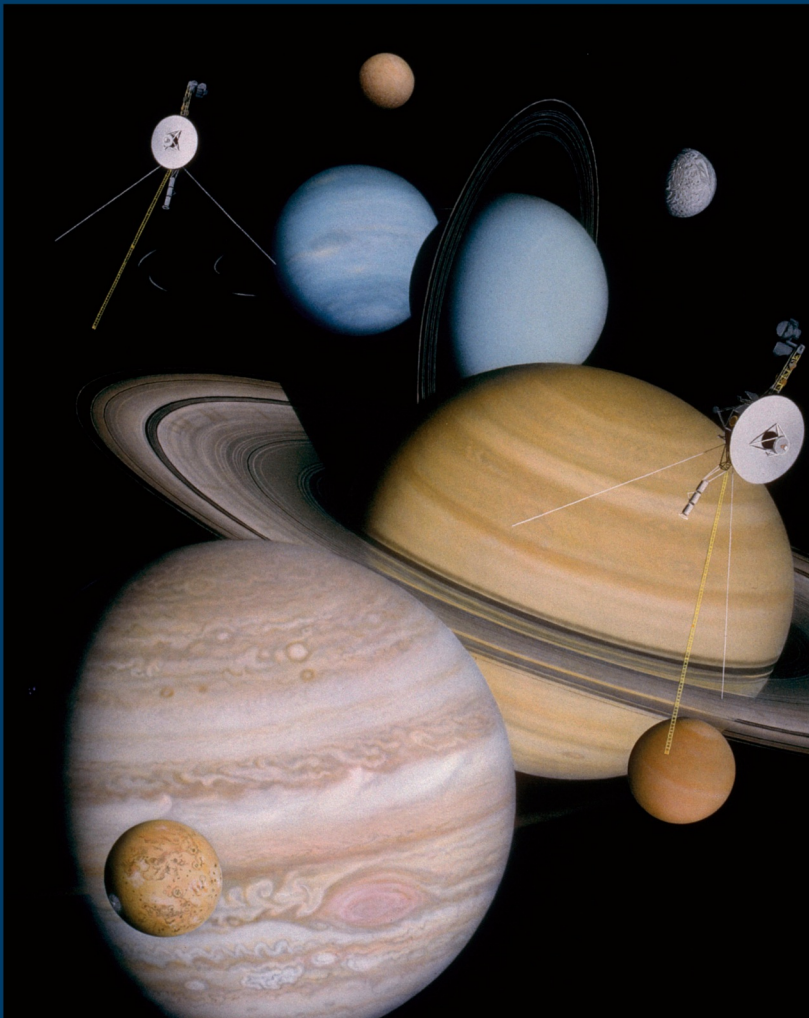


Bernd Leitenberger

Voyagers Grand Tour

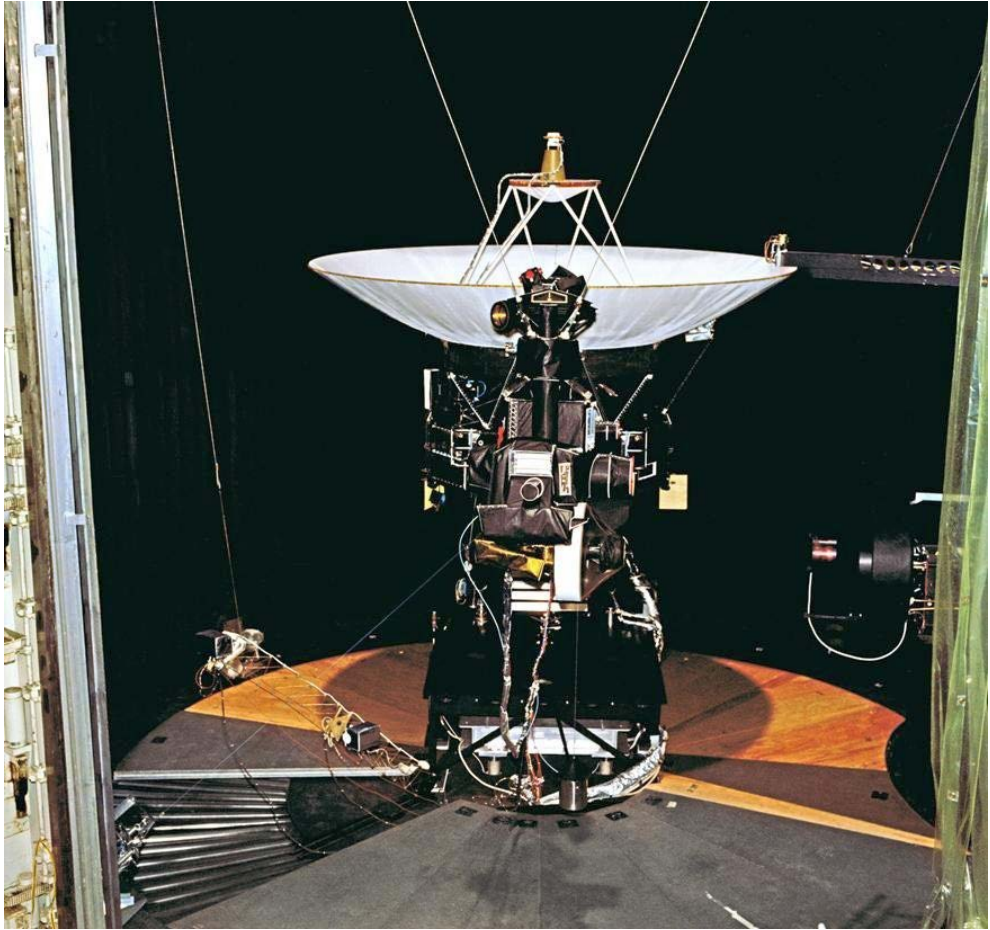
Eine Reise zu den Gasriesen und darüber hinaus



Bernd Leitenberger

Voyagers Grand Tour

Eine Reise zu den Gasriesen und darüber hinaus



Dieses Buch ist allen gewidmet, die Voyager zum Erfolg führten. Ein besonderer Dank geht an Mario Remler und Joachim Uhlig, die das Manuskript korrekturgelesen haben.

Bernd Leitenberger

Voyagers Grand Tour

Eine Reise zu den Gasriesen und darüber hinaus

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Edition Raumfahrt

© 2022 Bernd Leitenberger

<http://www.raumfahrtbuecher.de>

Herstellung und Verlag: [Books on Demand GmbH](#), Norderstedt

1.te Auflage 2022

ISBN-13: 978-3-7568-0683-6

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	8
Raumsonden vor Voyager.....	13
Swing By.....	24
Die erforderliche Genauigkeit der Bahnbestimmung.....	25
Die Grand Tour.....	32
Der hyperbolische Exzess oder c_3	35
Die richtige Planetenkonstellation.....	38
Die Bahnauswahl für Voyager.....	44
Die Erforschung der äußeren Planeten vor der Raumfahrt.....	50
Die Pioneer-Sonden.....	63
Die Sonden.....	66
Experimente.....	72
Start und Weg zum Jupiter.....	74
Bei Jupiter.....	75
Weiter zu Saturn.....	79
Die Mission nach den Vorbeiflügen.....	83
Die TOPS Sonden.....	87
Kommunikation.....	93
Experimente.....	96
Bordcomputer.....	100
TOPS und Voyager – ein persönliches Urteil.....	107
Die Titan Trägerrakete.....	111
Titan IIIE / Centaur D-1T.....	116
Aufbau von Voyager.....	124
Bordcomputer.....	126
CCS (Communication & Command System).....	131
AACS (Attitude and Articulation Control System).....	134
FDS (Flight Data Subsystem).....	138
Massenspeicher.....	143
Kommunikation.....	145
Struktur, Instrumentenplattform.....	155
Antriebssystem und Lageregelung.....	158
Sounds of Earth.....	163

Radioisotopen Thermogeneratoren (RTG).....	176
Übersicht RTG.....	183
Radioisotopen Heizelemente.....	185
RTG-Weiterentwicklungen.....	186
Gewinnung des Plutoniums.....	189
Jupiter und die Strahlungsbelastung.....	193
Experimente.....	197
Imaging Science System (ISS).....	200
Vidicon.....	202
Datenrate.....	206
Filter.....	210
Infrared Interferometer Spectrometer (IRIS).....	212
Wie funktioniert ein Spektrometer?.....	215
Photopolarimeter System (PPS).....	220
Ultraviolett Spectrometer (UVS).....	225
Teilchenexperimente.....	230
Cosmic Ray Detector System (CRS).....	233
Low-Energy Charged Particles (LECP).....	236
Plasma Science Experiment (PLS).....	241
Plasma Wave System (PWS).....	244
Planetary Radio Astronomy (PRA).....	248
Triaxiales Fluxgate Magnetometer (MAG).....	251
Radio Science System (RSS).....	255
Projektorganisation.....	259
Von der Grand Tour zu Voyager.....	261
Vorbereitung zum Start.....	273
Auf zum Himmelsvater.....	278
Der allgemeine Beobachtungsplan.....	286
Voyager 1 bei Jupiter.....	294
Voyager 2 bei Jupiter.....	304
Das Bild Jupiters nach den Vorbeiflügen.....	310
Saturn – Herr der Ringe.....	331
Filmstar Voyager.....	333
Der Beobachtungsplan für Saturn.....	334
Der Plan für Voyager 1.....	337

Voyager 1 bei Saturn.....	343
Der Plan für Voyager 2.....	348
Voyager 2 erreicht Saturn.....	353
Das Bild des Saturn nach Voyager.....	364
Uranus – eine neue Sonde erreicht den geheimnisvollen Planeten.....	400
Missionsplanung.....	414
Auf dem Weg zu Uranus.....	418
Die Begegnung.....	419
Das Bild Uranus nach Voyager 2.....	427
Neptun – der krönende Abschluss.....	443
Optimierung der Datenrate und des Raumfahrzeugs.....	447
Vorbereitungen.....	452
Zwischen Uranus und Neptun.....	459
Die Begegnung.....	461
Das Bild Neptuns nach Voyager 2.....	477
Voyagers Interstellare Mission.....	491
Die Vorbereitung.....	495
Das Familienporträt.....	497
Die VIM.....	503
Die Heliosphäre, das galaktische Medium und Ergebnisse.....	507
Die alternden Sonden.....	512
Die Nachfolger.....	517
Galileo.....	522
Cassini.....	534
Huygens.....	545
New Horizons.....	553
Juno.....	566
Voyager in Zahlen.....	576
Abkürzungen.....	585
Weiterführende Literatur.....	593
Links / Referenzen.....	597

Vorwort

Als ich im Juli 1980 die Hauptschule abschloss, bekam ich als Preis einen Buchgutschein. Damals interessierte ich mich schon für Astronomie und so kaufte ich das „Planetenlexikon“ von Bruno Stanek. In dem Buch faszinierten mich die zahlreichen Aufnahmen von Raumsonden, vor allem Viking und Voyager. Das ging los mit dem Einband, der Io und Europa vor dem großen roten Fleck zeigte (siehe Bild). Das Buch erschien nach dem Vorbeiflug der beiden Voyager-Sonden an Jupiter. Die Bilder zeigten einen farbenfrohen Jupiter mit Wirbeln. Seine Monde wirkten wie Murmeln, obwohl sie mindestens so groß wie der Erdmond waren. Es folgte ein Mond (Io), der wie eine Pizza aussah. Ein weiterer Mond ähnelte einer Billardkugel mit vielen Rissen. Ganymed zeigte dunkle und helle Gebiete, Kliffs und auch Kratern. Kallisto überraschte mit einem Einschlagbecken, das eingefrorene Schockwellen durch den Mond geschickt hatte.

Daraufhin fing ich an, mich für Raumfahrt zu interessieren. Wenige Monate später flog Voyager 1 an Saturn vorbei. Ich sammelte alle Zeitungsausschnitte, die ich bekommen konnte, in einem Ordner – den habe ich bis heute noch. Auch danach blieb ich an den Sonden dran. Als ich 1998 ins Internet ging, begann ich die Informationen zusammenzutragen, die ich fand. Später habe ich das im Netz veröffentlicht. Daraus entstand meine Website. Ich schrieb schließlich Programme, um die Bilder automatisiert von den NASA-Servern herunterzuladen, zu konvertieren und Bildfehler automatisch zu korrigieren.

Ohne die Voyagers hätte ich mich wohl nie für Raumfahrt interessiert. Es gäbe weder meine Website noch die bisherigen Bücher. Die Sonden sind etwas besonders. Sie sind die einzigen Raumsonden, die vier Planeten besuchten. Außerdem sind sie bis heute aktiv und liefern immer noch Ergebnisse. Die Sonden sind eine echte Erfolgsstory: Sie zeigen, wie die Bodenmannschaft Missionen noch retten kann. Oder wie man Raumsonden Jahre nach ihrem Start noch „tunen“ kann. Obwohl mir ein Buch über Voyager lange Zeit vorschwebte, habe ich keines geschrieben. Der Grund war einfach: die Sektion über Voyager auf meiner Website ist aufgrund des Interesses groß. Konnte ich da noch viel hinzufügen?

Ja, ich konnte. Bei der Recherche fand ich Informationen über die TOPS-Sonden und viel mehr Details über die Experimente. Das Archiv der Bulletins des JPL zur Mission

erlaubte es mir, viel mehr über die Mission zu schreiben. Je mehr ich suchte, um so mehr Details fand ich, z. B. über die Kompression der Bilddaten und des Ausbaus des DSN für den Empfang von Daten bei Neptun.

Es war trotzdem eine Zäsur nötig. Dies ist ein Buch über Voyager, also die Geschichte der Sonden, ihre Mission, die Technik und die Beschreibung der Experimente. Es ist kein Buch über Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Alleine die Ergebnisse, die Voyager lieferte, füllen ganze Bücher über die Planeten. Sie können in diesem Buch nur angerissen werden. Bei den Referenzen finden sie Hinweise auf weiterführende Literatur. Trotzdem ist das Buch sehr umfangreich geworden.

Ich habe die einzelnen Hauptkapitel so geschrieben, dass sie isoliert gelesen werden können, ohne viele Verweise. Dadurch gibt es Wiederholungen, bei Voyager wäre das Redundanz. Dadurch begegnen ihnen wichtige Fakten mehrmals und prägen sich besser ein.

Die Beschäftigung mit dem Buch hat mich auf eine Zeitreise versetzt. Zurück in die Siebziger. In zahlreichen Artikeln dieser Zeit, selbst in so hochkarätigen Magazinen wie „Science“, ist das Pixel- oder Zeilenmuster eines Monitors erkennbar: Es gab damals noch keine Möglichkeit, die Bilder digital auszudrucken. Stattdessen wurde der Monitor abfotografiert. Bis heute hat sich die Bezeichnung „Screenshot“ für eine Kopie des Bildschirminhaltes gehalten.

Selbst die Farbgebung war damals anders. Es wurde eine Aufnahme von Voyager einem Farbkanal zugeordnet. Da Voyager keine Filter hat, die den Primärfarben entsprechen, waren die Bilder farbverfälscht. Io, in Wirklichkeit gelb-orange, wurde knallrot dargestellt. Er bekam sogar die Bezeichnung „Pizza-Mond“. Die Saturnmonde, die alle mehr oder weniger farblos (grau) sind, erschienen in verschiedenen rötlich-braunen bis gelblich-braunen Farbtönen.

Und nun viel Spaß beim Lesen,

Ihr

A handwritten signature in blue ink, reading "Bernd Leitenberger". The signature is written in a cursive, flowing style.



Abbildung 1: Titelbild des „Planetenlexikons“: Jupiter aufgenommen am 13. Februar 1979 von Voyager 1

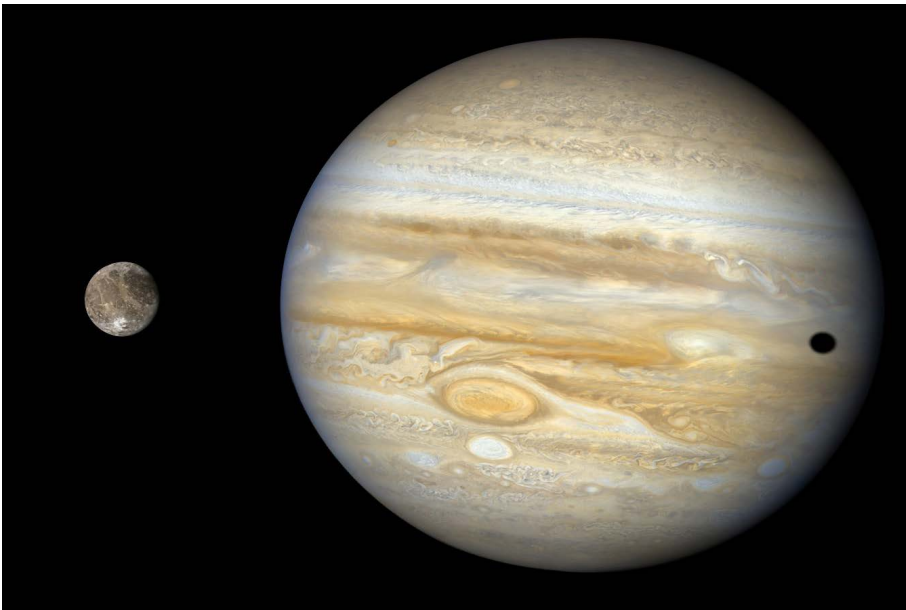


Abbildung 2: Aufbereitete Voyageraufnahme in natürlichen Farben mit Ganymed im Vordergrund



Abbildung 3: Io wie er in 1979 veröffentlichten Aufnahmen aussah und heute



Abbildung 4: Enceladus 1981 Aufnahme und heutige Farbgebung

Raumsonden vor Voyager

Als die beiden Voyager-Sonden 1977 zu ihrer Reise aufbrachen, war die Raumfahrt gerade einmal zwanzig Jahre alt. In diesem Kapitel geht es um die Erforschung der Planeten mit Robotern bis zum Start von Voyager. Das war Ende der siebziger Jahre.

Natürlicherweise orientieren sich die Ziele am Aufwand. Er umfasst mehrere Teilaspekte. Zum einen der Energiebedarf, der nötig ist, um einen Planeten oder den Erdmond zu erreichen – dieser ist bei Mond, Venus oder Mars in etwa gleich groß. Eine Sonde muss auf 11 bis 11,6 km/s beschleunigt werden. Das sind 3,2 bis 3,8 km/s mehr als für eine Erdumlaufbahn nötig ist, was die Nutzlast auf ein Viertel reduziert. Raumsonden mussten erheblich leichter als Satelliten sein oder sie benötigten eine größere Trägerrakete.

