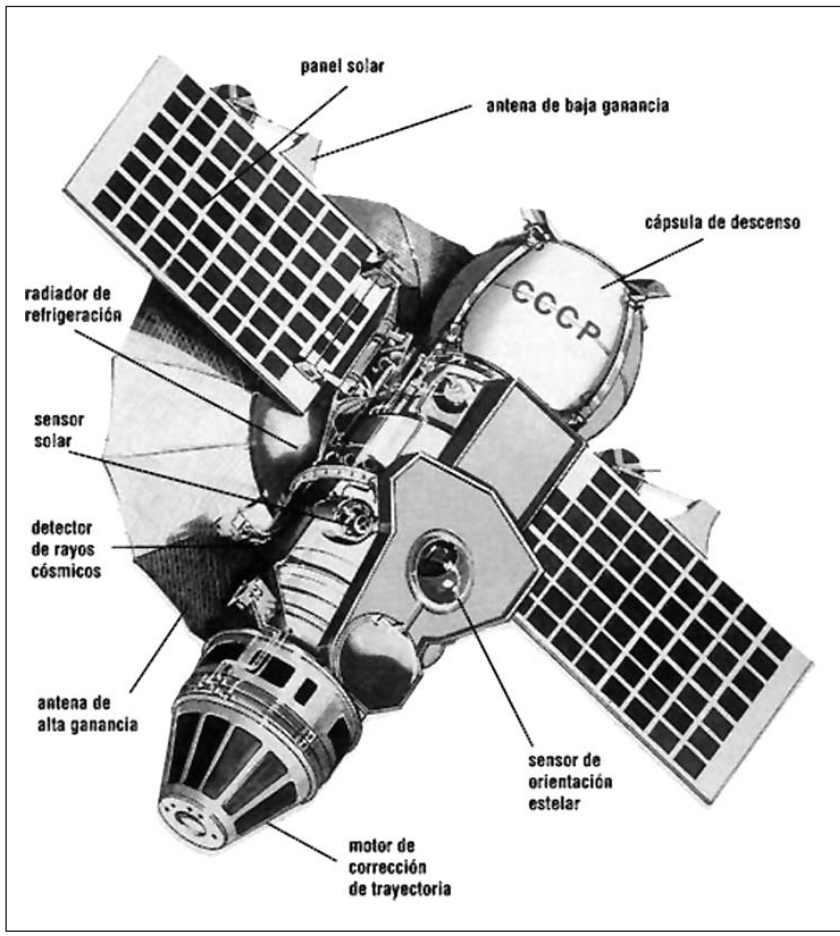

Bild 58: Verena 7 mit seiner großen Spiegelantenne, den Solarpanelen und der Landekapsel (Quelle: Internet)

handen. Der Uplink war im S-Band bei 2,1 GHz eingerichtet. Eine zweiachsig steuerbare Hochgewinn-Parabolantenne mit etwa 1,5 m Durchmesser war an einer Seite des Orbiter-Grundkörpers angeordnet, während sich eine festmontierte Turnstyle-Antenne mit einem einfachen kreisförmigen Reflektor an der Spitze eines der vier Solarpanels befand. Beide Antennen sind in Bild 62 gut zu erkennen. Zwei Bandrecorder konnten Daten bis 1280 Mbit speichern. Auch eine 381-MHz-Umsetzerstation (Relais) war vorhanden.

Das sowjetische Mars-Programm konnte solch stolze Erfolge, wie sie mit dem Viking-Programm erreicht wurden, nicht vorweisen, obwohl mit diesem Ziel zwischen 1971 und 1973 vier Lander und vier Orbiter ins All gebracht wurden. Wikipedia listet Ende 2017 insgesamt 47 Mars-Missionen auf und nennt einige für 2018 bis 2020 geplante. Besonders interessant ist das Mars Science Laboratory (MSL), eine NASA-Mission, die den Mars mit dem weitgehend autonomen Rover Curiosity (Neugier) erforscht.

7.4 Curiosity - Neugier auf den Mars

Mit 900 kg und der Größe eines Kleinwagens ist Curiosity bislang das mit Abstand schwerste technische Objekt, das je die Marsoberfläche erreichte, s. Bild 63. Ende 2011 gestartet, wurde die Landung auf dem Mars im Sommer 2012 bestätigt. Schon kurz nach der Landung kamen die ersten Bilder auf der Erde an. Diese Open-End-Mission dauert Ende 2017 noch an.

