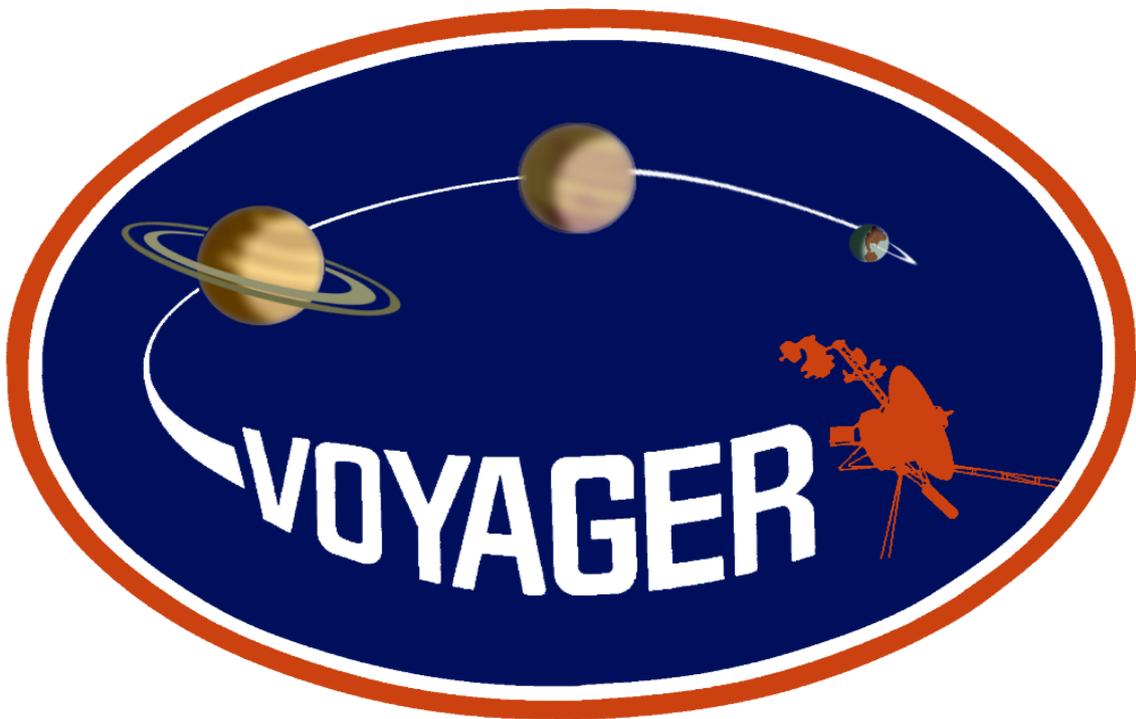


Greselius-Gymnasium Bramsche

Astronomie 12.2, Schuljahr 2022-2023

Voyager-Sonden

Verlauf und Ziele der Mission



Verfasser: Finn Lüssenheide

Kursleiter: Florian Riemer

Abgabetermin: 14.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Die Anfänge des Voyager-Programms.....	3
3	Ziele der Mission.....	4
4	Das Raumfahrzeug und seine Instrumente	5
5	Die Golden Records	6
6	Die Planetenreise von Voyager 1.....	8
6.1	<i>Voyager 1 startet in Richtung Jupiter</i>	8
6.2	<i>Voyager 1 begegnet Saturn</i>	10
6.3	<i>Ein Abschiedsfoto von Voyager 1</i>	11
7	Der Missionsverlauf von Voyager 2.....	11
7.1	<i>Das Sorgenkind auf dem Weg zum Jupiter</i>	11
7.2	<i>Voyager 2 begegnet Saturn</i>	13
7.3	<i>Die Uranusmission</i>	14
7.4	<i>Der letzte Planet in unserem Sonnensystem</i>	16
8	Die Interstellare Mission der Voyager-Sonden	17
9	Schluss.....	19
10	Literatur- und Quellenverzeichnis	20
11	Darstellungsverzeichnis	24
12	Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung	25
13	Einverständniserklärung zur Veröffentlichung.....	25

1 Einleitung

Der Wunsch, unser Sonnensystem mit all ihren Planeten und auch den Raum weit hinter dem Sonnensystem, den interstellaren Raum¹, zu erforschen, beschäftigt die Menschheit schon seit vielen Jahren. Mit einem ihrer erfolgreichsten Forschungsprogramme ist die US-amerikanische Raumfahrtbehörde NASA² ihrem Ziel einen großen Schritt näher gerückt. Hierbei handelt es sich um das Voyager-Programm. Bereits seit über 45 Jahren schreiben die beiden Raumsonden Voyager 1 und ihre Schwestersonde Voyager 2 Geschichte. Nach ihrer Erforschung des äußeren Planetensystems und mehrerer wissenschaftlich sehr relevanter Entdeckungen durchbrachen beide Sonden die Heliosphäre. So trat Voyager 1 bereits 2011 in den interstellaren Raum ein, Voyager 2 folgte sieben Jahre später im November 2018. Auch heute senden die Zwillingstraumsonden immer noch wissenschaftliche Informationen.