Während Voyager als Projekt Gestalt annahm, entsandte die NASA erstmals Sonden zum innersten Planeten Merkur und zum Gasriesen Jupiter. Zu diesen Planeten benötigen Sonden erheblich mehr Geschwindigkeit, zwischen 13,3 bis 14,2 km/s. So verwundert es nicht, dass diese Planeten erst ins Visier genommen wurden, als bereits mehrere Sonden Venus und Mars passiert hatten.

Der zweite Aspekt für den Aufwand ist die Reisezeit zum Ziel und dessen Entfernung von der Erde. Hier nimmt der Mond eine Sonderstellung ein. Eine Sonde kann ihn in drei bis vier Tagen erreichen. Er ist nie weiter als 400.000 km von der Erde entfernt. So verwundert es nicht, dass die meisten Missionen auf den Mond entfielen. Auf ihm gab es zuerst weiche Landungen und später automatische Bodenprobenentnahmen und die Beförderung zur Erde. Auf diese Proben warten wir von anderen Planeten noch immer.

Venus und Mars sind deutlich weiter von der Erde entfernt – die Maximalentfernungen liegen bei 258 und 400 Millionen km – bis sie eine Sonde erreicht, dauert es mindestens drei Monate. So lange muss die Sonde funktionieren (keine Mondsonde war zu diesem Zeitpunkt für eine so lange Mission ausgelegt). Aufgrund der großen Entfernung ist die Datenrate selbst bei großen Empfangsantennen gering. Das reduziert die Ergebnisse, die eine Sonde gewinnt drastisch.

Die Erforschung eines jeden Himmelskörpers vollzieht sich nach dem gleichen Schema. Die ersten Sonden fliegen an dem Körper vorbei. Sie können nur kurze Zeit um den

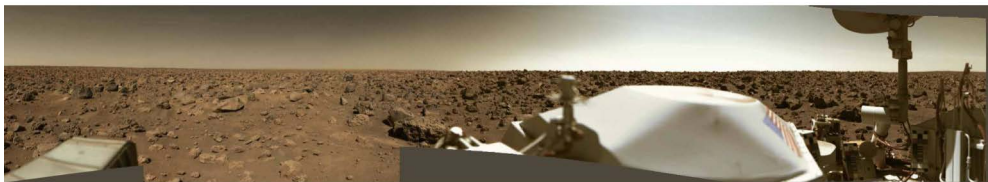
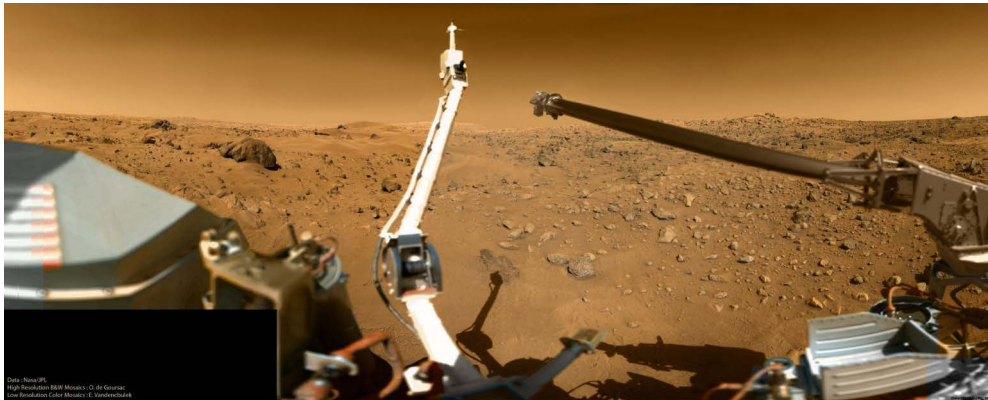


Abbildung 5: Landeplatz von Viking 1 und 2, Valles Marineris von Viking

nächsten Punkt Untersuchungen durchführen. Für das Einschwenken in eine Umlaufbahn benötigt die Sonde Treibstoff, um die Sonde abzubremesen. Die Raumsonde wird dadurch deutlich schwerer. Vor allem muss der Computer das Triebwerk im richtigen Abstand zum Planeten zünden und wissen, wie lange es arbeiten muss. Bei den ersten Raumsonden war das nicht möglich. Die Unsicherheit über die Position war zu groß.

Bei der ersten amerikanischen Planetensonde, Mariner 2, betrug sie 10.000 km in 100 Millionen km Entfernung. Sie wurde innerhalb eines Jahrzehnts um den Faktor 100 verbessert. Ein Jahrzehnt später war es möglich, Mariner 9 in eine Umlaufbahn um den Mars einschwenken zu lassen. Zu diesem Zeitpunkt lag die Navigationsgenauigkeit nur noch bei 200 bis 500 km. Dieser Punkt war für Voyager wichtig. Die Sonde passierte zahlreiche Monde und Planeten und hatte nur wenig Zeit, Aufnahmen zu machen. Damit diese gelingen, muss die Missionskontrolle wissen, wo sich Voyager relativ zum Ziel befindet. Sonst kann die Sonde die Kamera nicht korrekt ausrichten.

Um von einem Planeten zum Nächsten zu gelangen, musste ihn Voyager in einem festgelegten Abstand passieren. Jede Bahnabweichung führte zu einer 1.000 bis 10.000-mal größeren Abweichung beim nächsten Planeten. Abweichungen konnte die Sonde mit ihren Triebwerken korrigieren, aber die Treibstoffvorräte erlaubten nur kleine Änderungen.

Nach dem Einschwenken in den Orbit steht die Landung an. Das ist beim Mond einfach. Ohne Atmosphäre ist eine Landung genau berechenbar, schließlich gibt es keine Störeinflüsse. Bei Venus und Mars aber ist es deutlich komplexer. Der Mars hat nur eine dünne Atmosphäre. Dies wussten Astronomen schon vor dem Beginn des Raumfahrtzeitalters. Die ersten Messungen durch Raumsonden zeigten, dass sie noch dünner ist als vermutet. Die Landung kann nicht allein durch eine Abbremsung mit Hitzeschild und Fallschirm erfolgen. Sie muss aktiv mit Triebwerken unterstützt werden. Der nötige Zusatzaufwand führte zum Streichen des „Voyager Projektes“. Das war in der zweiten Hälfte der Sechziger Jahre das erste Marslandungsprojekt der NASA.

Die Landung auf dem Mars schafften die Amerikaner erstmals 1976 im Rahmen des Viking Projekts. Im Gegensatz dazu ist die Atmosphäre der Venus sehr dicht. Wie dicht, dies erfuhr die Welt erst durch die Raumsonden. Die ersten russischen Landesonden wurden vom Druck der Atmosphäre zerquetscht, bevor sie überhaupt den Boden er-

reichten. Erst 1970 erreichte Venera 7 die Oberfläche funktionsfähig. Venera 9 und 10 machten 1975 die ersten Aufnahmen der Venusoberfläche.

Während das JPL an Voyager arbeitete, brachen mit Pioneer 10 und 11 die ersten Raumsonden zum Jupiter auf (mehr ab S.63). Gleichzeitig sandte die NASA Mariner 10 zum Merkur. Diese Sonde setzte erstmals die Technik des Swing-By (S.24) ein, um einen anderen Planeten zu erreichen. Zuerst veränderte die Venus den Kurs, damit Mariner 10 den Merkur überhaupt erreichte. Die nötige Geschwindigkeit konnte ihr die Atlas-Trägerrakete nicht verschaffen. Dann wurde Merkur so passiert, dass er bei geringem Treibstoffverbrauch nicht nur einmal, sondern insgesamt dreimal passiert wurde. Schließlich lenkte das JPL Pioneer 11 noch zum Saturn. Das war beim Start nicht geplant, wurde mit einem Swing-By Manöver aber möglich.

Eine zweite Antriebsfeder war der Wettlauf im All. Der gipfelte 1969 in der bemannten Mondlandung. Doch er wirkte sich auch auf die unbemannte Raumfahrt aus. Diesem Wettlauf verdanken wir die enorme Anzahl an Raumsonden, die in den Sechziger Jahren gestartet wurden. Die USA begannen mit zwei Pioneer-Serien, die den Mond passieren sollten. Nur die letzte Sonde, Pioneer 4, tat das auch. Eine weitere Pioneer Serie, die in einen Mond-Orbit einschwenken sollte, hatte noch mehr Pech – alle Sonden gingen verloren, bevor sie den Mond auch nur erreichten.

Mit dem Ranger-Programm wollten die USA eine Kapsel weich auf dem Mond absetzen. Doch die ersten sechs Missionen schlugen fehl. So plante das JPL um, verzichtete auf die Kapsel und übertrug stattdessen Fernsehbilder bis zum Aufschlag. Die letzten drei (von neun) Sonden waren schließlich erfolgreich.

Die Landesonden des Surveyor-Programms sollten wichtige Daten der Mondoberfläche liefern, die die NASA für das Apolloprogramm benötigte. Fünf der sieben Sonden erfüllten ihre Mission. Das war die Trendwende bei der NASA, was die Zuverlässigkeit der Raumsonden betraf.



Abbildung 6: Aufnahme der aufgehenden Erde von Lunar Orbiter 1

Zuletzt sollte Lunar Orbiter potenzielle Landeplätze erkunden und den Mond kartieren. Es gab keinen Ausfall, alle fünf Missionen gelangen. Nachdem alle Landeplätze kartiert waren, konzentrierte sich die letzte Mission auf die Mondrückseite – ihre Bilder waren für mehr als 40 Jahre lang die besten, die es von der Mondrückseite gab.

Wesentlich mehr Sonden umfasste das sowjetische Luna Programm. Offiziell gab es 24 Lunas. Doch in der Realität, wenn Fehlstarts und im Erdorbit gestrandete Sonden mitzählt werden, waren es mehr als doppelt so viele Sonden.

Beim Lunaprogramm gab es eine iterative Entwicklung. Die ersten beiden Lunas sollten auf dem Mond aufschlagen. Luna 1 passierte den Mond, mit Luna 2 gelang der Aufschlag. Dabei gelangten sowjetische Hoheitssymbole auf den Mond, doch überlebt hat dies die Sonde nicht. Der Autor wird an Columbus erinnert, der in Amerika als Erstes die spanische Flagge in den Boden rammte.

Luna 3 umrundete den Mond und lieferte die ersten Bilder der für uns nicht sichtbaren Rückseite. Als dies gelang, ging die UdSSR sofort zur nächsten Erstleistung über. Ab Luna 4 versuchte die UdSSR eine weiche Landung, die jedoch erst mit Luna 9 gelang. Ein Reserveexemplar landete später als Luna 13 erfolgreich auf dem Mond. Luna 10 bis

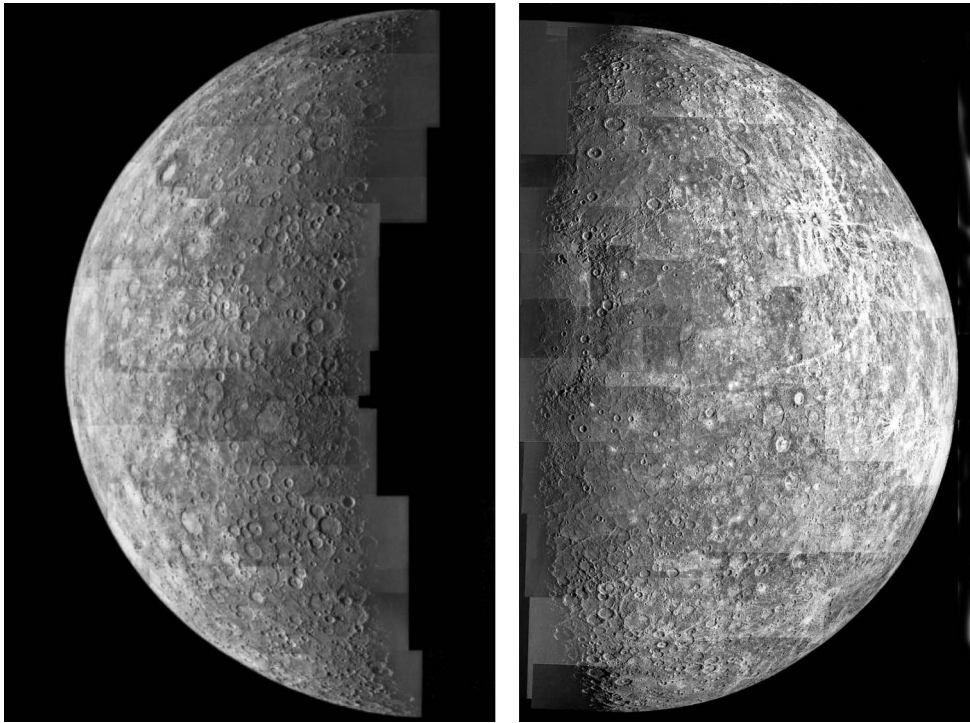


Abbildung 7: Mariner 10 Mosaik von Merkur

12 und 14 waren Orbiter, die den Mond umkreisten. Luna 15 bis 24 basierten auf einer neuen Sondenarchitektur. Mit ihr sollten Bodenproben zur Erde gebracht werden. Nachdem das mit Luna 16 gelang, ließen die Ingenieure bei Luna 17 die Rückstartstufe weg und landeten ein Mondmobil, Lunochod genannt. Das Lunochod wurde als Luna 21 nochmals in verbesserter Form auf dem Mond eingesetzt. Verzichteten die Wissenschaftler auf die Landung und montierte stattdessen Beobachtungsexperimente, hatten sie einen Orbiter, der zweimal als Luna 19 und 22 eingesetzt wurde. Mit Luna 16, 20 und 24 gelang es dreimal, Bodenproben zur Erde zu bringen.

Beim Mond war die Sowjetunion schneller als die USA, wenngleich es sich meist nur um Monate handelte. Die UdSSR betrachtete es als Wettrennen. Sobald eine Erstleistung erbracht war, stellte Russland alle weiteren Bemühungen ein. Russland startete noch die fertiggestellten Exemplare und ging zur nächsten Erstleistung über. Dagegen legten die USA jeweils eine Serie mit definierten Aufgaben auf. Dabei ging es weniger

darum, schneller zu sein (auch wenn es diesen Druck subjektiv immer gab) als vielmehr die wissenschaftlichen Erwartungen zu erfüllen. Entsprechend lieferten die US-Sonden weitaus mehr und bessere Ergebnisse als die sowjetischen Lunas.

Das Wettrennen setzte sich bei der Erforschung der erdnahen Planeten fort. Den Anfang machte die Sowjetunion, die schon 1960 versuchte, zum Mars zu fliegen. Die beiden Sonden gingen bei Fehlstarts verloren. 1962 entsandten beide Nationen Sonden zur Venus, doch nur die amerikanische Mariner 2 erreichte den Planeten. Sie stellte eine sehr hohe Oberflächentemperatur fest, die später von Mariner 5 bestätigt wurde. Das führte dazu, dass sich die NASA auf den Mars konzentrierte. Auf dem Mars konnte eine Landesonde länger überleben, außerdem versperrte keine undurchdringliche Wolkenschicht den Blick auf den Planeten. Die UdSSR versuchte nach den ersten Vorbeiflugmissionen auf der Venus zu landen. Aber mehrere Missionen verstummten beim Abstieg, ohne die Oberfläche zu erreichen. Eine Landung gelang erst mit Venera 7. Es hätte früher gelingen können, doch die russischen Konstrukteure misstrauten den von Mariner 2 und 5 gelieferten Messdaten. Schließlich stammten diese Messwerte vom Klassenfeind. Sie gingen von einem deutlich geringeren Bodendruck aus, und Venera 4 bis 6 wurden, lange bevor sie die Oberfläche erreichten, zerquetscht.

Auch hier kommen zu den offiziellen Veneras, die durchnummeriert sind, fast ebenso viele gescheiterte Missionen, die in einer Erdumlaufbahn strandeten.

Die USA konnten mit Mariner 4 die ersten, noch groben Nahaufnahmen vom Mars gewinnen. Sie deckten nur 1 Prozent der Oberfläche ab und vermittelten den falschen Eindruck, dass der Mars genauso verkratert ist wie der Mond. Mariner 1, 3 und Mariner 8 gingen bei Fehlstarts verloren. Die Sowjetunion hatte deutlich weniger Glück bei der Marsforschung. In den Sechziger Jahren gab es zahlreiche Fehlstarts. Nur Mars 1 verließ erfolgreich die Erde, ging aber auf dem Weg zum Mars verloren.

Mariner 5 war für mehr als ein Jahrzehnt die letzte Venussonde der USA. Dabei war sie keine neue Sonde, sondern nur das umgebaute Reserveexemplar von Mariner 4. Sie ergänzte unser Bild von der Venus und lieferte verlässliche Druck- und Temperaturangaben der Oberfläche.

Mariner 6+7 waren verbesserte Vorbeiflugsonden, die 20 Prozent der Marsoberfläche abbildeten. Es zeigte sich, dass die Oberfläche sehr vielfältig war. Sie umfasst auch durch Erosion entstandene Gebiete, was das Interesse am Mars ansteigen lies.

Die Sowjetunion konnte mit Venera 8 den Erfolg von Venera 7 wiederholen und Bodentemperatur und Druck der Venusoberfläche messen. Die Konstrukteure gingen, nachdem die Daten vorlagen – 480 Grad Temperatur und etwa 90 Bar Druck – an die Konstruktion größerer Sonden. Diese waren viermal schwerer als ihre Vorgänger und konnten während ihrer kurzen Arbeitszeit Bilder der Oberfläche übertragen.