Curiosity nutzt für die Kommunikation mit der Erde den Mars Reconnaissance Orbiter (MRO, Mars-Erkundungssatellit, s. Bild 64), der schon im August 2005 zum roten Planeten aufbrach und

Bild 59: Die Landekapsel der Verena-Missionen war mit mehreren Antennen für Senden und Empfang ausgestattet. Bei optischer Sichtverbindung konnten Daten direkt zur Erde gesendet werden (Quelle: Internet)

diesen im März 2006 erreichte, als Relaisstation. Seine 3-m-Parabolantenne und sein fortschrittliches Kommunikationssystem ermöglichen die Übertragung großer Datenmengen an die Erde. Da der MRO den Mars in einer Höhe von nur wenigen hundert Kilometern umkreist, kann Curiosity all seine Daten bei geringem Energieverbrauch absetzen. Der MRO kann hingegen viel Energie aus zwei 5,35 m langen und 2,5 m breite Solarkollektoren schöpfen. Die Solarzellen haben einen hervorragenden Wirkungsgrad von 26% und können rund 2000 W liefern. Zur Energiespeicherung dienen zwei Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren mit je 50 Ah.

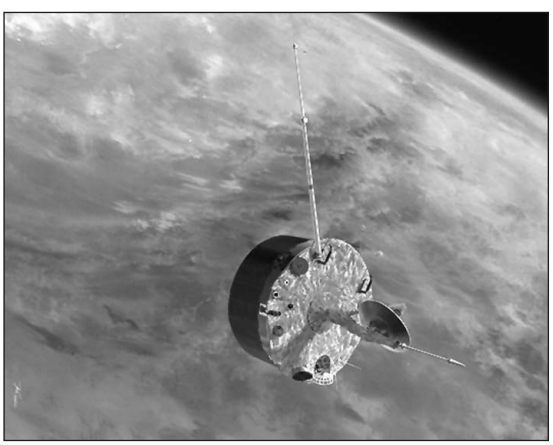

Bild 60: So kann man sich einen Pioneer-Venus-Orbiter im All vorstellen (Quelle: Internet)

Curiosity besitzt zwei Kommunikationskomplexe, einer arbeitet bei 400 MHz (UHF) und dient der Übertragung von wissenschaftlichen Daten, der andere arbeitet im X-Band bei 8 GHz und dient dem Empfang von Steuerkommandos und dem Senden von Statusdaten. Das UHF-System verfügt aus Redundanzgründen über zwei Sendeempfänger (Electra Lite Transponder, ELT). Die Datenrate wird automatisch je nach Signalqualität