In meiner Facharbeit befasse ich mich schwerpunktmäßig mit dem Verlauf und den Zielen der Voyager-Mission. Dabei werde ich zunächst, für einen verständlichen Einstieg in das Thema, näher auf die Entstehung und den Ursprung des Voyager-Programms eingehen. Im Folgenden befasse ich mich mit den Zielen der Mission. Um auch hierbei für ein besseres Verständnis für die Umsetzung der Ziele zu sorgen, gehe ich kurz auf den Aufbau der beiden Raumfahrzeuge sowie den verbauten Forschungsinstrumenten ein, gefolgt von den „Golden Records“ der Sonden. Schließlich komme ich zum Verlauf der Missionen von Voyager 1 und 2 sowie zur interstellaren Mission. Da es beim Verlauf der Mission der beiden Sonden gravierende Unterschiede gibt, ist es nur sinnvoll, dass hier Voyager 1 und ihre Schwestersonde getrennt thematisiert werden. Die Interstellare Mission wird von mir jedoch nur kurz angerissen, da sonst der Umfang der Facharbeit zu groß geworden wäre. Abschließend werde ich auf den Erfolg der Sonde eingehen.

¹ Der Raum im Universum zwischen zwei Sternensystemen innerhalb einer Galaxie.
https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellarer_Raum

² National Aeronautics and Space Administration
<https://de.wikipedia.org/wiki/NASA>

2 Die Anfänge des Voyager-Programms

Am 20. August 1977 startete mit Voyager 2 vom Kennedy Space Center der NASA die erste Raumsonde des Voyager-Programms, nur knapp einen Monat später am 5. September 1977 folgte ihre Schwestersonde Voyager 1.³ Aber auf die etwas merkwürdige Namensverteilung werde ich im späteren Verlauf eingehen. Der Ursprung des Voyager-Programms lässt sich bereits auf Mitte der Sechzigerjahre zurückführen. Zu dieser Zeit entdeckte ein Wissenschaftler des „Jet Propulsion Laboratory“⁴ (JPL), Gary Flando, eine äußerst seltene geometrische Anordnung der äußeren Planeten unseres Sonnensystems. Berechnungen zufolge würden in dem Zeitraum von Ende der Siebziger- und der Achtzigerjahre die Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun in einem langen Bogen zur Erde angeordnet sein. Da ein solches Phänomen nur etwa alle 175 Jahre auftritt, wollte man den günstigen Zeitpunkt nutzen. Dazu wurde der JPL-Ingenieur Gary Flando damit beauftragt, den effizientesten Weg zu finden, um eine Raumsonde zu den großen äußeren Planeten zu schicken. Dieser machte sich eine Methode namens „Swing-by“⁵ zunutze.⁶

Mit dieser Methode ist es möglich, eine Sonde zu beschleunigen und auch ihre Flugbahn zu verändern. Dabei muss die Raumsonde möglichst dicht an einem Planeten vorbeifliegen, wodurch sie das Gravitationsfeld des Planeten kreuzt. Sie wird durch die Anziehungskraft des Planeten abgelenkt und ihre Geschwindigkeit dadurch verändert. So konnte die Reise der Sonden mit einem Minimum an Treibstoff erfolgen und eine verkürzte Reisedauer von 30 auf nur 12 Jahre wurde ermöglicht.⁷

Anfänglich jedoch waren es gar nicht die Voyager-Sonden, die diese Reise bestreiten sollten. Die NASA plante eine weitaus größere Mission, bei der ein Raumschiff mit den erforderlichen Instrumenten umfassendere Untersuchungen durchführen sollte. Da dies jedoch den finanziellen Rahmen sprengen würde, entschied man sich für eine Minimallösung: Voyager 1 und 2. Für

³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager-Sonden>

⁴ Das JPL arbeitet unter anderem für die NASA und baut und steuert Raumsonden
https://de.wikipedia.org/wiki/Jet_Propulsion_Laboratory

⁵ Schwerkraftumlenkung/ Vorbeiswungmanöver
<https://de.wikipedia.org/wiki/Swing-by>

⁶ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-gandtour.shtml>

⁷ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/science/planetary-voyage/>

die beiden Flyby-Sonden⁸ wurden insgesamt über 10.000 mögliche Flugbahnen in Betracht gezogen, wobei das Hauptaugenmerk auf Jupiter und Saturn lag. Dort sollte die Mission auch enden, womit sie offiziell auf eine Betriebszeit von vier Jahren begrenzt wurde. So wollte man die Missionskosten auf 250 Millionen US Dollar beschränken. Doch sowohl Wissenschaftler als auch Ingenieure gaben sich mit dem offiziellen Ziel nicht zufrieden und behielten sich die Option offen, wenigstens eine Sonde über die vier Jahre hinaus in Betrieb zu lassen. Letzten Endes entschied man sich bei Voyager 1 für die kürzere Flugbahn Jupiter-Saturn, Voyager 2 sollte nach dem Passieren von Jupiter und Saturn auch noch Uranus und Neptun erkunden (s. Darstellungsverzeichnis).⁹