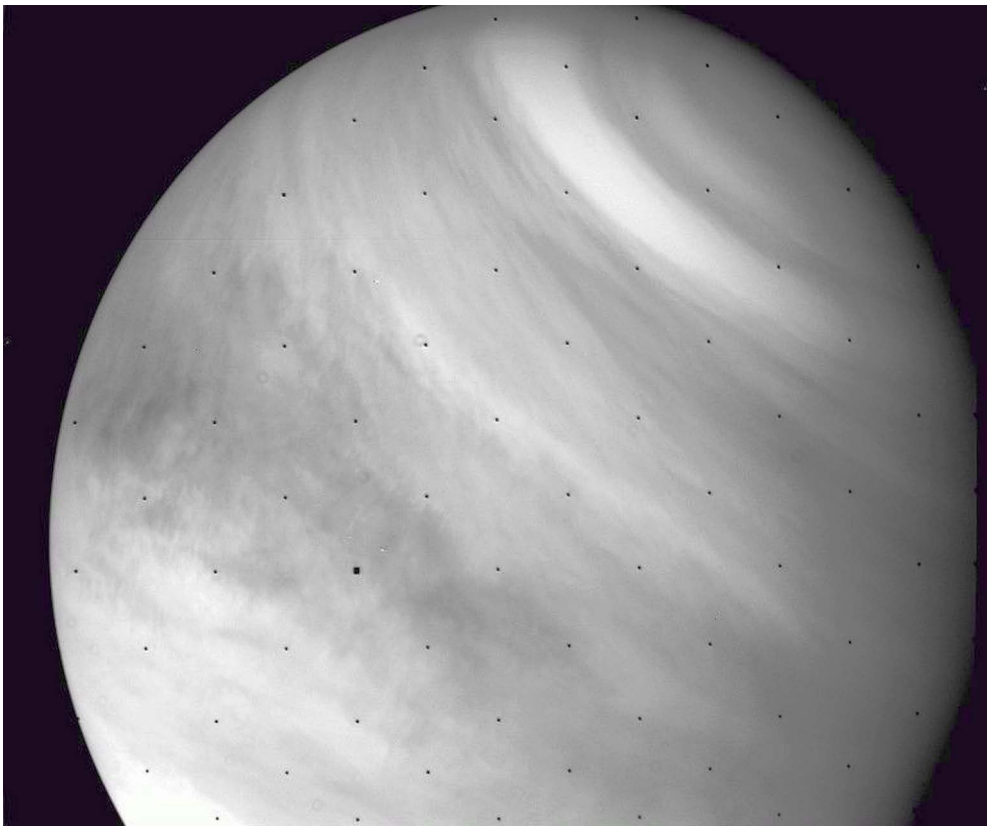


Abbildung 8: Mariner 10 Rohaufnahme der Venus

Dies gelang 1975 mit Venera 9 und 10. Die UdSSR feierte die ersten Bilder von der Oberfläche eines anderen Planeten – wenige Monate, bevor der amerikanische Viking Lander 1 erste Bilder von der Marsoberfläche übertrug.

1971 bereiteten sich beide Nationen vor, erstmals eine Sonde in einen Marsorbit eintreten zu lassen. Das gelang mit Mariner 9 – Mariner 8 ging beim Start verloren – und Mars 2 und 3. Leider tobte zu dieser Zeit ein globaler Staubsturm, der beim Mars regelmäßig beim Durchlaufen des sonnennächsten Punktes entsteht. Mariner 9 konnte abwarten, bis er sich gelegt hatte. Doch die mit technischen Problemen kämpfenden sowjetischen Mars-Sonden konnten das nicht. Sie lieferten daher kaum Ergebnisse. Die beiden Lander von Mars 2 und 3, gingen verloren. Lediglich Mars 3 übertrug einige Zeilen eines Bildes, bevor die Sonde kurz nach der Landung verstummte.

Die USA gingen an die viel komplexere Viking-Mission, zwei Sonden bestehend aus je einem Orbiter und einem Lander. Die Orbiter sollten den Mars besser und umfassender kartieren als Mariner 9, welche die erste Karte des Mars lieferte. Die Lander sollten auf dem Mars landen und dort mehrere Monate lang den Boden und die Atmosphäre beobachten und sogar nach einfachem Leben suchen. Dieses Experiment wurde seitdem nie wiederholt.

Die Viking-Mission verzögerte sich um zwei Jahre, was der Sowjetunion die letzte Gelegenheit gab, den USA noch einmal zuvorkommen. Aufgrund der Ausfälle bei früheren Missionen schickte die kommunistische Führung 1973 gleich vier Sonden auf den Weg. Obwohl sie wussten, dass die Sonden mit Defekten starteten. Ingenieure hatten einige Monate vor dem Start bemerkt, dass der Hersteller eines Transistors das Material der Kontaktpins geändert hatte – dadurch hatten diese Transistoren eine hohe Ausfallrate. Doch anstatt die Transistoren durch neu produzierte auszuwechseln, was den Start auf 1976 verschob, wurde von höchster Stelle der Start befohlen. Schließlich würden beim nächsten Startfenster die Vikings starten. Zumindest bei der sowjetischen Führung gab es 1973, vier Jahre nach der Mondlandung, noch ein „Wettrennen“.

Von den vier Sonden – je zwei Lander und zwei Orbiter – war Mars 5 die Einzige, die den Mars funktionsfähig erreichte. Doch auch Mars 5 fiel nach wenigen Wochen aus. Damit endete die Erforschung des Mars durch die Sowjetunion für 15 Jahre.

Viking war in gewisser Weise ein Vorläuferprojekt von Voyager. Die Sonden waren komplexer als die Marinerserie, entsprechend deutlich teurer. Sie waren wie Voyager auf eine längere Mission ausgelegt – die Lander sollten sechs Monate durchhalten und die Orbiter 18 Monate. Real arbeiteten die Orbiter zwei bzw. vier Jahre – bis zur Erschöpfung des Gasvorrats zur Lageregelung. Die Lander hielten dreieinhalb und sechs Jahre durch, ein Vielfaches der Sollbetriebszeit. Mit Viking begann die Zeit, in der die Sonden einen Namen bekamen, statt nur eine Nummer. Die Missionen wurden deutlich teurer, aber auch wissenschaftlich anspruchsvoller. Diese Phase hält bis heute an.

Mariner 10 war die letzte Mariner-Sonde – die Einzige, die als Einzelexemplar entworfen wurde. Sie flog 1974 an der Venus vorbei, um zum Merkur zu gelangen. Merkur pasierte Mariner 10 bis 1975 dreimal und kartierte dabei knapp die Hälfte der Oberfläche. Mariner 10 war nicht nur die erste Raumsonde, die Swing-By nutzte. Sie war auch die erste Sonde, die das X-Band als neues Kommunikationsband nutzte. Das erlaubte es, die zehnfache Datenrate gegenüber dem vorher benutzten S-Band zu übertragen. Ohne das X-Band hätte es bedeutend weniger Ergebnisse von Voyager gegeben.

Beide Nationen hatten Serien, die nicht zu den Planeten flogen. Bei den USA gelangten Pioneer 5 bis 9 in Sonnenumlaufbahnen. Sie erforschten das interplanetare Medium. Die Sowjetunion legte das Zond-Programm auf. Zond diente im Wesentlichen als Deckbezeichnung. Die ersten drei Zonds waren Sonden anderer Programme, die ihre Startfenster verpasst hatten. Sie wurden zur Erprobung genutzt, um Fehler zu finden und zu beheben. Zond 4 bis 8 waren unbemannte Tests des Sojus Raumschiffs. Die Sojus wurde auf eine Mondumrundung geschickt und landete wieder auf der Erde. Die Sojus wurde ursprünglich für das später eingestellte bemannte Mondflugprogramm entwickelt.

Die einzige andere Nation, die bis 1977, dem Startjahr von Voyager, Raumsonden startete, war Deutschland. Die deutsch-amerikanischen Heliossonden setzten ab 1974 und 1976 die traditionell starke Sonnenforschung in Deutschland fort. Sie erkundeten das interplanetare Medium bis innerhalb der Umlaufbahn von Merkur. Gebaut für einen Betrieb von 18 Monaten, hielten sie vier bzw. zwölf Jahre durch. Von 1975 bis 2021 hielten sie den Rekord für die geringste Sonnendistanz.

Verglichen mit der heutigen Technik waren die ersten Sonden primitiv. Ihre Datenrate war niedrig, die Bilder unscharf und kontrastarm. Viele der damals gewonnenen Ergeb-

nisse wurden später revidiert, weil die Messungen ungenau waren. Viking und Voyager waren die ersten Sonden, die erheblich mehr Digitaltechnik einsetzten. Nicht nur die Elektronik der Sonden, sondern auch die Verarbeitung der Messwerte wurde auf digitale Technik umgestellt. Bei den Mariners wurden die Bilder analog gewonnen und als Analogwert auf die Trägerwelle hochmoduliert.

Charakteristisch für die damalige Zeit war, dass keine einzelnen Sonden gebaut wurden, sondern mindestens Doppelmissionen. Das Rangerprogramm umfasste nicht weniger als neun Sonden. Das war der mangelnden Zuverlässigkeit der Trägerrakete geschuldet – drei von zehn Mariners gingen beim Start verloren. Auch das damals noch hohe Ausfallrisiko der Technik der Sonden war dafür verantwortlich. Es sollte unter allen Umständen wenigstens eine Sonde das Ziel erreichen.



Abbildung 9: Marsmond Phobos, Aufnahme von Viking Orbiter

Swing By

Die Missionen von Voyager wären ohne die Technik des Swing-By nicht möglich gewesen. Daher an dieser Stelle eine kleine Erklärung dieser Technik.

Swing-By (auch unter Begriffen wie „Gravity Assist“, „Fly-By“ oder „interplanetares Billard“ bekannt) ist die gezielte Veränderung einer Raumsonden-Flugbahn durch den Vorbeiflug an einem Planeten. Unter Experten wird die Technik „Gravity Assist“ (auch im Deutschen) genannt, was das Phänomen besser beschreibt. Doch die populären Begriffe haben sich durchgesetzt und klingen einfach besser.

Das die Gravitationskraft die Bahn einer Sonde verändert, war schon bekannt. Sonst würde kein Satellit die Erde auf einer Kreis- oder Ellipsenbahn umrunden, sondern geradlinig im All verschwinden. Die NASA maß dem Phänomen bei den ersten Missionen noch keine praktische Bedeutung zu. Dennoch beobachteten Ingenieure die Bahnänderungen bei Vorbeiflügen an Mars und Venus genau.

Die sowjetische Mondsonde Luna 3 umrundete den Mond, um Bilder der Mondrückseite zu machen. Dabei hob der Mond den erdnächsten Punkt von 200 auf 47.000 km Höhe an. Durch weitere Vorbeiflüge am Mond trat Luna 3 nach sieben Monaten wieder in die Erdatmosphäre ein und verglühte. Die erste US-Raumsonde, Mariner 2, wurde durch ihren Venusvorbeiflug um 625 m/s beschleunigt. Der sonnenfernste Punkt ihrer Bahn stieg von 144 auf 183 Millionen km an.

Die Technik des Swing-By spielte in den ersten 15 Jahren der Raumfahrt keine Rolle. Zum einen setzte es voraus, dass die Bodenkontrolle einen bestimmten Punkt mit hoher Präzision erreicht. Auf der anderen Seite muss die Missionsplanung diesen Punkt genau berechnen können.

Die erforderliche Genauigkeit der Bahnbestimmung

Swing-Bys wurden bereits in den sechziger Jahren untersucht. Doch damals war es nicht möglich, Raumsonden so genau zu steuern, dass sie den Vorbeiflugpunkt präzise erreichen. Beim Swing-By können sich kleine Fehler bei Abstand, Richtung oder Ankunftsgeschwindigkeit dramatisch auswirken. Hierzu zwei Zahlen:

Bei der „Grand Tour“ wurde ein Swing-By an Uranus zu Neptun untersucht. Eine Abweichung von 1 km beim uranusnächsten Punkt bewirkt, dass die Bahn bei Neptun um 14.000 km abweicht. Bei Mariner 10 bewirkte eine Bahnabweichung um 3 km vom errechneten Zielpunkt bei der Venus, dass die Sonde 1 m/s nachkorrigieren musste. Vor dem Venusvorbeiflug hatte Mariner noch Treibstoff für eine Geschwindigkeitsänderung von 100 m/s. Sie musste den Zielpunkt auf 300 km genau treffen. Je genauer die Bahn von Raumsonde und Planet bekannt ist, desto geringer sind die Treibstoffreserven.

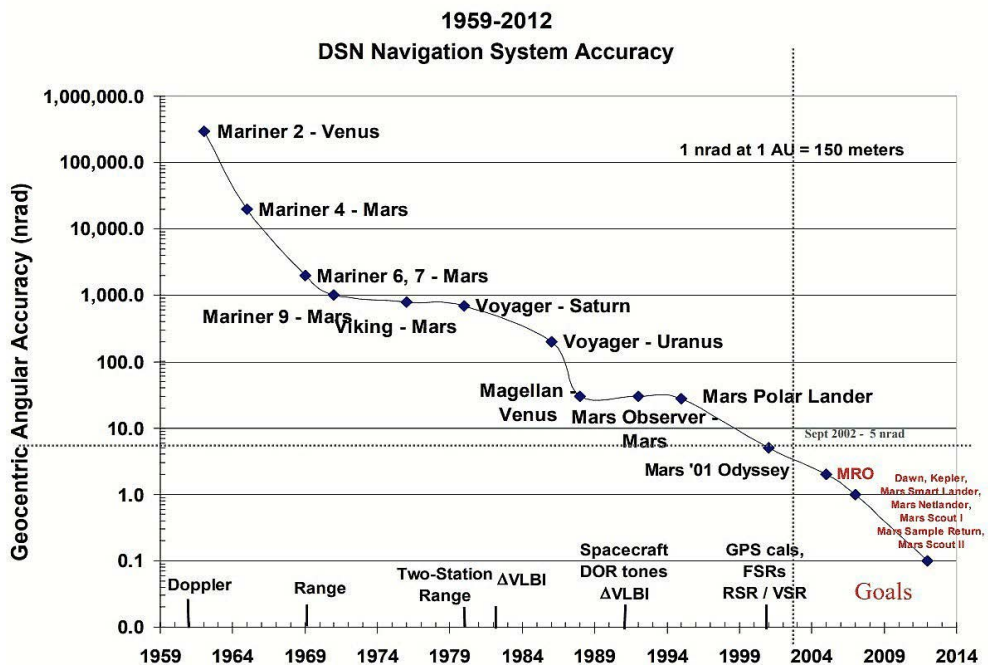


Abbildung 10: Verbesserung der Navigationsgenauigkeit des DSN

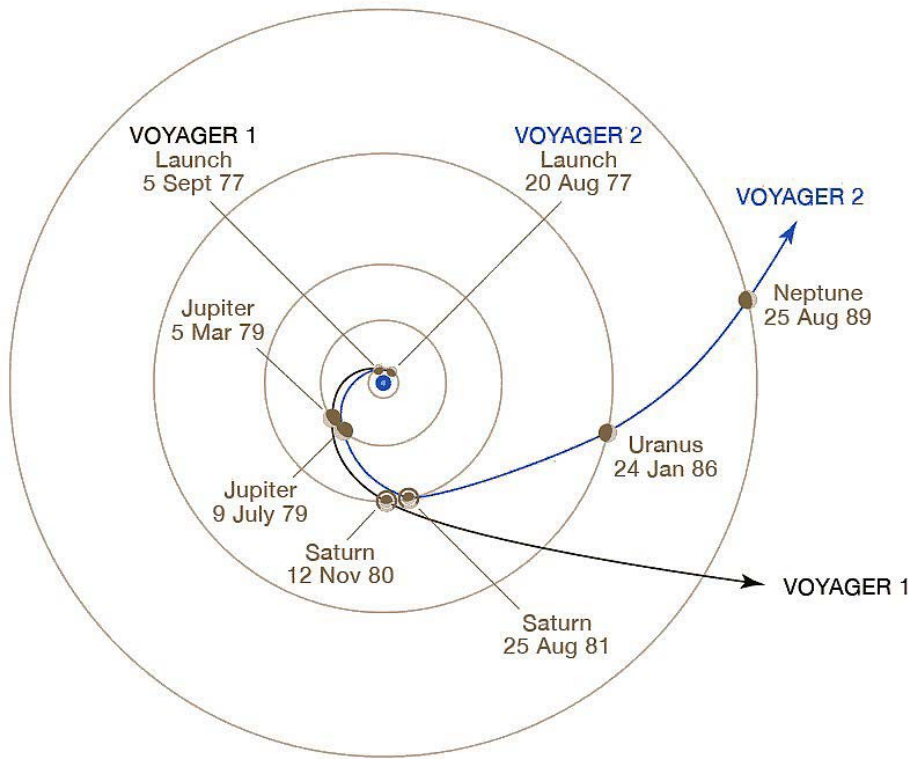


Abbildung 11: Die Bahnen von Voyager und Pioneer 10+11

Bei der ersten Raumsonde der Amerikaner, Mariner 2, war die Bahn auf etwa 10.000 km bekannt. Diese Unsicherheit resultierte aus den damaligen Methoden der Entfernungsbestimmung und der verwendeten Technik. Die Genauigkeit steigerte sich in den sechziger Jahren stark. Die NASA erreichte bei den Vorbeiflügen von Mariner 6+7 im Jahre 1969 am Mars eine Abweichung von 300 bis 500 km. Diese Genauigkeit machte erst die Orbitalmission von Mariner 8 und 9 möglich. Sonst hätte Mariner 9 einen so hohen Punkt beim Mars anvisieren müssen, dass die Treibstoffvorräte zu schwer wären. Zu dieser Zeit ging die NASA an die Planung der Grand Tour. Das JPL arbeitete mit einer Geschwindigkeitsänderung von 500 m/s, um die Abweichungen zu kompensieren.

Die Pioneer 10+11 Sonden verbesserten die Kenntnis der Bahnen von Jupiter und Saturn, die beim Start bei 7.000 bis 10.000 km lag. Zudem wurde die Positionsbestim-

mung durch Funkvermessung weiter verbessert. So konnte die NASA Voyager mit deutlich geringeren Treibstoffvorräten (für 200 m/s) starten. Bei Projektbeginn betrug die mögliche Navigationsgenauigkeit durch Radiovermessung bei Jupiter 250 km. Später konnte sie durch Vermessen von Bildern der Sonde und verbesserte Empfänger, die noch kleinere Schwankungen der Signalfrequenz registrierten, auf 50 km reduziert werden. So kam Voyager mit dem Treibstoffvorrat gut aus. Dies erklärt, warum die Technik des Swing-By erst seit den siebziger Jahren genutzt wird.

Der zweite wesentliche Punkt ist, dass die Bodenkontrolle die Bahn zum Ziel berechnen muss. Ohne Mathematik kommt die Raumfahrt nicht aus. Doch es gibt einen Unterschied zwischen Kurskorrekturen, um von einer Bahn in eine andere zu gelangen oder einer Anfangsbahn zu einem Planeten und den Bahnen für Swing-By. Der Unterschied ist der mathematische Aufwand. Um eine Kurskorrektur durchzuführen, gibt es eine mathematische Vorschrift, mit der sie berechenbar ist. Die Berechnung wurde schon im 18-ten Jahrhundert von Joseph-Louis Lagrange erkannt. Techniker sprechen von der Lösung des Lambert-Problems, da es Lambert als Erster formulierte und zum Teil löste. Das Lambert-Problem ist vollständig lösbar. Das heißt, es gibt eine Rechenvorschrift, die notfalls sogar ohne Computer lösbar ist.

Dies ist mit Swing-By Bahnen nicht möglich. Sie sind Teil des sogenannten Dreikörper-Problems, das anders als das Lambert-Problem (ein Zweikörper-Problem) nicht geschlossen lösbar ist. „Nicht geschlossen lösbar“ heißt, es gibt keine einfache Rechenvorschrift, mit der die ideale Bahn berechenbar ist, um von einem Planeten zum anderen zu gelangen. Bis Anfang der Sechziger Jahre des letzten Jahrhunderts gab es kein Verfahren, mit dem der Rechenaufwand auf ein für damalige Computer erträgliches Maß reduzierbar war.