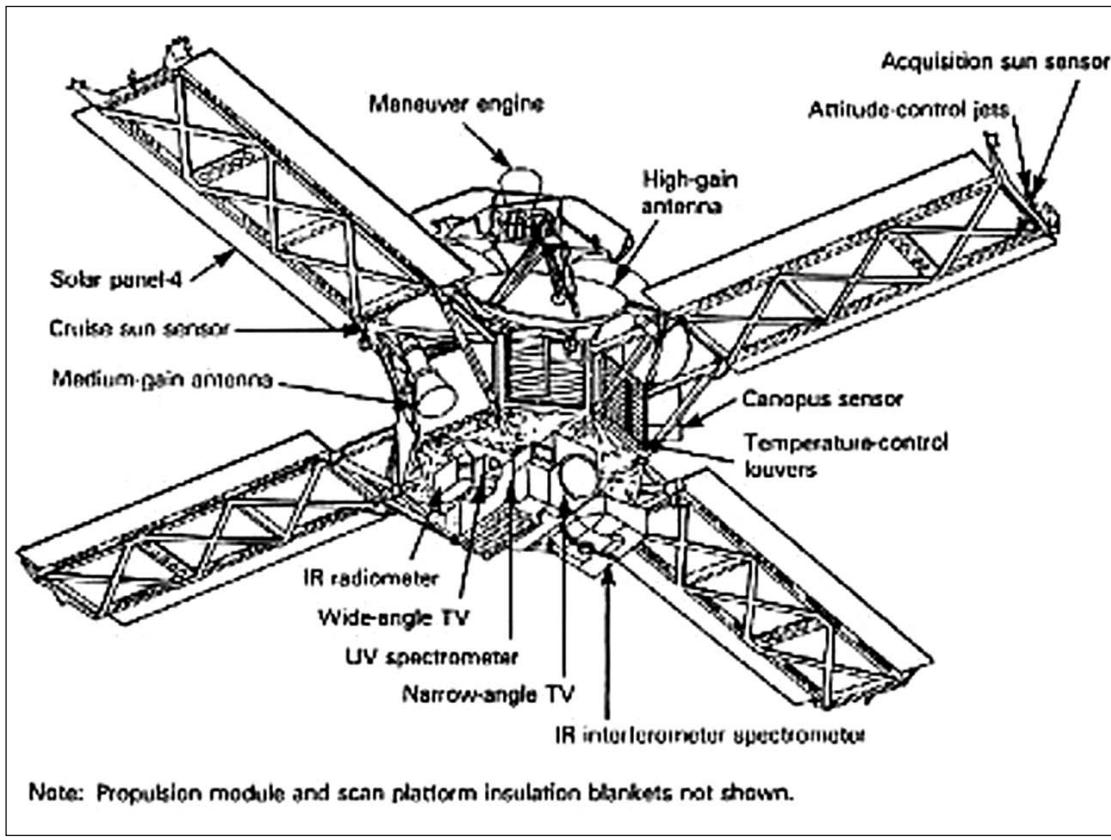

Bild 61: Die wichtigsten Komponenten von Mariner 9 (Quelle: NASA)

gewählt und beträgt bis zu 2 Mbit/s beim Senden auf 401 MHz und bis zu 256 kBit/s beim Empfangen auf 437 MHz. Die Versorgungsleistung beträgt bis zu 100 W. Benutzt wird eine Wendelantenne mit schwacher Richtwirkung, aber dafür großem Winkelbereich. Das UHF-Kommunikationssystem des Mars Reconnaissance Orbiters mit seinen beiden UHF-Niedriggewinn-Antennen empfängt diese Signale, verarbeitet sie und überträgt sie über sein Hochleistungs-Sendesystem im X-Band an das Deep Space Network.

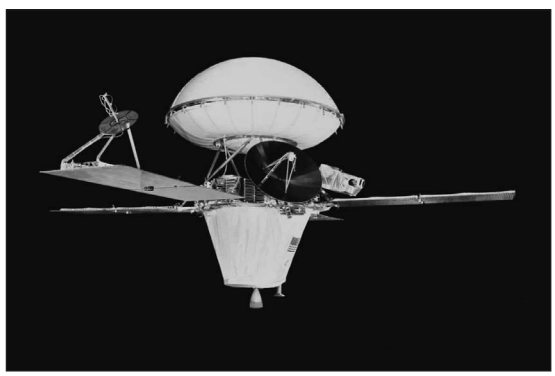

Bild 62: Ansicht eines Viking-Orbiters (Quelle: Wikipedia)

Weiter steht Curiosity der sogenannte Small Deep Space Transponder (SDST) für das X-Band zur Verfügung. Er hat nur sekundäre Bedeutung und benötigt für die Kommunikation noch den sogenannten Solid State Power Amplifier (SSPA), einen Transistorverstärker (MESFET/HEMT-Kombination), der das Signal auf bis zu 15 W verstärken kann und hierbei bis zu 62 W benötigt. Die zugehörige Hochgewinn-Antenne (High-Gain Antenna, HGA) ist eine Patch-Antenne mit 26 dBi Gewinn im Sendebetrieb und 21 dBi beim Empfang 21 dBi, weswegen sie präzise auf die Erde ausgerichtet werden muss. Der Gewinnunterschied rührt daher, dass auf 8395 MHz gesendet und auf 7183 MHz empfangen wird. Die Antenne hat 28