Das änderte Michael Minovich an der University of California, Los Angeles (UCLA). 1961 hatte Minovich einen Weg gefunden, um das Problem numerisch zu lösen. Anders als bei dem Lambert-Problem ist das keine einfache Lösung. Vielmehr simuliert er einen Vorbeiflug an einem Planeten. Dann schaut er, in welchem Minimalabstand diese Bahn das Ziel passiert. Danach ändert er die Startbedingungen leicht ab und vergleicht den neuen Vorbeiflugpunkt mit dem ersten. Mit Approximationsverfahren werden die Startbedingungen modifiziert, bis die „ideale“ Bahn gefunden ist. Minovichs Verdienst ist, eine Rechenvorschrift gefunden zu haben, die schnell konvergiert. Das heißt, jeder

Durchlauf liefert Startwerte für einen weiteren Durchlauf, dessen Ergebnis noch näher an der gewünschten Bahn liegt.

Minovich setzte dazu einen IBM 7090 Computer ein, der schnellste Computer, der damals verfügbar war. Er erreichte eine Geschwindigkeit von 0,1 MFlops, in etwa die eines 80387 Coprozessors 24 Jahre später. Der IBM 7090 allein kostete 2.9 Millionen Dollar und eine einzige Betriebsstunde schlug mit rund 1.000 Dollar zu Buche. Das bedeutete natürlich eine große psychische Belastung, denn hätte Minovich die Lösung nicht gefunden, wäre dies ein teures Experiment für die Universität geworden.

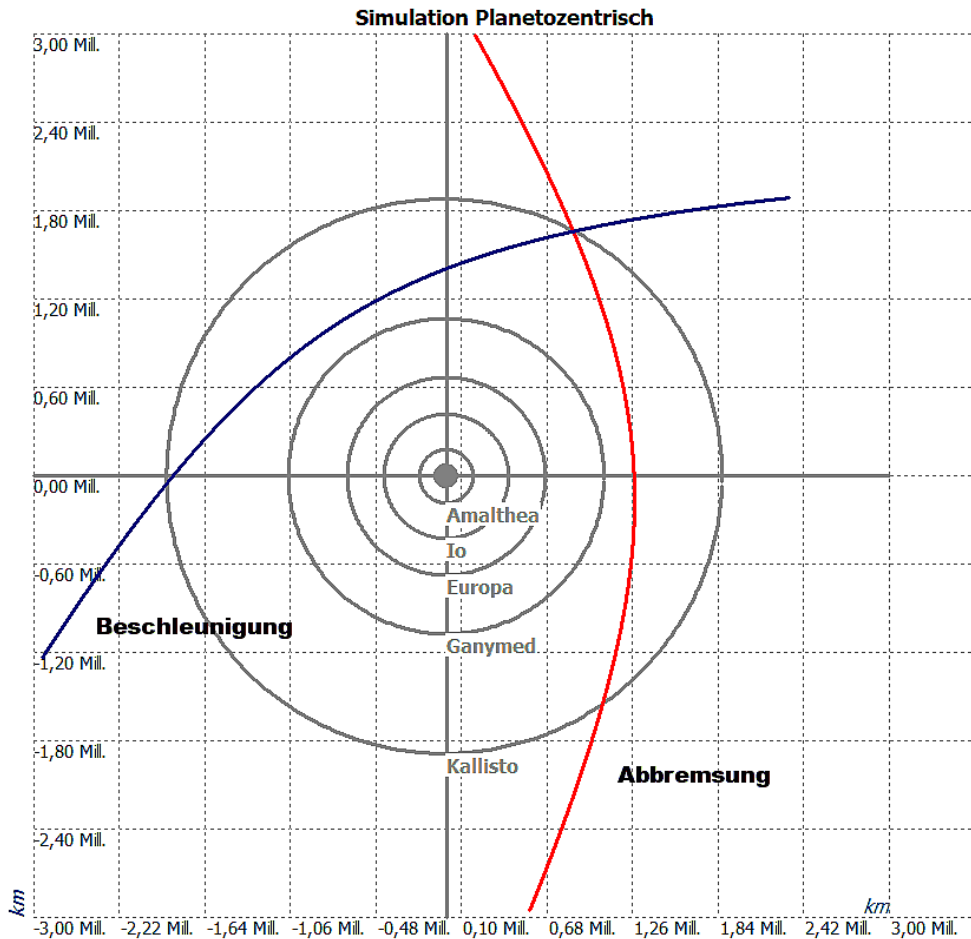


Abbildung 12: Swing-By: Bahnen bei Jupiter

Nur durch immer schnellere Computer ist es möglich, nicht nur einfache Swing-Bys, sondern auch komplexere Operationen zu berechnen. Bei Voyager 2 führte die Reise noch weiter zu Uranus und Neptun. Bei beiden Voyagersonden waren die Monde wichtige Untersuchungsobjekte. Sie mussten als Nebenbedingung in möglichst geringen Abständen oder an bestimmten Positionen passiert werden. Es gab also sehr viele Bahnen durchzurechnen.

Bei der Abbildung der Flugbahnen fällt der "Knick" jeweils nach dem Passieren eines Planeten auf. Außerdem verlaufen die Flugbahnen nach Jupiter fast gerade. Das ist ein Hinweis darauf, dass die Sonden durch den Vorbeiflug an Jupiter an Geschwindigkeit gewonnen haben, und nun das Sonnensystem auf hyperbolischen Bahnen verlassen.

Um die Vorgänge beim Swing-By zu verstehen, ist es sinnvoll, sie aus zwei Blickwinkeln zu betrachten. Zuerst aus der Sicht des Planeten. Hier tritt die Sonde mit einer Geschwindigkeit v in die Einflussosphäre des Planeten ein. Sie wird durch den Planeten beschleunigt, erreicht den planetennächsten Punkt und die maximale Geschwindigkeit. Wenn die Sonde den Planeten verlässt, baut sich die Geschwindigkeit wieder ab. Schließlich hat die Sonde wieder die Geschwindigkeit v , mit der sie den Planeten erreichte. Vom Planeten aus gesehen, hat die Sonde also nicht an Geschwindigkeit gewonnen oder verloren. Aber die Bahn wurde durch die Anziehungskraft gekrümmt.

Das ist vergleichbar mit einfachen Vorgängen auf der Erde. Nehmen wir das Ballspiel „Squash“. Dabei wird ein Ball mit einem Schläger an eine Wand geschlagen. Er prallt von dieser ab und verlässt sie mit derselben Geschwindigkeit und dem gleichen Winkel zur Senkrechten. Vom Planeten aus gesehen, ist ein Vorbeiflug vergleichbar mit Squash. Auch hier verlässt die Sonde den Planeten mit demselben Einfallswinkel. Das ist die „planetozentrische“ Sicht der Dinge.

Doch dies ist nur bei einem unbeweglichen Planeten so. Die Sonde befindet sich aber auf einer Sonnumlaufbahn. Und hier kommen zwei Dinge zum Tragen:

- Der Planet bewegt sich auch um die Sonne.
- Die Ein-/Austrittswinkel nach Verlassen der Einflussosphäre des Planeten unterscheiden sich in Bezug auf die Sonne, da noch der Geschwindigkeitsvektor des Planeten addiert wird.

Fangen wir mit dem Zweiten an. Wie gezeigt, krümmt der Planet die Bahn der Sonde, damit zeigt der Geschwindigkeitsvektor der Bahn (selbst wenn die Sonde keine Geschwindigkeit gewonnen hat) in eine andere Richtung. Dadurch verändert sich die Bahn der Sonde. Für jeden Planeten gibt es einen maximal möglichen Umlenkwinkel. Jupiter hat durch seine hohe Gravitationskraft, aber auch durch die geringe Ankunfts- geschwindigkeit von Sonden, die Fähigkeit, den Winkel selbst bei moderaten Abständen drastisch zu ändern. Der Effekt ist bei den Flugbahnen von Voyager an den Richtungs- änderungen nach den Planetenpassagen zu sehen.

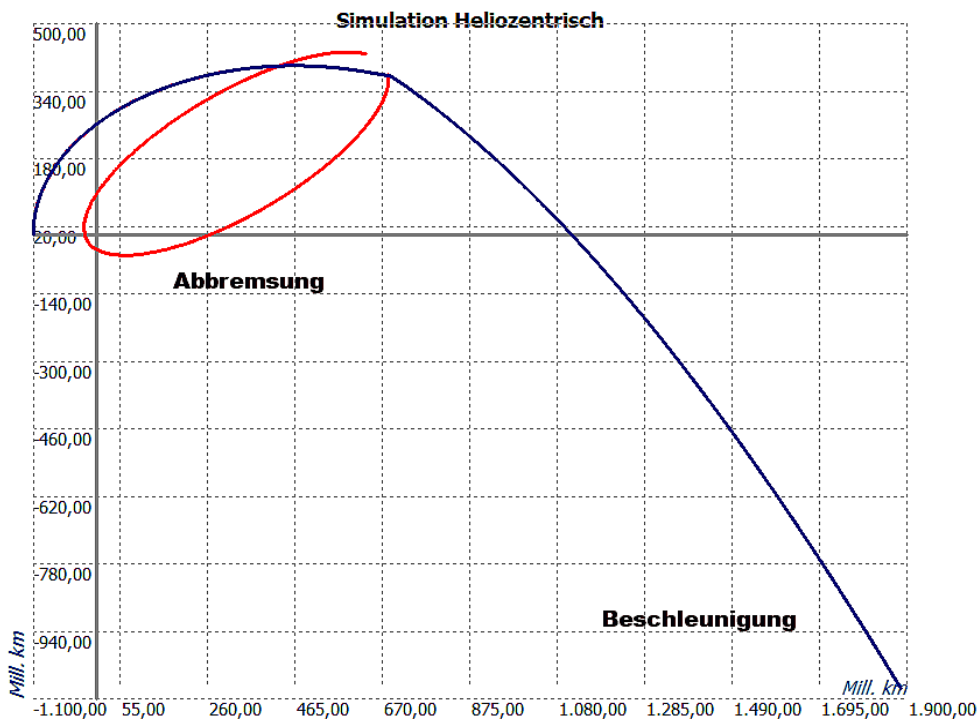


Abbildung 14: Swing-By: Bahnen um die Sonne

Der erste Punkt ist noch wichtiger. Die Sonde hat, wie der Planet, eine Relativgeschwindigkeit zur Sonne. Auch hier ein Vergleich mit einer irdischen Sportart: Tennis. Dort gibt es, anders als beim Squash, einen Gegenspieler. Der kann seinen Schläger auf den Ball zubewegen (und damit den Ball beschleunigen) oder von ihm wegbewegen (und den Ball verlangsamen). Genau das Gleiche macht der Planet: Er bewegt sich auf einer Sonnenumlaufbahn. Die Sonde kann sich ihm nähern (gegen seine Bewegungsrichtung) oder ihn von hinten einholen (in seiner Bewegungsrichtung). So weist die Sonde nach der Passage eine höhere oder niedrigere Geschwindigkeit relativ zur Sonne auf. Eine höhere Geschwindigkeit entspricht einer Beschleunigung – das Aphel, also der sonnennäheste Punkt der Bahn – wird angehoben. Überschreitet die Geschwindigkeit die solare Fluchtgeschwindigkeit, wird die Ellipse zur Hyperbel. So erging es den Pioniers und Voyagers. Bei einer Beschleunigung nähert sich die Sonde dem Planeten gegen seine Bewegungsrichtung von der Sonne beleuchteten Seite.

Eine niedrige Geschwindigkeit entspricht einer Abbremsung – das Perihel, also der sonnennäheste Punkt der Bahn – wird abgesenkt. Die Abbremsung kann bei Jupiter so weit gehen, dass die Sonde in die Sonne stürzt. Eine Abbremsung an der Venus wurde beim Vorbeiflug von Mariner 10 und den Merkursonden MESSENGER und BepiColombo durchgeführt. Dabei nähert sich die Sonde dem Planeten parallel zu seiner Bewegung „von hinten“ von der Nachtseite aus.

Die Grafiken zeigen die Auswirkungen. In beiden Fällen wurde eine Raumsonde zu Jupiter entsendet. Bei gleichen Bedingungen nähert sich je eine Sonde von hinten und eine von vorne. Die Sonde, die sich in der zweiten Grafik von links unten nach rechts oben bewegt, nähert sich dem Planeten in seiner Umlaufrichtung. Sie wird abgebremst. Die Sonde, die sich von oben rechts nach unten rechts bewegt, nähert sich gegen die Bewegungsrichtung. Sie wird beschleunigt. Der Vorbeiflugabstand ist in beiden Fällen der gleiche: 1,2 Millionen km von der Wolkengrenze entfernt. Die erste Grafik gibt die solaren Bahnen nach dem Swing-By wieder. Die Abbremsung führt zu einer Ellipse, deren sonnennähester Punkt unterhalb der Erdbahn (in rund 22 Millionen km Distanz) liegt. Dagegen führt die Beschleunigung dazu, dass die Sonde in einem hohen Bogen aus dem Sonnensystem herauskatapultiert wird. Bei beiden Kurven wird der durchlaufene Weg nach 2.000 Tagen angezeigt.

Die Grand Tour

Die folgende Tabelle informiert über einige der Startfenster, die für die Grand Tour zur Verfügung standen. Diese wollte das JPL für die TOPS-Sonden nutzen. Für Jupiter-Saturn-Uranus-Neptun gab es zwischen 1976 und 1980 in jedem Jahr eine Startmöglichkeit. Teilweise waren für die Missionen größere Kurskorrekturen nötig, um z. B. bei Saturn das Durchfliegen der Ringebene zu vermeiden. Für Jupiter-Saturn-Pluto gab es Startgelegenheiten von 1976 bis 1979 und für Jupiter-Uranus-Neptun lagen die Startfenster in den Jahren 1978 bis 1980.

Abflug von der Erde	Jupiter	Vorbeiflug bei Saturn	Vorbeiflug bei Uranus	Vorbeiflug bei Neptun	Pluto	Nächste Gelegenheit
September 1977	Feb. 1979	Sept. 1980	-	-	März 1986	2076
September 1977	Feb. 1979	Sept. 1980	Feb. 1984	Nov. 1986	-	2155
September 1977	März 1979	Juli 1981	-	-	Sept. 1986	2076
September 1977	Juni 1979	Nov. 1980	Sept. 1985	März 1989	-	2155
Oktober 1978	April 1980	-	Jan. 1985	Mai 1988	-	2155
November 1979	April 1981	-	Juli 1985	Nov. 1988	-	2155
November 1979	Juni 1981	-	Jan. 1986	Aug. 1989	-	2155

Bei TOPS waren 1977 eine Doppelmission über Jupiter – Saturn – Pluto und 1979 eine Doppelmission über Jupiter – Uranus – Neptun geplant. Die von Voyager 2 genommene Tour über Saturn zu Uranus und Neptun war nicht dabei. Die Tabelle erklärt warum. Die Route ohne Saturn ist kürzer: Obwohl die Sonde erst im November 1979 startet, kommt sie fünf Monate früher als Voyager 2 bei Neptun an. Der Weg über Saturn ist ein Umweg und er beschleunigt die Sonden nicht weiter. Um das Ausfallrisiko zu minimieren, wählte das JPL diese Bahnen, da die Reisezeit maximal neun Jahre betrug.

Die Jupiter – Saturn – Pluto Missionen sollten zum einen den Saturn untersuchen, der bei der späteren Doppelmission fehlte, zum anderen auch Pluto. Die Wahl von Pluto ist eine Option. Denn schon damals wussten die Missionsplaner, dass der Planet sehr klein ist. Es waren nicht viele Ergebnisse zu erwarten. Die Reisezeit zu Pluto ist lang. Für den Flug zu Pluto musste der Vorbeiflug an Saturn im Abstand von mindestens 500.000 km erfolgen. Dadurch konnten die inneren Monde (Mimas, Enceladus, Tethys, Dione) nicht nahe passiert werden. Auch Rhea kann nur in mittlerem Abstand passiert werden. Die

JSP Route erfordert nahe Vorbeiflüge an Jupiter. Doch bei Saturn gibt es keinerlei Bedeckungen von Sonne und/oder Erde. Hier war die Route von Voyager besser. Bei ihr wurden die inneren Monde passiert. Durch die Bedeckung gab es die Gelegenheit, sowohl die Ringe als auch die Atmosphäre von Saturn zu untersuchen.

Ein Problem der JSUN-Routen war, dass die Reisezeit schnell größer wurde. Passiert TOPS Saturn in 60.000 km Distanz, ergibt sich eine minimale Flugzeit von 11 $\frac{1}{2}$ Jahren. Allerdings plädierten die Missionsplaner für eine sichere Passage im Abstand von 130.000 km. Uranus wäre in 100.000 km Distanz passiert worden. Ab 1978 stieg zudem die Startenergie für JSUN an. Diese Route wählte das JPL für Voyager 2. Da TOPS per JUN schneller bei Uranus und Neptun war, wurde sie für TOPS nicht gewählt.

Für die nicht gestarteten Mariner 79 JUN Sonden (Jupiter-Uranus-Neptun) war das Startfenster im Oktober/November 1979 vorgesehen. Optimales Startdatum war der 27. Oktober 1979. Im Jahr 1978 hätten die Sonden Jupiter in nur 50.000 km Abstand passieren müssen, was eine hohe Strahlenbelastung bedeutet. Beim Start 1980 wären es dagegen 30 bis 40 Radian Abstand zu Jupiter gewesen. Das war außerhalb vom Orbit des äußersten galileischen Mondes Kallisto. 1979 konnte TOPS abhängig von der Startgeschwindigkeit die Distanz zwischen 8 bis 15 Jupiterradien wählen. Optimal wären 13 Jupiterradien (Entfernung von Ganymed) gewesen, weil es dann eine Bedeckung von Erde und Sonne durch Jupiter gab. Bei einem Start am 27.10.1979 hätte die Sonde Jupiter nach 20 Monaten passiert. Den Uranus hätte sie in 7,1 bis 7,2 Jahren erreicht. Die Passagedistanz lag bei sicheren 1 Million km Entfernung von den Wolken. Die Sonde hätte 830 bis 840 kg wiegen dürfen, damit mehr als Voyager.

Durch Kurskorrekturen kann die Missionskontrolle die Bahnen beeinflussen. Vor dem Start von Voyager 2 wurde als Passagetag von Saturn der 27.8.1981 angegeben, real flog sie einen Tag früher an dem Planeten vorbei. Uranus sollte am 30.1.1986 passiert werden, real war es der 24.1.1986. Bei Neptun erfolgte der Vorbeiflug nicht am 1.9.1989, sondern bereits am 25.8.1989.