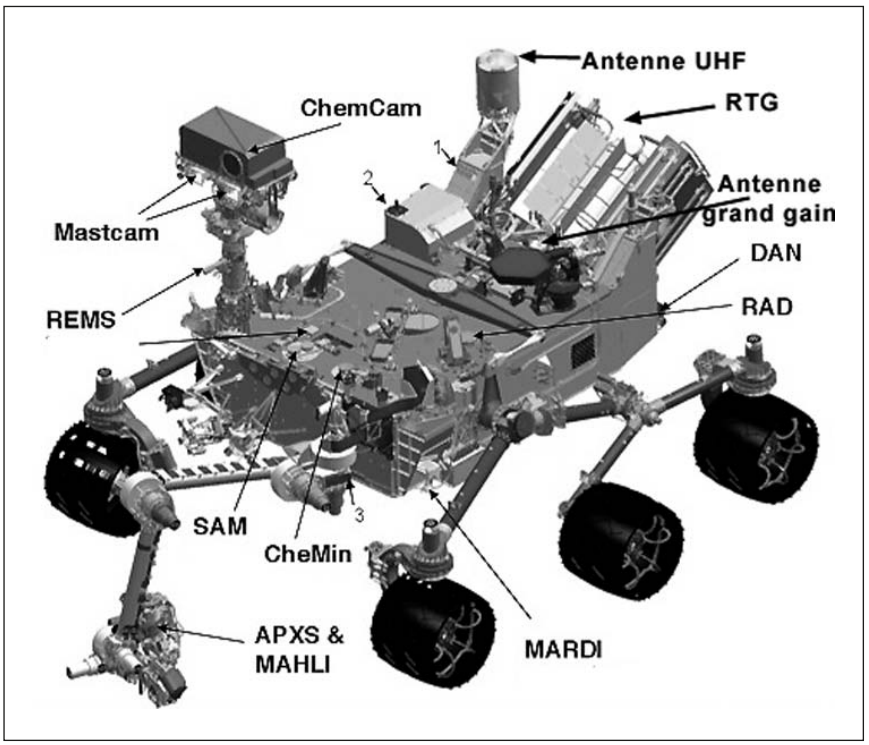

Bild 63: Aufbau des Mars-Rovers Curiosity, die „Antenne grand gain" ist deshalb so klein, weil die Frequenz mit etwa 8 GHz so groß ist (Quelle: Wikipedia)

cm Durchmesser und wiegt 8 kg. Die Datenrate zur Erde hin liegt zwischen 500 und 32.000 Bit/s je nach vom DSN eingesetzter Antenne, während von der Erde eingehende Daten typischerweise mit nur 190 Bit/s einlaufen. Es genügen wenige Minuten, um dem Rover seine neusten Befehle zu übermitteln.

Curiosity ist pro Marstag für nur wenige Minuten in der Lage, mit dem MRO kommunizieren.

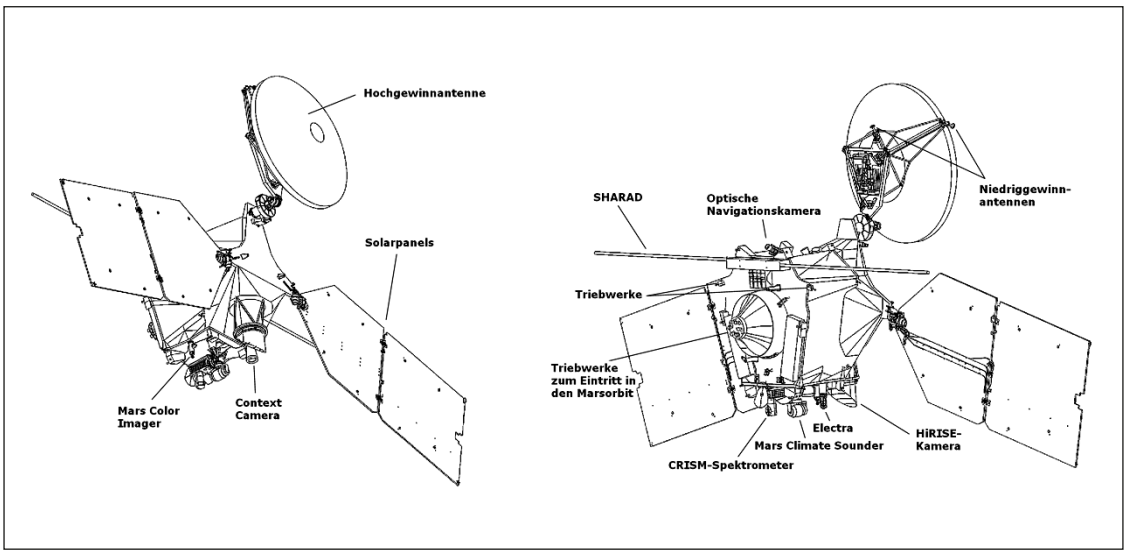

Bild 64: Der Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) mit seiner mächtigen Parabolantenne und zwei Antennen mit geringem Gewinn aus verschiedenen Perspektiven (Quelle: Wikipedia)