Hier die Startfenster, die das JPL für drei mögliche Missionen selektiert hatte:

Mission	JSP 1976	JSP 1977	JUN 1979
Startfenster:	22.7. – 6.8.1976	26.8. – 10.9.1977	28.10. – 17.11.1979
Jupiter:	31.1.1978 (fest) 5.000 km Distanz, 5 Grad zum Äquator geneigt Amalthea: 32.000 km Io: 141.000 km Europa: 151.000 km Ganymed: 190.000 km	3.3.1979 (variabel) 250.000 km Distanz, 6 Grad zum Äquator geneigt.	16.4.1981 (fest) 343.000 km Distanz, 2 Grad zum Äquator geneigt Io: 19.200 km Europa: 137.000 km Ganymed: 228.000 km
Saturn	18.4.1980 (variabel) 479.000 km Distanz, 36 Grad zum Äquator geneigt.	13.11.1980 (fest) 556.000 km Distanz, 55 Grad zum Äquator geneigt. Titan: 428.000 km Hyperion: 46.000 km	
Pluto	15.4.1986 20.000 km Distanz. Erd- und Sonnenbedeckung.	4.10.1986 Pluto, 8.000 km Distanz. Erd- und Sonnenbedeckung.	
Uranus			19.5.1985 (variiert) 14.000 km Distanz, 83 Grad zum Äquator geneigt.
Neptun			23.7.1988 (variiert) 285.000 km Distanz 12.500 km Triton

Hier eine Zusammenfassung, wie sich das Startjahr auf die minimale Distanz auswirkt:

Mission	JSUN	JSP	JUN
1976	Jupiter: 50.000 km	Jupiter: 5.000 km	
1977	Jupiter: 700.000 km	Jupiter: 250.000 km	
1978	Jupiter: 1,8 Mill. km		Jupiter: 80.000 km
1979			Jupiter: 343.000 – 640.000 km
1980			Jupiter: 1,9 Mill. Km

Noch ein Wort zu den Distanzen. In Dokumenten für die wissenschaftliche Gemeinde werden immer die Minimaldistanzen zum Schwerkraftzentrum angegeben, für die Öffentlichkeit dann die Abstände zu der Oberfläche. Zum einen wird in Simulationen der Himmelskörper immer als punktförmige Masse angesehen, zum anderen ist der Durchmesser nicht genau bekannt. So werden oft aus geraden Abständen (die auch die Unsicherheit in der Navigation ausdrücken) sehr krumme Zahlen.

Der hyperbolische Exzess oder c_3

Die Größe c_3 gehört nicht direkt zum Swing-By. Doch da bei den Startfenstern zu den Planeten alle Angaben von Energien in der Größe c_3 sind, hier eine kleine Erklärung.

c_3 steht für charakteristische Energie. Eine Erklärung des Indexes 3 habe ich nicht gefunden. c_3 kann als eine Analogie zur ersten und zweiten kosmischen Geschwindigkeit (Orbitgeschwindigkeit = erste kosmische Geschwindigkeit, Fluchtgeschwindigkeit = zweite kosmische Geschwindigkeit) gesehen werden, aber es ist eine Energie.

c_3 ist nichts weiter als die kinetische Energie, die eine Sonde hat, wenn er von einem Himmelskörper gestartet ist und sich außerhalb dessen gravitativer Zone befindet. Bei einer Fluchtbahn ist c_3 definitionsgemäß = 0, bei einer Orbitalbahn negativ, nach dem Verlassen der Einflussphäre ist sie positiv.

Berechnet werden kann c_3 wie folgt:

$$c_3 = V^2 - V_{\text{flucht}}^2$$

v ist die Geschwindigkeit, welche die Sonde beim Himmelskörper hat. V_{flucht} ist die Fluchtgeschwindigkeit bei dem Punkt, wo sie Geschwindigkeit v hat.

Die Geschwindigkeiten werden in km/s angegeben. c_3 hat die Dimension km^2 / s^2 .

Beispiel: Pioneer 10 hatte beim Start eine Geschwindigkeit von 14,356 km/s. Die Fluchtgeschwindigkeit solle 11 km/s betragen:

$$c_3 = (14,356 \text{ km/s})^2 - (11 \text{ km/s})^2 = 85,09 \text{ km}^2 / \text{s}^2$$

Aus c_3 ist die Geschwindigkeit errechenbar, die ein Körper hat, wenn er die Gravitationsphäre verlässt, indem die Wurzel aus c_3 gezogen wird:

$$v_{\infty} = \sqrt{c_3}$$

im obigen Fall also

$$v_{\infty} = \sqrt{(85,09 \text{ km}^2/\text{s}^2)} = 9,22 \text{ km/s}$$

Relativ zur Erde bewegt sich Pioneer 10 mit 9,22 km/s, wenn sie die Einflussosphäre der Erde verlassen hat.

Die Bedeutung von c_3 ist mit beiden Formeln umrissen. Für jedes Startfenster zu einem Planeten gibt es ein minimales c_3 , damit eine Sonde den Planeten erreichen kann. Bei Mars liegt es je nach Planetenkonstellation zwischen 7,5 und 15,3 km^2/s^2 . Daraus kann dann die Startgeschwindigkeit errechnet werden. Bei einer Fluchtgeschwindigkeit von 11 km/s sind dies 11,344 ($c=7,5 \text{ km}^2/\text{s}^2$) bis 11,679 km/s ($c=15,3 \text{ km}^2/\text{s}^2$).

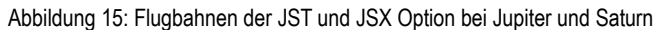
Der aufmerksame Leser wird sich fragen, warum nicht gleich mit den Geschwindigkeiten gerechnet wird. Schließlich ist das die Vorgabe, die eine Rakete erreichen muss. Der Grund ist, dass die Fluchtgeschwindigkeit variabel ist. Sie nimmt mit steigender Erdentfernung ab. Sobald aber eine Sonde mehr als die Kreisbahngeschwindigkeit hat, wird sie sich von der Erde durch die überschüssige Geschwindigkeit entfernen. Das heißt, die Rakete hat Brennschluss in einer größeren Entfernung, in der die Fluchtgeschwindigkeit kleiner ist. Bei Voyager war dies in 1.219 km Distanz der Fall. In 1.219 km Entfernung beträgt die Fluchtgeschwindigkeit 10.243 m/s. Es resultiert bei gleicher Endgeschwindigkeit ein anderes c_3 als in 200 km Orbithöhe (Fluchtgeschwindigkeit 11 km/s).

Die Geschwindigkeit nach Verlassen der Einflussosphäre wird zu der Geschwindigkeit der Erde um die Sonne addiert bzw. subtrahiert. Daraus resultiert die neue Sonnenumlaufbahn. Im Falle von Pioneer 10 wurde die Geschwindigkeit addiert, das führte zu einer Ellipse, die bis in 911 Millionen km Entfernung von der Sonne führt. Das war jenseits der Jupiterumlaufbahn, die in 778 Millionen km Distanz zur Sonne verläuft.

Die Tatsache, das Pioneer 10 zum Erreichen dieser Bahn nicht 9,5 km/s + 11 km/s, also 20,5 km/s, aufbringen musste, sondern nur 14,356 km/s, ist der **hyperbolische Exzess**. Das Schöne am hyperbolischen Exzess ist, das wir die Planeten viel einfacher erreichen können. Um zu Venus oder Mars zu gelangen, muss die Geschwindigkeit um die Sonne um 3 bis 4 km/s geändert werden. Doch dank der Physik sind nun nur noch 0,4 bis 0,6 km/s zusätzlich zur Fluchtgeschwindigkeit nötig. Bei Jupiter benötigt eine Son-

Mit derselben Formel ist die Geschwindigkeit errechenbar, die ein Körper hat, wenn er das Sonnensystem verlässt. Beim Sonnensystem liegt die Fluchtgeschwindigkeit von der Erdbahn bei 16,6 km/s. Würde die Sonde auf 17 km/s beschleunigen, so hätte die Sonde in großer Entfernung von der Sonne noch eine Geschwindigkeit von 3,66 km/s.

Flandros Berechnungen der Grand Tour erforderten je nach Ziel ein c_3 100 km²/s² bis 120 km²/s². Für die Planungen von TOPS legte das JPL als Obergrenze für die maximale Nutzlast ein c_3 von 110 km²/s² fest, das sind 217 m/s mehr als Voyager 1 an Geschwindigkeit hatte.



Die richtige Planetenkonstellation

Für die Flüge von der Erde zu den Planeten gibt es Startfenster, die sich regelmäßig wiederholen. Diese liegen bei 365 bis 400 Tagen für die äußeren Planeten ab Jupiter. Für die inneren Planeten liegt der Abstand bei 115 Tagen für den Merkur, 584 Tagen für die Venus und 730 Tagen für den Mars.

Die Startfenster können bei gleicher Konstellation, also relativer Position zueinander nach folgender Formel berechnet werden:

$$\frac{1}{\text{Periode}} = \left(\frac{1}{\text{Periode1}} \right) - \left(\frac{1}{\text{Periode2}} \right)$$

Damit lässt sich errechnen, dass sich ein Startfenster von der Erde zu Jupiter (Umlaufzeit 11 Jahre 315 Tage) alle 399 Tage wiederholt.

Will eine Sonde mehrere Planeten nacheinander anfliegen, dann müssen die Erde, sowie alle Planeten in der richtigen Position zueinander stehen. Dann ist die obige Formel nicht mehr anwendbar. Die Abstände zwischen den passenden Startfenstern sind lang. Doch das fällt in der Praxis nicht ins Gewicht. Denn jeder Planet kann die Sonde umlenken, zu einer variablen Position des nächsten Zieles schicken.

Bei den Voyager Missionen wurde immer wieder betont, dass sich die Konstellation nur alle 176 Jahre wiederholt. Gerne auch mit dem Hinweis, das die letzte Gelegenheit im Jahre 1801 bestand, als in Europa noch absolutistische Herrscher regierten und Segelschiffe die schnellsten Verkehrsmittel waren. Aber wie kommt es zu dieser Angabe?

Da die Erde das nächste Startfenster zu Jupiter in 13 Monaten erreicht, spielt ihre Periode keine Rolle. In den 399 Tage hat sich Jupiter nur um 30 Grad weiter bewegt. Er kann die Sonde leicht um einen viel größeren Winkel umlenken. Für Zwei-Planeten-Touren sind die Perioden mit obiger Formel berechenbar:

Planet 1 / Planet 2	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun	Pluto
Jupiter		21,5 Jahre	13,8 Jahre	12,8 Jahre	12,5 Jahre
Saturn	21,5 Jahre		44,3 Jahre	34,7 Jahre	32,8 Jahre
Uranus	13,8 Jahre	44,3 Jahre		175 Jahre	127 Jahre
Neptun	12,8 Jahre	34,7 Jahre	175 Jahre		493 Jahre
Pluto	12,5 Jahre	32,8 Jahre	127 Jahre	493 Jahre	

Flüge über Jupiter zu einem weiteren Planeten sind also weitaus häufiger möglich. Die längste Periode hat Jupiter mit Saturn. Das nächste Startfenster zu Saturn gab es 1999. Es wurde von Cassini genutzt. 2031/32 soll das nächste Startfenster über Jupiter zu Uranus für einen Uranusorbiter genutzt werden, 2037/38 das zu Neptun ebenfalls.

Das gemeinsame Startfenster von Jupiter und Saturn entspricht gerade ein Viertel der Umlaufdauer von Uranus und ein Neuntel der Periode von Neptun. Es gäbe also für die Routen Jupiter-Saturn-Uranus, Jupiter-Saturn-Neptun und Jupiter-Saturn-Pluto jeweils Startfenster nach einem Umlauf der Planeten, also von 84 bis 248 Jahren. Neptun und Pluto bewegen sich in den 20 Jahren zwischen zwei Startfenstern sehr wenig. Bei Inkaufnahme einer längeren Reisezeit kann Saturn ein Startfenster nach Voyager (1999) eine Sonde zu Neptun schicken. Uranus dagegen hat sich in 21 Jahren um 90 Grad weiter bewegt. Eine so starke Ablenkung wäre nur bei einer sehr nahen Saturnpassage möglich, die wegen der Kollisionsgefahr mit Ringteilchen ausgeschlossen ist.

Für die Viererpassage Jupiter-Saturn-Uranus-Neptun sind die Perioden von Jupiter und Saturn vernachlässigbar. Sie sind viel kleiner als die Umlaufzeiten der beiden äußeren Planeten. Außerdem können die beiden Planeten die Sonden noch umlenken. Dann resultiert als Lösung mit obiger Formel die gemeinsame Periode von Uranus und Neptun, die erwähnten 176 Jahre.

Innerhalb dieser Periode gibt es ein Zeitfenster von zwei bis drei Jahren, in denen Jupiter eine Sonde zu den Planeten schicken kann. Es öffnet sich, sobald der Planet durch Beschleunigung erreichbar ist – das erste Startfenster erfordert eine starke Umlenkung. Sie ist verbunden mit einer großen Annäherung an Jupiter. Bei den folgenden Startfenstern muss Jupiter die Sonde in einem immer kleineren Winkel umlenken. Entsprechend steigt der Abstand und gleichzeitig sinkt die Beschleunigung. Die Sonde braucht dann immer länger, um das Ziel zu erreichen. Bei der Grand Tour gab es für alle Flüge

Startfenster von drei Jahren Dauer, die sich – je nach Route – von 1976 bis 1980 erstreckten. Das mittlere Startfenster war dabei das günstigste. Für die Plutosonden, die ab 2003 starten resultierten folgende Startfenster über Jupiter:

Startdatum	Reisezeit	Startgeschwindigkeit	jupiternächster Punkt
November 2003	8 Jahre	15,757 km/s	142.800 km
Dezember 2004	8 Jahre	16,024 km/s	585.000 km
Januar 2006	9 Jahre	16,90 km/s	2.300.000 km
Februar 2007	13 Jahre	17,00 km/s	Kein Flug über Jupiter mehr möglich

Ein Startfenster zu Jupiter gibt es alle 13 Monate. Das erste Startfenster offeriert die geringste Startgeschwindigkeit von der Erde aus. Es bringt aber keine Vorteile bei der Reisedauer und erfordert eine starke Annäherung an Jupiter. Mit der geringen Distanz ist eine hohe Strahlenbelastung verbunden. Das zweite Startfenster ist das Optimum. Es erfordert nur eine geringfügig höhere Startgeschwindigkeit und die Sonde ist genauso schnell bei Pluto. Außerdem muss die Sonde sich Jupiter nur bis auf die Entfernung des Mondes Europa nähern, was deutlich gefahrloser ist. Dieses Startfenster war für die Sonde Pluto-Kuiper-Express vorgesehen, die dann aber gestrichen wurde. Das dritte Startfenster wurde von der Raumsonde New Horizons genutzt. Sie entstand als Alternative für Pluto-Kuiper-Express, wurde aber für das 2004-er Startfenster nicht rechtzeitig fertig. Das letzte Startfenster war ein Backup für New Horizons. 2007 konnte Jupiter die Sonde nicht mehr beschleunigen. Das verlängerte die Mission um vier Jahre.

Mittlerweile dominieren Swing-By an der Erde, wie die nachfolgende Tabelle zeigt. Bei Erdvorbeiflügen führt der Start die Sonde auf eine Bahn, die dieselbe Umlaufszeit wie die Erde hat. Ein Jahr nach dem Start passiert die Sonde die Erde erneut, wobei ihre Bahn verändert wird. Das Swing-By an der Erde wird häufig genutzt, um bei Missionen zu Kleinplaneten die Bahnneigung anzupassen. Für eine Anpassung der Inklination (Bahnneigung) benötigt der Roboter bei der hohen Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne (fast 30 km/s) viel Energie. Bereits bei einer Änderung um 5 Grad muss die Sondengeschwindigkeit um 2,6 km/s verändert werden. Eine große Veränderung der Bahnneigung – der Rekord liegt bei 80 Grad für die Raumsonde Ulysses – geht nur mit der Gravitationskraft von Jupiter. Das Paradebeispiel für Erdvorbeiflüge ist die Raumsonde Stardust: Nach dem Start am 15.1.1999 passierte sie – immer am 15.1. – die Erde dreimal, in den Jahren 2001, 2006 und 2009.

Die folgende Tabelle enthält alle Raumsonden, die bisher Vorbeiflüge zur Kurskorrektur durchgeführt haben. Dabei können die Planeten auch erkundet werden. Reine Vorbeiflüge ausschließlich zur Erforschung (wie Voyager 1 bei Saturn und Voyager 2 bei Neptun) sind nicht aufgeführt.

Derzeit hält die ESA den Rekord an Vorbeiflügen. Die Raumsonde BepiColombo passiert einmal die Erde, zweimal die Venus und sechsmal Merkur, bevor sie schließlich in einen Orbit um Merkur einschwenkt. Der Solar Orbiter, eine Gemeinschaftsmission von ESA und NASA, passiert zuerst zweimal die Venus und dann die Erde, um den sonnennächsten Punkt abzusenken. Sechs weitere Vorbeiflüge an der Venus erhöhen sukzessive die Bahnneigung auf bis zu 33 Grad. Beim Start lag sie bei 1,9 Grad. Teilweise stehen die Passagedistanzen bei Drucklegung noch nicht fest.

Raumsonde	Start	Vorbeiflug 1	Vorbeiflug 2	Vorbeiflug 3	Vorbeiflug 4
Mariner 10	3.11.1973	5.2.1973 Venus in 4.790 km	29.3.1974 Merkur in 327 km	21.9.1974 Merkur in 48.069 km	
Pioneer 11	6.4.1974	2.12.1974 Jupiter in 42.750 km			
Voyager 2	20.8.1979	9.7.1979 Jupiter in 643.000 km	26.8.1981 Saturn in 124.420 km	24.1.1986 Uranus in 81.155 km	
Voyager 1	5.9.1979	5.3.1979 Jupiter in 278.000 km			
Giotto	2.7.1985	Erde am 2.7.1990 in 22.730 km			
Galileo	18.10.1989	2.9.1190 Venus in 16.103 km	8.12.1990 Erde in 961 km	8.12.1992 Erde in 303 km	
NEAR	17.2.1996	23.1.1998 Erde in 540 km			
Cassini-Huygens	15.10.1997	26.4.1998 Venus in 287 km	24.6.1999 Venus in 603 km	18.8.1999 Erde in 1.170 km	31.12.2000 Jupiter in 9,72 Mill. km
Nozomi	3.7.1998	21.12.2002 Erde in 29.451 km	19.6.2003 Erde in 11.023 km		
Stardust	15.1.1999	15.1.2001 Erde in 6.008 km	15.1.2006 Erde in 258 km	15.1.2009 Erde in 9.200 km	
Hayabusa	9.5.2003	19.5.2005 Erde in 3.700 km			
Rosetta	2.3.2004	4.3.2005 Erde in 1.950 km	25.2.2007 Mars in 250 km	13.11.2007 Erde in 5.300 km	13.11.2009 Erde in 2.480 km

Raumsonde	Start	Vorbeiflug 1	Vorbeiflug 2	Vorbeiflug 3	Vorbeiflug 4
Messenger	3.8.2004	3.8.2005 Erde in 2.347 km	24.10.2006 Venus in 2.987 km	4.6.2007 Venus in 338 km	14.1.2008 Merkur in 201 km
		6.10.2008 Merkur in 188 km	2.9.2009 Merkur in 227 km		
Deep Impact	12.1.2005	31.12.2007 Erde in 15.586 km			
New Horizons	19.1.2006	28.2.2007 Jupiter in 2,27 Mill. km			
Dawn	27.9.2007	18.2.2009 Mars in 543 km			
Juno	5.8.2011	9.10.2013 Erde in 500 km			
Hayabusa 2	3.12.2014	3.12.2015 Erde in 3.090 km			
OSIRIS-Rex	8.2.2015	22.8.2017 Erde in 17.837 km			
Parker Solar Probe	6.8.2018	3.10.2018 Venus in 2.548 km	26.12.2019 Venus in 3.023 km	11.7.2020 Venus in 834 km	20.2.2021 Venus in 2392 km
		16.10.2021 Venus in 3.785 km	21.8.2023 Venus in 3.939 km	6.10.2024 Venus in 324 km	
BepiColombo	20.10.2018	10.4.2020 Erde in 12677 km	15.10.2020 Venus in 10.543 km	10.8.2021 Venus in 552 km	1.10.2021 Merkur in 199 km
		23.6.2022 Merkur in 200 km	20.3.2023 Merkur in 200 km	5.9.2024 Merkur in 200 km	5.12.2023 Merkur in 40.000 km
		9.1.2025 Merkur in 340 km			
Solar Orbiter	10.2.2020	27.12.2020 Venus in 7.500 km	9.8.2020 Venus in 7.995 km	26.12.2020 Erde in 460 km	4.9.2022 Venus in 6.420 km
		18.2.2025 Venus	24.12.2026 Venus	17.3.2028 Venus	10.6.2029 Venus
		2.9.2030 Venus			
Lucy	16.10.2021	16.10.2022 Erde in 300 km	13.12.2024 Erde in 350 km	26.12.2030 Erde in 660 km	

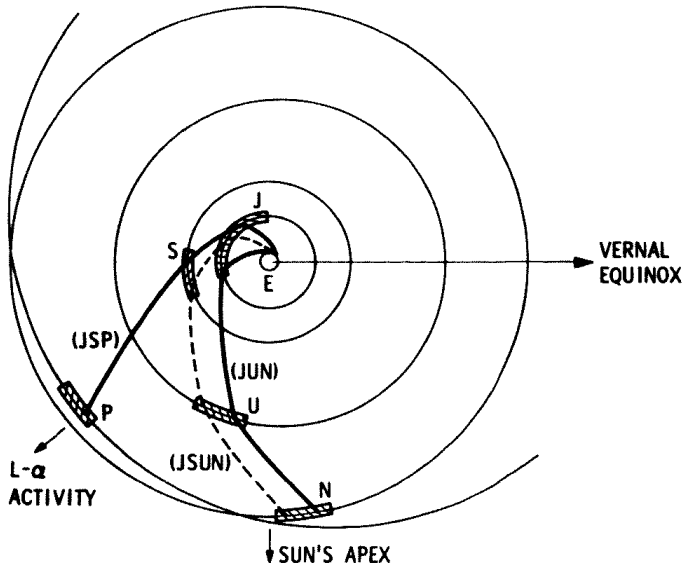


Abbildung 16: Bahnen für die TOPS Sonden

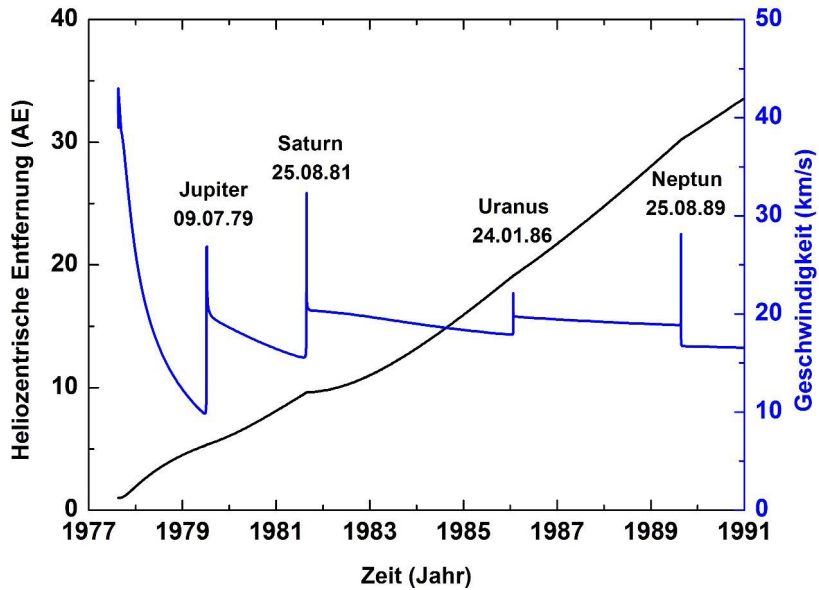


Abbildung 17: Geschwindigkeitsänderung bei Voyager durch Swing-By und zurückgelegte Distanz

Die Bahnauswahl für Voyager

Die Startfenster für die „Grand Tour“ wurden schon erwähnt. Doch Voyager sollte nur bis zum Saturn fliegen. Also wurden neue Routen gesucht.

Startfenster über Jupiter zu Saturn gab es in den Jahren 1976 bis 1979. Die optimale, also kürzeste Bahn, hätte es bei einem Start im September 1978 gegeben. Das JPL entschloss sich für den Start 1977, um eine zweite Chance zu haben, falls die Sonden das 1977-er Startfenster verpassen. Außerdem bot das 1977 Startfenster die besten Beobachtungsmöglichkeiten für die Galileischen Monde. Für eine Mission Jupiter-Saturn-Pluto wäre das 1976-er Startfenster am günstigsten gewesen. Das 1979-er Startfenster dagegen war für einen Flug Jupiter-Pluto oder Jupiter-Uranus-Neptun am besten geeignet. Doch diese Möglichkeiten schieden für Voyager aus, da beide Sonden Saturn passieren sollten. Die Route Jupiter-Saturn-Pluto fiel weg, weil sie keine Bedeckung von Sonne und Erde durch den Saturn bot. Zudem lag die Vorbeiflughöhe bei rund 500.000 km, damit konnten die inneren Monde nicht erkundet werden.

Untersucht wurden 10.000 mögliche Flugbahnen. Das waren die Trajektorien, die mit der von der Titan III-E gelieferten Startenergie erreichbar waren. Nun begann der Ausleseprozess. Alle Bahnen, die nicht den wissenschaftlichen Anforderungen genügten, wurden aussortiert. Es blieben 103 Bahnen übrig. Diese Bahnen ergaben bei zwei Sonden 2.624 Kombinationen mit den Missionszielen. Sie hatten ein Startfenster von mindestens elf Tagen Dauer. Ihre Ankunftszeit bei Jupiter variierte um einige Tage. Die Ankunft der Sonden bei Saturn lag zwischen November 1980 bis September 1982.

Diese 103 Bahnen wurden weiter nach verschiedenen Kriterien eingeschränkt. Das waren unter anderem Startfenster, Treibstoffverbrauch bei Mitkurskorrekturen, Distanz beim Erreichen der Planeten, Stellung der Planeten zur Erde, wissenschaftliche Zielsetzung, Annäherung an Jupiter und an die Saturnringe. Dazu kamen zahlreiche andere Anforderungen. So sollte zwischen der Ankunft der Sonden bei Jupiter mindestens ein Monat und bei Saturn fünf Monate liegen, um die Missionskontrolle nicht zu überlasten. Andererseits war ein zu großer zeitlicher Abstand zwischen den Vorbeiflügen nicht erwünscht, weil das die Kosten nach oben treiben würde. Es kamen Selektionsfaktoren dazu, die nicht auf den Planeten beruhten, so z. B. die Startfenster – die Bodencrew

musste zwischen den beiden Starts genügend Zeit haben, die Titan III E der zweiten Sonde auf den Start vorzubereiten. Für die erste Sonde, die Io und Titan passieren sollte, gab es Startfenster alle sechs Tage zu Io und 16 Tage zu Titan. Jede Bahn musste Jupiter genau sechs Tage vor oder nach einer anderen Bahn erreichen und Saturn 16 Tage vor oder nach einer anderen Bahn. So kamen die Mathematiker schließlich auf die endgültigen Bahnen. Ursprünglich sollte Voyager 1 genau 12 Tage, also zwei Umläufe von Io, nach Voyager 2 starten. Als sich der Start um drei Tage verspätete, musste die Sonde eine schnellere Bahn einschlagen.

Schließlich wurden 24 Paare selektiert, die dann um 12 weitere Paare ergänzt wurden, die fast alle Kriterien erfüllten. Nun waren die Wissenschaftler dran. Von diesen Paaren wurden vier von den Experimentalkteams als „uninteressant“ ausgeselektiert. Im zweiten Schritt wurden die 32 Trajektorien genauer untersucht, wobei die Experimentatoren ihre Präferenzen äußern konnten. Jedes Wissenschaftsteam vergab einen Index für jede Trajektorie, der zwischen 0 und 1 lag. Der Durchschnitt lag zwischen 0,101 und 0,800 für die Kandidaten.

Es zeigten sich enorme Unterschiede. Einige Teams waren extrem konservativ. Sie wollten auf Nummer sicher gehen, dass ihre Experimente bei Uranus noch betrieben werden könnten. Trajektoriepaar Nr. 25 z. B. hatte Rang Nr. 1 beim PRA und CRS Team, aber nur Rang 28,5 beim ISS-Team. Die Bewertungen waren sehr unterschiedlich. Beim IRIS Team hatte die schlechteste Trajektorie einen Index von 0,75 und beim PRA Team einen Index von 0,101. So wurden die Bewertungen auf den gleichen Bereich normiert, um sie vergleichen zu können. Die beiden besten Bahnen waren Bahn Nr. 31 (0,822) und Nr. 29 (0,797). Das gab ein Problem mit dem RSS-Team. Das hatte 24 der 32 Trajektorien als „am wenigsten bevorzugt“ eingestuft. Darunter waren die Paare 29 und 31.

Am 2. und 23. Oktober 1973 trafen sich erstmals die Verantwortlichen für die Experimente mit Vertretern des JPL, um die finalen Flugbahnen zu selektieren. Es zeigte sich, dass die Bahnen 31/29 trotz des höchsten Gesamtrankings nicht ausgewählt werden konnten. Für ISS-Team war 29 nicht tragbar, aber 31 und 26. Für das CRS-Team war die Kombination von 26 und 31 auch akzeptabel. Das RSS-Team war für 26 anstatt 31, da es eine Ringbedeckung gab. So wurde Nr. 26 ausgewählt, obwohl sie ursprünglich nur auf Platz 3 lag.

Es gab folgende Forderungen an den Flugplan:

- Neben der Erkundung sollte es nahe Vorbeiflüge an Io und Titan geben. Zwei Monde, die Wissenschaftler als interessant einstufen. Sie waren genauso wichtige Ziele wie die Planeten selbst.
- Beide Sonden sollten möglichst alle größeren Monde gut beobachten können.
- Es sollte eine erweiterte Mission zu Uranus und Neptun möglich sein.

Formell wurden schließlich folgende Ziele aufgestellt:

- Passage der magnetischen Verbindung zwischen Io und Jupiter, verbunden mit einer Passage von Io in einer Distanz unter 40.000 km.
- Passage eines zweiten galileischen Mondes in einer Distanz unter 50.000 km.
- Bedeckung der Raumsonde durch Jupiter sowohl in Bezug auf die Sonne als auch auf die Erde (Aufnahmen der Nachtseite, Durchleuchtung der Atmosphäre mit dem Radio Science Experiment)
- Vorbeiflug an Titan in weniger als 50.000 km Entfernung und Bedeckung von Sonne und Erde durch Titan. Aufnahmen durch ISS und RSS-Wissenschaft.
- Annäherung an mehrere Monde des Saturn auf ungefähr 100.000 km
- Bedeckung der Raumsonde durch Saturn sowohl in Bezug auf die Sonne wie auch auf die Erde.
- Bedeckung der Raumsonde durch die Saturnringe sowohl in Bezug auf die Sonne wie auf die Erde.

Diese Anforderungen führten dazu, dass Voyager 1 die primären Missionsziele erfüllen sollte (Io Vorbeiflug, Titanvorbeiflug, erste Passage an beiden Planeten). Voyager 2 fungierte als Backup, welches die „Kür“ erledigte (nahe Passagen an den übrigen Monden). Für Voyager 2 blieb so die Möglichkeit, sie zu Uranus weiterzusenden. Die Genehmigung für den Weiterflug zu Uranus bekam das Team erst im März 1977, wenige Monate vor dem Start. Es war noch keine endgültige Genehmigung, aber das JPL durfte die Möglichkeit nun kommunizieren. Die Chance, dass die Sonde Uranus funktionsfähig erreicht, wurde kurz vor dem Saturn-Vorbeiflug auf 65 Prozent geschätzt. Dass die Sonde bei Neptun noch funktionieren könnte, schätzten Techniker auf 40 Prozent. Bis zur Passage von Saturn war Voyager 2 immer als Back-up vorgesehen – wäre Voyager 1 ausge-

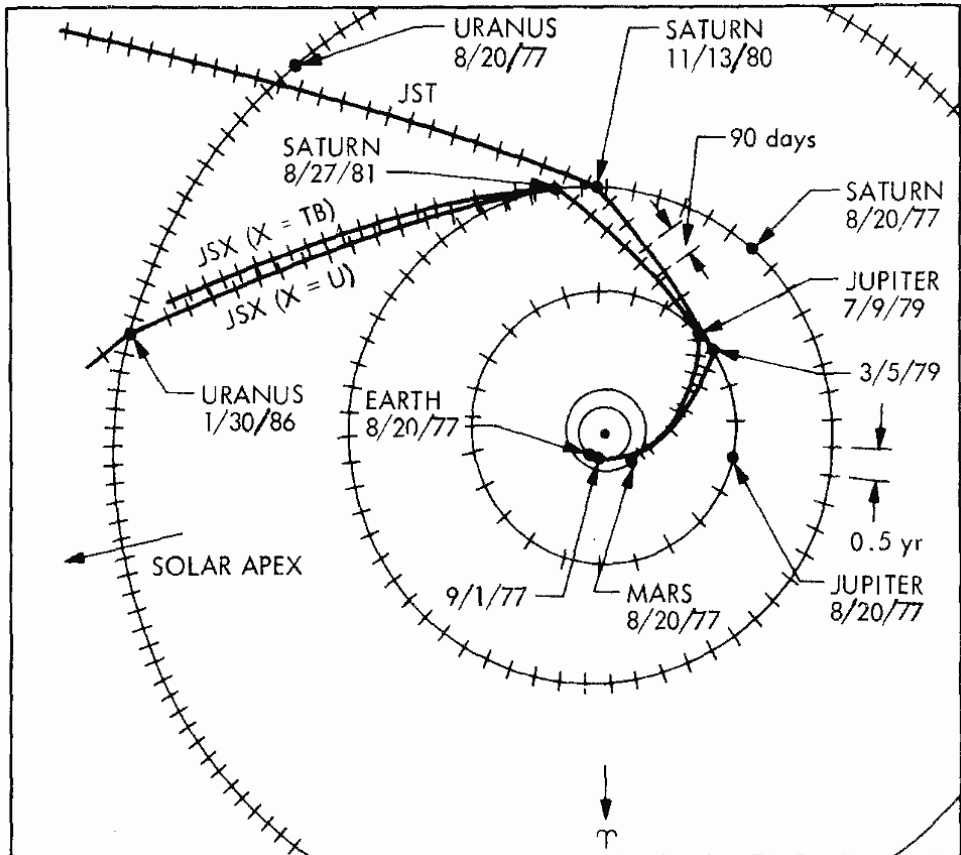


Abbildung 18: Die Bahnen von Voyager mit der JSX-Backupvariante

fallen, hätte Voyager 2 die Bahn mit dem internen Treibstoff so verändert, dass die Sonde Io bzw. Titan nahe passieren kann.

Damit Voyager 2 zu Uranus weiterfliegen durfte, musste Voyager 1 ihre Mission beendet haben. Außerdem durfte Voyager 2 bis Anfang 1981 keine Ausfälle haben. Denn zu diesem Zeitpunkt musste Voyager 2 die entscheidende Kurskorrektur durchführen. Die Uranus-Option schloss einen Vorbeiflug an Titan aus, ebenso eine Bedeckung der Erde durch die Ringe. Daher musste Voyager 1 die Titan-Route nehmen. Die Passage von Titan vor der größten Annäherung an Saturn würde die Sonde unweigerlich aus der Ekliptik herauskatapultieren. Damit war die Begegnung von weiteren Planeten unmöglich.

Es wurden zwei Routen festgelegt, genannt JST und JSX. Voyager 1 würde JST fliegen – Jupiter-Saturn-Titan. Bei Voyager 2 war die Route offen, wie das „X“ zeigte. Es konnte ein JST oder auch JSU werden – Jupiter-Saturn-Uranus.

Die Funktion als Backup für Voyager 1 führte dazu, dass Voyager 2 einen längeren Weg zurücklegen musste als die Grand-Tour Sonden. Sie braucht drei Jahre länger, um Neptun zu erreichen. Trotz zwei weiterer Swing-Bys ist Voyager 2 bis heute langsamer unterwegs als ihre Schwester. Voyager 1 passierte Jupiter in deutlich geringerer Entfernung und wurde viel stärker beschleunigt.