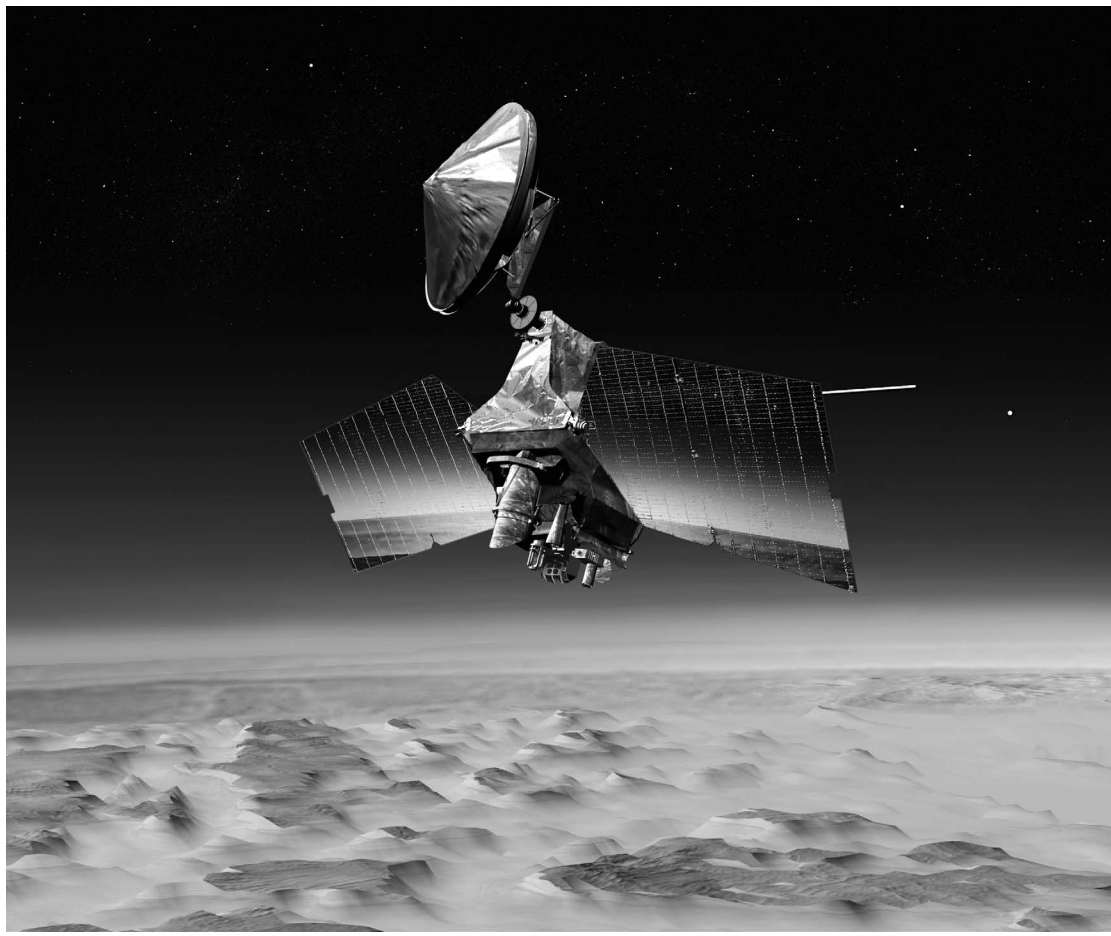

Bild 65: Künstlerische Darstellung des MROs. Vor den beiden Antennen vorn befindet sich ein Schutzbezug (Quelle: NASA)

Der Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG)

Raumfahrtmissionen stellen besondere Ansprüche an die Versorgungsquellen für Instrumente, Kommunikationstechnik und Steuerungseinrichtungen. Neben Solarzellen und Akkumulatoren spielt hier der Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG) eine große Rolle. Dies ist gewissermaßen eine nukleare Batterie, welche mit einem Wirkungsgrad um 20% Wärme aus dem Zerfall von Plutonium in elektrische Energie wandelt. Neben elektrischer Leistung kann der RTG also auch noch Wärme liefern. Diese Technik kam bereits bei Apollo, aber z.B. auch bei den Programmen Viking, Pioneer, Voyager, Curiosity und New Horizons zum Einsatz, insgesamt an die 50 mal. Der MMRTG ist eine Weiterentwicklung, die es erlaubt, auf dem Mars und im luftleeren Raum zu arbeiten. Der MMRTG weist ein flexibles, modulares Design auf und daher in der Lage, sich leicht einer Vielzahl verschiedener Missionen anzupassen. Er weist eine besonders hohe Energiedichte auf (Watt pro Gewicht oder Volumeneinheit, z.B. 2,8 W/kg). Beim Start liefert er über 100 W. Die Lebensdauer beträgt mindestens 14 Jahre. Die RTGs von Voyager 1 und Voyager 2 haben dieses Ziel deutlich übertroffen.