Die Flugbahnen waren so abgestimmt, dass Voyager 2 Jupiter vier Monate nach Voyager 1 erreichte. Das Messprogramm von Voyager 2 begann, als das von Voyager 1 endete. Da Voyager 2 auf einer langsameren Bahn flog, ergab sich der Widerspruch in der Namensgebung. Schließlich wurde Voyager 2 vor ihrer Schwestersonde gestartet. Voyager 1 musste Jupiter vor dem 4.4.1979 erreichen, um Io nahe passieren zu können. Eine Io-Passage wird mit einer Annäherung auf 4,6 bis 6 Jupiterradien erlaubt. Voyager 1 wür-

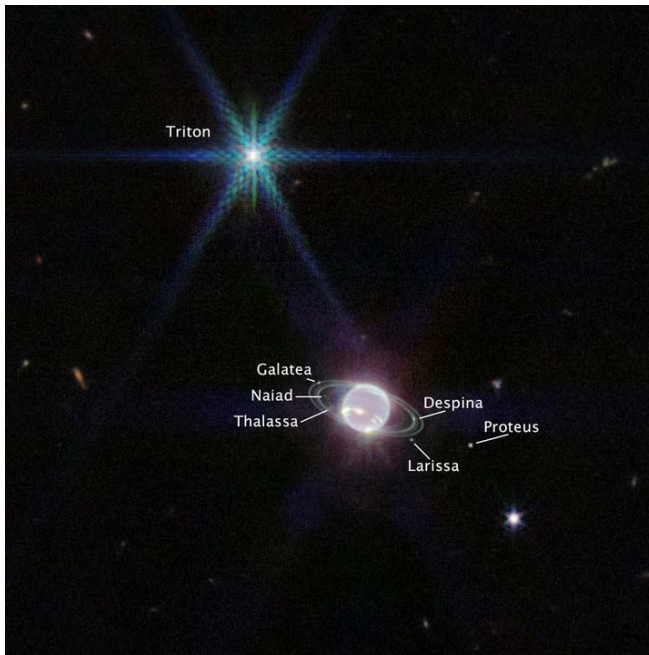


Abbildung 19: Aufnahme von Neptun mit dem JWST im roten und nahen IR

de daher eine höhere Strahlendosis erhalten. Andererseits musste Voyager 2 Jupiter nach dem 15.6.1979 erreichen. Eine frühere Passage hätte keinen Flug zum Uranus zugelassen. Vor dem 15.6.1979 hätte eine Raumsonde die Saturnringe passieren müssen, um zum Uranus umgelenkt zu werden. Für den Weiterflug zu Uranus durfte sich die Sonde Jupiter nur moderat nähern (auf 8 bis 10 Jupiterradien), damit sie nicht zu stark beschleunigt wird. Bei einem Ausfall von Voyager 1 nach

der Jupiterpassage hätte Voyager 2 mit dem eigenen Treibstoff bis auf 15.000 km an Titan herankommen können. Die folgende Tabelle informiert über die geplanten Bahnen der Sonden vor dem Start.

Trajektorie	Jupiter-Saturn-Titan	Jupiter-Saturn-Uranus	Jupiter-Saturn-Titan Back-up
Startdatum:	1.9.1977	20.8.1977	20.8.1977
Jupiter Ankunft:	5.3.1979	9.7.1979	9.7.1979
Minimaldistanz Jupiter:	278.460 km	642.600 km	642.600 km
Annäherung an Amalthea:	440.000 km	550.000 km	550.000 km
Annäherung an Io:	22.000 km		
Annäherung an Europa:	733.000 km	201.000 km	201.000 km
Annäherung an Ganymed:	115.000 km	55.000 km	55.000 km
Annäherung an Kallisto:	124.000 km	220.000 km	220.000 km
Korrektur nach Jupitervorbeiflug:	100 m/s	60 m/s	60 m/s
Ankunft Saturn:	13.11.1980	27.8.1981	27.8.1981
Minimaldistanz Saturn:	138.000 km	102.560 km	138.760 km
Annäherung an Hyperion:	869.000 km	-	889.000 km
Annäherung an Titan:	4.000 km	353.000 km	15.000 km
Annäherung an Rhea:	59.000 km	254.000 km	199.000 km
Annäherung an Dione:	139.000 km	196.000 km	91.000 km
Annäherung an Tethys:	414.000 km	159.000 km	150.000 km
Annäherung an Enceladus:	229.000 km	94.000 km	102.000 km
Annäherung an Mimas:	96.000 km	33.000 km	150.000 km
Ringebene durchstoßen	362.000 km	114.630 km	281.330 km

Dieser Flugplan stimmt mit den realen Trajektorien bei Jupiter noch überein. Doch am Saturn gab es bei Voyager 2 bereits Unterschiede in den Passagedistanzen der Monde. Sie unterschieden sich um 20.000 bis 30.000 km von den Planungen. Für Voyager 2 wurde eine neue Flugbahn ausgearbeitet, da es bei der ursprünglichen Trajektorie keine Sternbedeckung durch die Ringe gab. Dabei wollten die Wissenschaftler mit dem PPS die Ringzahl bestimmen.

Die Erforschung der äußeren Planeten vor der Raumfahrt

Die Planeten Jupiter und Saturn sind seit dem Altertum bekannt. Uranus und Neptun wurden erst nach der Erfindung des Teleskops entdeckt. Ohne Instrumente zur Beobachtung war praktisch nichts über die Planeten bekannt. Jupiter und Saturn fielen gegenüber Merkur, Venus und Mars auf, weil sie keine Helligkeitsfluktuationen zeigten – bei den anderen Planeten variiert der Abstand zur Erde stark. Dadurch erscheinen sie heller und dunkler, je nach Abstand zur Erde. Außerdem waren Mars, Jupiter und Saturn die ganze Nacht beobachtbar. Bei den inneren Planeten Merkur und Venus war es nur möglich, sie kurz vor oder nach Sonnenuntergang zu beobachten, da sie sich von der Erde aus immer nahe der Sonne befanden.

Vier Technologien brachten Fortschritte bei der Erforschung der Planeten. Die erste war die Erfindung des Teleskops durch Galileo Galilei 1609/10. Ein Teleskop kann durch die Linse mehr Licht einfangen als das menschliche Auge. Es kann schwächere Objekte enthüllen und das Bild stark vergrößern. Damit kann ein Beobachter Details auf den Planeten ausmachen. Schon Galilei entdeckte die vier größten Monde Jupiters – Io, Europa, Ganymed und Kallisto (alle benannt nach Liebschaften des griechischen Göttervaters Zeus). Die ersten Linsenfernrohre waren für heutige Verhältnisse sehr schlecht. Es war möglich, helle Punkte wie die Jupitermonde zu erkennen. Aber bei geringerem Kontrast waren sie überfordert. Deswegen erkannte Galilei die Natur des Saturnrings nicht, obwohl er in einem modernen Teleskop mit derselben Linsengröße gut sichtbar ist. Er erkannte aber den auffälligen großen roten Fleck Jupiters.

Einen Technologiesprung brachte die Erfindung des Spiegelteleskops durch Isaac Newton. Es beseitigte einige Nachteile der frühen Linsenteleskope. Das nach ihm benannte Newton-Teleskop war farbreiner und konnte kompakter gebaut werden. Jede Linse bricht die Lichtstrahlen je nach Wellenlänge unterschiedlich. Das verursacht Farbsäume um starke Kontraste. Bei den frühen Linsenteleskopen wurden die optischen Fehler um so größer, je kürzer Brennweite und Teleskop waren. So waren die Linsenteleskope im 17-Jahrhundert enorm lang, obwohl sie nur geringe Öffnung hatten. Zudem war ein Metallrohling einfacher in die benötigte parabolische Form zu bringen als Linsen. Die optische Qualität war besser.

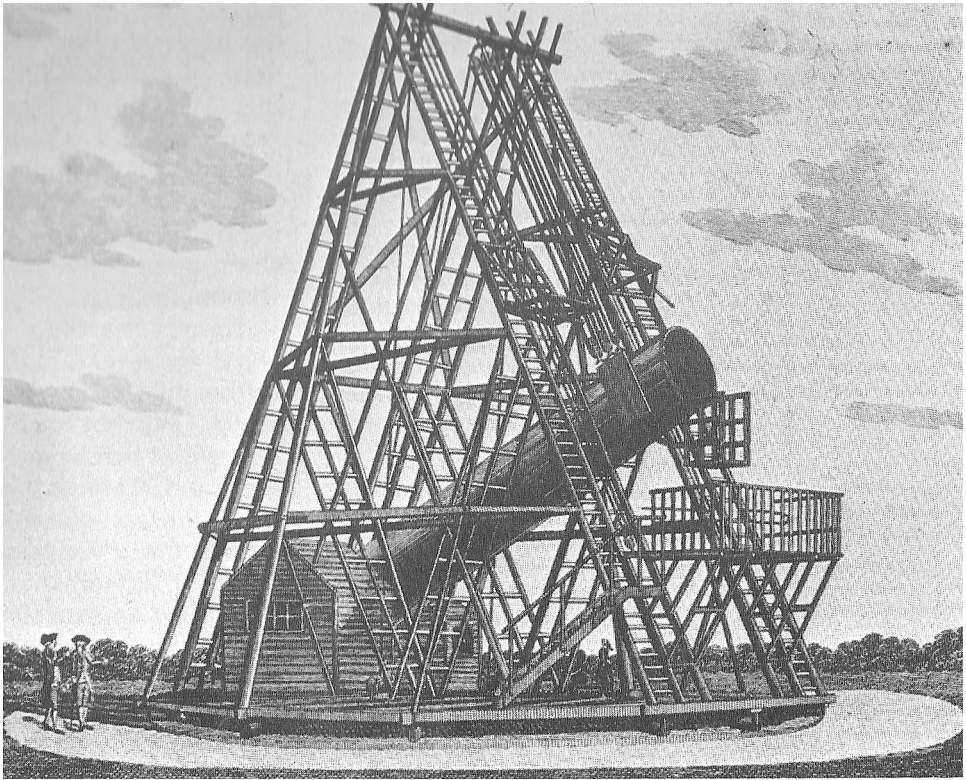


Abbildung 20: Das 1,22 m Teleskop von William Herschel

Sehr bald wurden die Teleskope immer größer. William Herschel, der den Planeten Uranus entdeckte, tat dies mit seinem ersten Newton-Teleskop von 15 cm Durchmesser. Das nächste von ihm gebaute Teleskop hatte bereits 47,5 cm Durchmesser und das letzte, dass er bauen ließ, (Bild) hatte einen Durchmesser von 122 cm.

Danach stieg der Durchmesser von Teleskopen nur noch langsam, weil die Teleskope immer unhandlicher wurden. Dieses Teleskop von Herschel hatte eine Tubuslänge von 12 m. Ohne Gehilfen, die es drehten, war eine Beobachtung nicht möglich. Für den Blick durch das Okular musste er auf Leitern zum Fokus klettern.

Mit den bloßen Augen entdeckten Astronomen mithilfe der Teleskope die beiden Marsatelliten, vier Jupitermonde, acht Satelliten des Saturn, vier Uranusmonde und den Mond Triton des Neptuns. Der kleinste so entdeckte Satellit war der 12 km große Mars-

mond Deimos. Bei Saturn konnte der Ring erkannt werden. Auch die beiden großen Lücken im Ring, die Cassinische- und Encksche Teilung, wurden identifiziert.

Die zweite Technologie, die die Forschung voranbrachte, war die Erfindung der Fotografie. Für die Planeten, die relativ hell sind, war sie weniger bedeutend. Doch andere Gebiete der Astronomie profitierten davon. Eine Fotografie kann Licht über längere Zeit sammeln und lichtschwächere Objekte sichtbar machen. Erst auf Fotografien entdeckten Forscher zehn weitere Monde des Jupiters, zwei des Saturn und je einen weiteren Uranus- und Neptunmond. Für die Planeten war wichtig, dass bei einer kurzen Belichtung die Luftunruhe, die das Bild verschmiert, deutlich reduziert wurde. Fotografische Techniken konnten geringe Helligkeitsunterschiede hervorheben. Sie halfen, die Atmosphären der Planeten zu verstehen. Beobachter erkannten, dass Jupiter und Saturn abwechselnd dunkle und helle Bänder hatten. Ebenso wurde bald klar, dass die vier äußeren Planeten keine sichtbare Oberfläche hatten. Denn es gab keine unveränderlichen Oberflächenstrukturen. Bei Uranus und Neptun konnten gar keine Strukturen nachgewiesen werden. Bei Saturn fanden Astronomen Bänder und Zonen, aber keinen Sturm wie den roten Fleck.

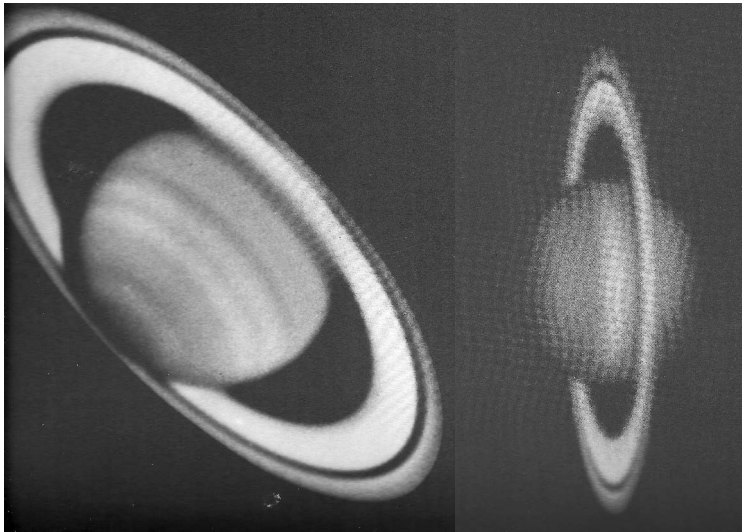


Abbildung 21: Saturn bei schräger Kantenstellung und unter flachem Winkel

Dieser war über Jahrhunderte beobachtbar. Seine Farbe schwankte zwischen einem hellen Rot und einem blassen Orange. Damit war er unterschiedlich gut sichtbar. Seine Größe änderte sich im letzten Jahrhundert um den Faktor 2. Teilweise gibt es über Jahrzehnte keine überlieferte Sichtung

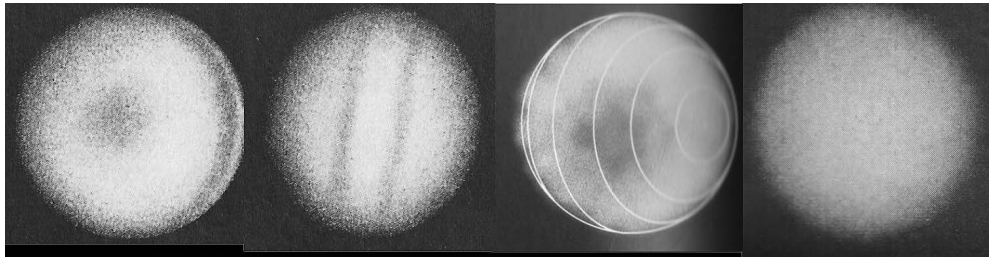


Abbildung 22: Zeichnungen von Uranus (links) und Fotografien (rechts).

des Flecks. So wurde klar, dass er kein Oberflächenmerkmal war, sondern eine atmosphärische Erscheinung.

Doch auch Fotografien stießen an ihre Grenzen. Das liegt an der Atmosphäre unseres Planeten. Ständig steigt warme Luft auf, kühlt in großer Höhe ab und fällt wieder nach unten. Es bilden sich kleine Zellen. In deren Mitte steigt warme Luft auf und am Rand fällt kalte Luft herab. Durch die Dichteunterschiede von warmer und kalter Luft verändert sich der Brechungsindex des Lichts, verstärkt durch die induzierten Strömungen.

Ist der Effekt stark genug, jeder sieht ihn mit bloßem Auge: die Sterne funkeln, verändern ihre Helligkeit. Als Folge sind die Abbildungen der Planeten im Teleskop unschärfer, als es die Optik zulässt. In Europa ist das „Seeing“, so bezeichnen Fachleute die „Qualität“ der Atmosphäre, selten besser als 1 Bogensekunde. Sprich, die kleinsten Details sind etwa 1 Bogensekunde groß. Diese Auflösung erreichen schon Teleskope mit 120 mm Durchmesser, die sich Amateure leisten können. In bestimmten Gegenden, die allesamt entlegen sind, gibt es eine stabilere Luftschichtung. Auf Berggipfeln über Wüstengebieten oder auf Inseln kann das Seeing auf 0,5, kurzzeitig sogar auf 0,3 Bogensekunden absinken. Ein Beobachter kann, wenn es kurzzeitig besser ist, sich den Sinnesindruck merken und zeichnerisch wiedergeben. Eine Fotografie ist selten zu genau diesem Sekundenbruchteil auslösbar, daher gab es von den Planeten bessere Zeichnungen als Fotografien.

Durch das Sammeln von Licht wurden Fotografien wichtig für lichtschwache Objekte. Mit der Einführung der Fotoplatte verlagerte sich das Interesse der Astronomen von Planeten auf lichtschwache Objekte wie Galaxien und Nebel.

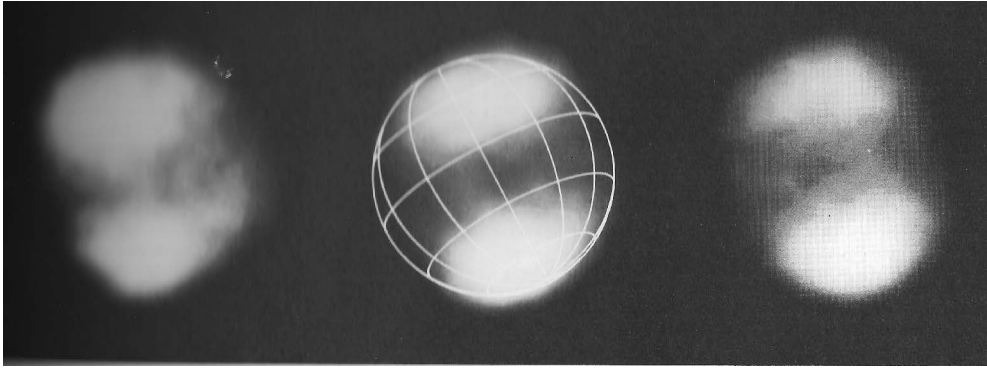


Abbildung 23: Die besten Aufnahmen von Neptun vor Voyagers Start

Die Monde erlaubten es, die Masse eines Planeten zu bestimmen. Mathematiker mussten ihre Distanz zum Planeten und ihre Umlaufperiode bestimmen, um über das Gravitationsgesetz die Masse des Planeten zu berechnen. So wurde bald klar, dass die äußeren Planeten viel massereicher als die Erde waren. Verbunden mit der beobachtbaren Atmosphäre und der Größenbestimmung wurde klar, dass sie nicht aus Gestein bestehen konnten. Dafür war ihre Dichte zu gering. Die Größe ist nur grob im Fernrohr bestimmbar. Genauer geht es mit Sternbedeckungen. Die Planeten bewegen sich und bedecken Sterne. Wird die Helligkeitsveränderung gemessen, so ist bestimmbar, wie groß der Planet ist. Es nimmt die scheinbare Größe der Planeten durch die steigende Entfernung, und durch die Abnahme des Durchmessers von Jupiter zu Neptun, immer weiter ab. Bedeckungen werden daher immer seltener, je weiter ein Planet von uns entfernt ist.

Von Pluto gab es lange Zeit nur eine Schätzung der Größe, da er selbst in den besten Teleskopen nur als Punkt erschien. Anfangs wurde Plutos Größe anhand von Störungen der Bahnen von Uranus und Neptun berechnet. So erhielten Mathematiker einen Durchmesser 10.000 bis 12.000 km. Doch als Pluto einen Stern bedecken sollte und ihn verfehlte, sank der maximal mögliche Durchmesser auf 6.800 km. Selbst Plutos großer Mond Charon entging den Beobachtungen – er war zu nahe am Planeten. Er verschwamm bei den Aufnahmen mit Pluto. Ähnlich erging es zahlreichen anderen planetennahen Monden der Gasriesen, die erst von Voyager entdeckt wurden. Sie waren zu lichtschwach, um bei normalen Aufnahmen entdeckt zu werden. Wurden die Aufnahmen überbelichtet, um schwache Monde zu entdecken, überstrahlten die Planeten die nahen Monde. Uranus und Neptun sind schwer zu beobachten. Sie sind maximal 4 bzw. 2,5 Bogensekunden groß, nahe an der praktisch erreichbaren Auflösung der damaligen

Teleskope. Neptun ist z. B. im Teleskop nur 40 Prozent größer als der größte Jupitermond Ganymed und deutlich kleiner als der rote Fleck des Jupiters. Zeichnungen zeigen bei beiden Planeten Wolkenbänder wie bei Jupiter. Doch wie wir von Voyager und durch Aufnahmen moderner Teleskope wissen, entstammen diese der Phantasie der Beobachter.

Eine neue wissenschaftliche Dimension eröffnete die Spektroskopie. Mit einem Prisma konnte bereits Newton das Licht in seine Spektralfarben zerlegen. Doch das blieb lange Zeit eine Spielerei. Bis Joseph Fraunhofer 1814/15 das Spektroskop erfand. Damit wird ein Spektrum auf einen Schirm geworfen, sodass es untersuchbar ist. Fraunhofer entdeckte dabei dunkle Linien im Sonnenspektrum. Kirchhoff und Bunsen erarbeiteten 1858 die theoretischen Grundlagen zur Erklärung dieser Linien. Es waren Absorptionslinien, bei denen bestimmte Elemente Energie absorbierten, wenn sie ein Elektron einfingen. Damit waren die chemischen Elemente der Sonne nachweisbar. Für die Planetenforschung hatte die Technik lange Zeit nur wenig Bedeutung. Für die Linien sind ionisierte Elemente nötig, die es nur bei hohen Temperaturen gibt. Trotzdem konnte damit Natrium auf Io nachgewiesen werden. Später entdeckten Forscher, dass auch Moleküle bei „normalen“ Temperaturen Licht absorbieren. Dann allerdings in breiten Absorptionsbändern anstatt in Linien. Damit waren durch den Vergleich mit Laborspektren die häufigsten mehratomigen Gase wie Methan, Wasser und Ammoniak in den Atmosphären der Gasplaneten nachweisbar.

In unserem Jahrhundert kam die Radioastronomie hinzu. Sie erschloss einen neuen Wellenlängenbereich. Vorher waren Astronomen auf das sichtbare Licht und die benachbarten Bereiche begrenzt. Bei Arbeiten für die Telefongesellschaft Bell Phone mit einer Kurzwellenantenne stellte Jansky fest, dass sich ein Störsignal jeden Tag um 4 Minuten verzögerte. Da die Erde die Sonne umkreist, benötigt sie 4 Minuten, um diese Bewegung bei ihrer Drehung um die eigene Achse aufzuholen. Es musste sich also um eine stellare Quelle handeln. Die ersten Radioteleskope, die nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelt wurden, waren überflüssige Radarantennen. Damit wurde der Himmel nach Radioquellen durchgesucht. 1955 wurde Jupiter als Radioquelle entdeckt. Das versetzte die Fachwelt in Erstaunen. Wie Radiosignale entstehen, war bekannt, schließlich sind sie die Grundlage des Radios und Funks. Werden Elektronen aus ihrer Richtung abgelenkt, senden sie Radiowellen aus. Doch wie sollte Jupiter zu so vielen Elektronen kommen? Die Entdeckung des Sonnenwindes durch Mariner 2 (der schon Jahre zuvor von

Ludwig Bierman vorhergesagt wurde) brachte die Lösung: Die Sonne sendet laufend Teilchen, darunter Elektronen, aus. Diese geladenen Teilchen folgen Jupiters Magnetfeld, ändern dadurch ihre Richtung und geben Radiowellen ab. Jupiter musste also ein starkes Magnetfeld besitzen. Ansonsten wäre es nicht über Hunderte von Millionen Kilometern nachweisbar. Damit hatten Physiker die ersten Hinweise auf die Strahlungsgürtel von Jupiter. Spätestens als Explorer 1 1958 einen Strahlungsgürtel um die Erde entdeckte, lag die Vermutung nahe, dass auch Jupiter einen solchen Gürtel hatte.

Den größten Anteil am wachsenden Wissen über die Planeten hatten Wissenschaften, die es schon lange gab: die Mathematik und die Physik. Beide sind eng verbunden, denn die meisten physikalischen Erkenntnisse lassen sich in mathematische Formeln ausdrücken. Die Mathematik erklärte die Planetenbeobachtungen und löste damit das geozentrische Weltbild ab. Kepler erkannte die wahren Bewegungen der Planeten um die Sonne. Sie wurden vorher als kreisförmig angenommen, sind aber in Wirklichkeit Ellipsen. Mit der Physik und der Mathematik war berechenbar, dass es auf den äußeren Planeten enorm kalt sein musste. Über die Bestimmung des Abstands Erde-Sonne sind die Entfernungen der Planeten und ihre Größe ermittelbar. Aus den Umlaufzeiten der Monde kann die Masse der Planeten bestimmt werden. Aufgrund der Masse ist ihre Dichte berechenbar. Es wurde klar, dass die vier äußeren Planeten nicht aus Gestein bestehen konnten. Dafür ist ihre Dichte zu gering. Gestein hat eine Dichte von mehr als 2 g/cm^3 , Jupiter als Gasplanet mit der höchsten Dichte kommt lediglich auf $1,34 \text{ g/cm}^3$. Die Dichte von Saturn ist sogar so gering, dass er in Wasser schwimmen würde. Dagegen gibt es im inneren Sonnensystem nur kleine Gesteinsplaneten. Die Physik konnte schließlich erklären, warum diese Planeten so groß sind.

Die Physik erklärt die unterschiedliche Zusammensetzung des Sonnensystems. Im Inneren haben wir Körper (Planeten und Kleinplaneten), die vorwiegend aus Gestein bestehen. Es folgen zwei große Gasriesen und zwei kleinere Planeten die vorwiegend aus Eis bestehen. Dann schließt sich der Kuiper-Gürtel an, eine Zone mit vielen kleinen Körpern aus Eis. Eis ist auch das dominierende Material bei den Monden im äußeren Sonnensystem.

Hier hat die Modellierung über die Entstehung des Sonnensystems geholfen. Ursprünglich gab es nur eine Gaswolke, angereichert mit schweren Elementen aus einem Supernovaüberrest. Wasserstoff war das häufigste Element, gefolgt von Helium. Alle anderen

Elemente machten zusammen nicht mal ein Prozent aus. Die Atome gingen Verbindungen ein, es entstanden Moleküle. Durch die Verbindung von Metallen mit Sauerstoff konnten sich feste Stoffe bilden, wie Quarz oder Silikate, bei niedrigen Temperaturen auch Eis aus Wasser, Ammoniak und Methan.

Die Scheibe rotierte langsam. Ihre Gravitationskraft zog alles zum Zentrum, wo sich die Wolke aufheizte. So stieg die Dichte der Gaswolke von außen nach innen an. Gasmoleküle wie Wasserstoff und Helium wurden durch die Erhitzung schneller und entwichen nach außen. Die festen Stoffe dagegen aggregierten zu immer größeren Brocken, die durch ihre Gravitationskraft weitere Stoffe aus der Nähe anzogen. So wuchsen die Protoplaneten weiter. Im inneren Sonnensystem sorgte die Aufheizung der Wolke bald dafür, dass es kaum noch Wasserstoff und Helium gab. Die Zone verarmte auch an anderen Gasen, wie Wasser, Ammoniak oder Methan. In der Umgebung Jupiters war die Dichte hoch und Wasserstoff und Helium noch in großen Mengen vorhanden. Jupiter und Saturn konnten durch ihre Gravitationskraft viel davon einsammeln. Bei Uranus und Neptun war die Dichte der Gaswolke schon abgesunken, dass sie nie auf die Masse der beiden inneren Gasriesen anwachsen konnten. Sie sammelten vor allem Eis ein, das in dieser Entfernung von der Sonne ein Feststoff ist. Noch weiter draußen waren die Abstände der Körper für Kollisionen zu groß, dadurch blieb es bei vielen kleinen Körpern. Ähnliches passierte auch zwischen Mars und Jupiter. Dort entstand eine Zone, in der Jupiters Gravitation die Entstehung eines weiteren Planeten verhinderte. Gleichzeitig war Jupiters Schwerkraft nicht groß genug, um die Brocken selbst einzufangen.

Das Einsetzen der thermonuklearen Fusion in der Sonne setzte dem Wachsen der Protoplaneten durch das Aufsammeln von Gasen ein Ende. Die Sonne emittierte Wärmestrahlung und einen Strom geladener Teilchen. Dadurch wurden alle Gase weggeblasen. Ab jetzt konnten die Protoplaneten nur noch wachsen, indem sie mit anderen Protoplaneten kollidierten. Die vielen Krater, die es auf vielen Körpern gibt, legen Zeugnis von dieser gewalttätigen Phase ab. Mindestens drei radikale Fusionen gab es: Die Venus sammelte einen Protoplaneten auf, dessen Impuls dazu führte, dass sie sehr langsam in 253 Tagen entgegen der Bahnrichtung rotiert – alle anderen Planeten rotieren in der Richtung, in der sie die Sonne umkreisen. Bei der Erde führte der Einschlag eines marsgroßen Protoplaneten zum Auswurf des Materials, das den Mond formte. Durch den größten Einschlag kippte bei Uranus die Rotationsachse in die Ekliptik.

Aufgrund dieses Modells ist die chemische Zusammensetzung der äußeren Planeten vorhersagbar. Jupiter und Saturn bestehen vor allem aus Wasserstoff und Helium – mit einem kleinen Kern aus Gestein und Eis. Neptun und Uranus enthalten mehr Wasser, Methan und Ammoniak als Wasserstoff und Helium. Die Monde der Gasriesen und die Kuipergürtelobjekte bestehen fast nur aus Eis und gefrorenen Gasen.

Ein früher Trumpf der Mathematik war die Entdeckung Neptuns. Uranus wurde 1781 durch William Herschel entdeckt. Er umrundet die Sonne in 84 Jahren. Bis Mitte des 19-ten Jahrhunderts hatten Astronomen genügend Positionsdaten, um seine Bahn genau zu berechnen. Dabei entdeckten Mathematiker eine Diskrepanz zwischen der Bahn, der er folgen sollte und seinem tatsächlichen Umlauf. Die Ursache sind gravitative Störungen durch Jupiter und Saturn. Doch selbst nachdem diese berücksichtigt wurden, gab es eine Abweichung. Nahezu zeitgleich machten sich zwei Astronomen daran, anhand der Bahnstörungen von Uranus zu berechnen, wo sich ein weiterer Planet befinden müsste. Der Franzose Le Verrier und der Engländer Adams kamen unabhängig voneinander zum korrekten Ergebnis. Entdeckt wurde Neptun schließlich von Heinrich Johann Galle. Er erhielt am 23.9.1846 von Le Verrier einen Brief, in dem er gebeten wurde, die Region abzusuchen, in der der neue Planet seinen Berechnungen nach sein sollte. Galle entdeckte ihn noch am selben Abend. Adams war schon vorher zum gleichen Ergebnis gekommen. Doch er konnte keinen britischen Astronomen überzeugen, den errechneten Planeten zu suchen. Heute wären die Nationen stolz über eine solche



Abbildung 24: Teleskopaufnahmen von Uranus und Neptun im nahen IR mit modernen irdischen Teleskopen

„internationale“ Zusammenarbeit. Doch im damaligen Klima des Nationalismus stritten sich Frankreich und England darüber, wer den Planeten entdeckt hat.

Die Entdeckung der Radiostrahlung von Jupiter induzierte die Existenz eines starken Magnetfelds. Schon 1935 wurde nachgewiesen, dass Wasserstoff unter hohem Druck metallische Eigenschaften annimmt. Beide Erkenntnisse kombiniert, ergeben als Folgerung, dass Jupiter zu etwa 75 Prozent aus metallischem Wasserstoff bestehen musste. Das würde auch seine niedrige Dichte erklären. So war bereits vor den ersten Raumsonden der innere Aufbau von Jupiter bekannt.

Viele Daten der Planeten waren schon vor den Voyager-Sonden erstaunlich präzise. Die Umlaufbahnen sind genau bestimmbar. Je mehr Daten vorliegen, um so genauer werden die Berechnungen. Die Durchmesser der Planeten wurden vor allem durch Sternbedeckungen präzisiert. Auch die Ringe des Uranus wurden bei Sternbedeckungen entdeckt. Die Masse und Dichte sind bei jedem Planeten durch die Umlaufzeit der Monde mit hoher Präzision bestimmbar. Hier bildet Pluto eine Ausnahme – ohne bekannten Mond wurde seine Masse (und damit auch seine Größe) aus den beobachteten Bahnänderungen von Uranus und Neptun geschätzt. Erst 1978, nach dem Start der Voyagers wurde der Mond Charon entdeckt. Charon umkreist den Planeten so nahe, dass er vorher nicht entdeckt wurde. Damit sank der Durchmesser Plutos in den Modellen von 6.800 km auf 2.700 km ab. Der echte Durchmesser liegt bei 2.377 km.

Die Rotationsperiode wird über zwei Methoden ermittelt. Hat der Planet beobachtbare Oberflächenstrukturen, so können diese verfolgt und damit die Rotationsdauer bestimmt werden. Bei Saturn, Uranus und Neptun scheitert diese Methode. Gemessen wird die Dopplerverschiebung von Absorptionslinien. Da sich die Atmosphäre auf und zu bewegt, sollte sich die Wellenlänge leicht verschieben. Doch der Effekt ist so gering, dass nur ungenaue Werte resultierten. Ebenso wenig half es, die Helligkeit des ganzen Planeten zu bestimmen und aus kleinen Fluktuationen auf die Rotationsperiode zu schließen. Beide Methoden lieferten die Rotationsperiode bei Uranus und Neptun nur auf einige Stunden genau. Bei Pluto dagegen lieferte diese Methode erstaunlicherweise die korrekte Rotationsperiode, obwohl über diesen Planeten sonst die wenigsten gesicherten Daten vorlagen. Das lag allerdings daran, dass Pluto und sein Mond Charon gebunden rotieren. Die Astronomen bestimmten die Helligkeitsveränderungen durch Charon, der hinter Pluto verschwand oder vor ihm vorbeizog.

Nahezu unbekannt waren Oberflächendetails von Uranus und Neptun sowie aller Satelliten im Sonnensystem (außer dem Erdmond). Auch die Größe der Monde war nur anhand ihrer Helligkeit und dem Helligkeitsabfall beim Verschwinden auf der Nachtseite des Planeten abschätzen. Die Größe hängt aber nicht nur von der Helligkeit, sondern auch von der Menge des Lichts, die reflektiert wird ab. Es gibt im Sonnensystem dunkle Körper wie unseren Mond, aber auch Körper, die fast das ganze Licht zurückwerfen, wie Enceladus. Wie wenig wir vor Beginn der Raumfahrt über die Planeten wussten, ist am Umfang des Buches „Atlas des Sonnensystems“ (S.594 von 1985) erkennbar. Das ist ein umfangreiches Werk über die Planeten. Es erschien 1985 vor dem Vorbeiflug von Voyager 2 an Uranus, aber nach dem Vorbeiflug an Saturn. Die Kapitel über Jupiter und Saturn machen 64 bzw. 72 Seiten aus. Das Kapitel über Uranus noch sechs Seiten und die Erkenntnisse über Neptun und Pluto passen auf je eine Doppelseite.

Nach Voyagers Start lösten CCD-Detektoren die bis dahin verwendeten Vidicon-Röhren und Film ab. CCD-Detektoren haben Quantenausbeuten von 50 bis 80 Prozent, während die besten fotografischen Filme auf Quantenausbeuten von wenigen Prozent kommen. Jedes Pixel ist vom Nachbapixel durch Isolationsschichten getrennt. Es gibt weniger Artefakte bei der Darstellung eines hellen Objekts neben einem ganz schwachen. Damit sind zum einen noch lichtschwächere Objekte nachweisbar – die Zahl der Monde um die Gasplaneten explodierte förmlich. Zum anderen sind die digital vorliegenden Bilder im Computer verarbeitbar. Heute machen Amateure bessere Aufnahmen von Jupiter und Saturn als es in den Siebziger Jahren durch Fotografien gab. Sie addieren vie-

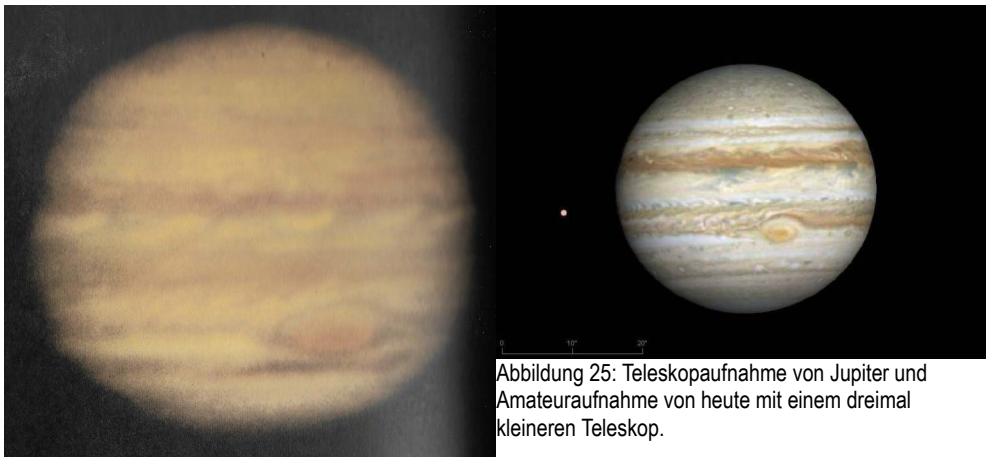


Abbildung 25: Teleskopaufnahme von Jupiter und Amateuraufnahme von heute mit einem dreimal kleineren Teleskop.