Dennoch kann Curiosity dann zwischen 100 und 250 Megabit an Daten an diesen übermitteln. Bei einer direkten Kommunikation mit der Erde würde man für die Übermittlung einer Datenmenge von 250 Megabit einen Zeitraum von bis zu 20 h benötigen. Das fortschrittliche Kommunikationssystem im MRO einschließlich 3-m-Parabolspiegel hingegen bewerkstelligt die Übermittlung von zuvor nie erreichten Datenmengen an die Erde – theoretisch bis zu 6 Mbit/s.

Seine Versorgungsleistung bezieht der Rover aus einem MMRTG (s. Kasten), der etwa 100 W liefert.

Auf https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso14_MSL_Telecom.pdf findet sich ein Dokument mit sehr ausführlichen Informationen zur Kommunikationstechnik des Rovers.

7.5 Ziel Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun: Voyager

Missionen zu den Planeten, deren Abstand von der Erde man in Milliarden Kilometern angeben kann, zeichnen sich teilweise durch deutlich größere Antennen an den Raumsonden aus als die Missionen zu Venus, Merkur oder Mars. Während sich dabei ein Durchmesser der Hochgewinn-Parabolantenne von etwa 1 m als ausreichend erwies, sind nun Durchmesser von etwa 2 oder 3 m anzutreffen, verbunden mit entsprechend höherem Gewinn (z.B. Verdopplung des Durchmessers = vierfacher Gewinn). Die Nutzung des X-Bands z.B. auf einer Frequenz um 8 GHz trägt weiterhin zu einem hohen Gewinn bei (Verdopplung der Signalfrequenz = doppelter Gewinn). Da das Signal im Raum zwar gewissermaßen verdünnt, jedoch nicht gedämpft wird, gelingt die Kommunikation über große Entfernungen auch mit kleinen Antennen, selbst mit Niedriggewinn-Antennen (Rundstrahlern) bei Nutzung einer 70-m-Antenne des Deep Space Networks. Man kann mathematisch nachweisen, dass sich geringe Gesamtgewinne auf einer Strecke durch niedrigere Datenraten kompensieren lassen. Die möglichen Datenraten gehen mit den Gewinnen der an den Sonden genutzten Antennen einher. Die Entscheidung, wie groß die Gewinne der Antennen an einer Sonde sein sollen bzw. welchen Durchmesser die Hochgewinn-Antenne haben soll, wird also von der Abschätzung der Menge der zu übermittelnden Daten mitbestimmt.

Es ist ganz interessant, mit der bereits vorgestellten Gleichung

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

C … Datenübertragungsrate in Bit/s
B … Bandbreite in Hz
S … absolute Signalleistung
N … absolute Rauschleistung

die maximal mögliche Datenrate für eine sehr schmale Bandbreite von 10 Hz und ein S/N von 0 dB (Rauschleistung = Signalleistung) auszurechnen:

$$C = 10\ \text{Hz} \times \log_2(1+1) = 10\ \text{Hz} \times \log_2(2) = 10\ \text{Hz} \times 1 = 10\ \text{Bit/s}$$

Das entspricht ganz ungefähr den Verhältnissen in dem Fall, wenn eine Raumsonde mithilfe ihrer Niedriggewinn-Antennen Steuerkommandos empfängt.

Auch die Signallaufzeit wird nun beachtlich. Für eine Milliarde Kilometer errechnet sie sich zu:

$$1000.000.000\ \text{km}/300.000\ \text{km/s} = 3333\ \text{s} = 55{,}6\ \text{min}$$

Es würde also rund eine Stunde dauern, bis ein von der Erde gesendetes Bahnkorrekturkommando bei der Raumsonde angekommen wäre.

Äußert beeindruckend und sehr erfolgreich sind die 1977 gestarteten Raumsonden Voyager 1 und Voyager 2. So ist Voyager 2 die bislang erste und einzige Raumsonde, die Uranus und Neptun besucht hat. Doch steht nicht nur die Erkundung des äußeren Planetensystems auf dem Programm, sondern auch die Erforschung des interstellaren (d.h. zwischen den Fixsternen befindlichen) Raums. Daher dauern die Missionen der Raumsonden Voyager 1 und Voyager 2 bis heute an - ein echtes Langzeitexperiment mit Höhen und Tiefen! Ende 2017 sind die Sonden ungefähr 30 Mrd. km weit entfernt. Auf https://voyager.jpl.nasa.gov/ werden diese Kilometer fortlaufend gezählt.