3 Ziele der Mission

Wie bereits erwähnt, war das grundsätzliche Hauptziel der Mission die Erkundung der zwei äußeren Planeten unseres Sonnensystems, Jupiter und Saturn. So nannte man die Mission der Voyager-Sonden auch die „Zwei-Planeten-Mission“.¹⁰ Allerdings hatte man zu dieser Zeit noch nicht viele Erkenntnisse über die beiden Gasriesen und dementsprechend offen wurden auch ihre Missionsziele formuliert. Mit Nahaufnahmen von Jupiter und Saturn mit seinen Ringen, sowie den größeren Monden der beiden Planeten erhoffte man sich genauere Erkenntnisse über deren Atmosphäre und vieles mehr. Besonders die Atmosphäre des Saturnmondes Titan schien interessant, denn dieser galt aufgrund seiner dichten Atmosphäre als möglicher Ort für außerirdisches Leben in Form von Biosignaturen. Aber es sollten auch Daten über Magnetfelder, Monde und Ringe gesammelt werden. Ebenso sollte die interplanetare Materie, also die Materie zwischen den Planeten, auf Staub, Plasma und Gas untersucht werden. Auch die Untersuchung der Sonne war im Hinblick auf ihre Auswirkung auf die Planeten und die interplanetare Materie ein Ziel der Mission.¹¹

Voyager 1 bekam den Auftrag, die primären Missionsziele zu erfüllen. Dabei handelte es sich um den ersten Vorbeiflug an Jupiter und Saturn, sowie ihren

⁸ Eine Flyby-Sonde untersucht ihr Zielobjekt im Vorbeiflug

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Raumsonden

⁹ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-gandtour.shtml>

¹⁰ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/science/planetary-voyage/>

¹¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager_1

Monden Io und Titan. Dementsprechend war die Funktion von Voyager 2 klar. Die Zwillingssonde hatte den Auftrag, als „Backup“ Untersuchungen durchzuführen. Dies bezog sich vor allem auf nähere Vorbeiflüge an weiteren Monden. Zusätzlich ließ man für Voyager 2 noch die Option offen, die Sonde weiter zum Uranus und gegebenenfalls auch zum Neptun zu schicken. Allerdings wurde dies an die Bedingungen geknüpft, dass Voyager 1 zuvor ihre Mission abgeschlossen hat und es bei Voyager 2 bis zu diesem Zeitpunkt keine Ausfälle gebe.¹²

4 Das Raumfahrzeug und seine Instrumente

Nun waren die Ingenieure des Jet Propulsion Laboratory gefragt. Für die Gewährleistung der Erfüllung der Missionsziele galt es, die Sonden mit den entsprechenden Forschungsinstrumenten auszustatten und das Raumfahrzeug in seiner Konstruktion optimal an die gegebenen Bedingungen anzupassen. Man entschied sich für einen identischen Bau der Sonden und stattete diese mit insgesamt 10 Instrumenten aus. Alle Instrumente und Subsysteme¹³ sind an der Grundstruktur der Sonden, der Gehäuseelektronik, befestigt (s. Darstellungsverzeichnis).¹⁴

Die verschiedenen Komponenten der Sonde setzen sich wie folgt zusammen: Das Cosmic Ray Subsystem (CRS) ist ein sehr empfindlicher Teilchendetektor und untersucht das Plasma nach sehr energiereichen Teilchen. Die ISS (Imaging Science Subsystem) ist eine modifizierte Kamerakonstruktion, die aus zwei Fernsehkameras und diversen Filtern besteht. Sie dient vor allem zur Beobachtung und Charakterisierung sowie zum Bereitstellen von Bildern zur Unterstützung verschiedener Untersuchungen, was sie mit zum wichtigsten Instrument an Bord der Sonde macht. Das Infrarot-Interferometer-Spektrometer und Radiometer, kurz IRIS, fungiert zum einen als Thermometer und als Radiometer, zum anderen dient es auch zur Bestimmung von bestimmten Elementen und Verbindungen, die in der Atmosphäre oder auf Oberflächen vorhanden sind. Das LECP (Low-Energy Charged Particle = Niederenergetisch geladene Teilchen) ist ebenfalls wie das CRS ein Partikelsensor und soll Teilchen mit hoher Energie suchen. Die Hauptaufgabe

¹² <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-gandtour.shtml>

¹³ Subsysteme sind Teilsysteme eines größeren Systems
<https://de.wikipedia.org/wiki/Subsystem>

¹⁴ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/>

des Magnetometers (MAG) ist es, die Änderung im Magnetfeld der Sonne mit Abstand und Zeit zu messen. Ein weiteres Instrument ist das Photopolarimeter-Subsystem (PPS). Es führt Experimente aus, die die physikalischen Eigenschaften von Partikeln bestimmen. Weitere Experimente an Bord der Sonden sind die Planetare Radioastronomie (PRA), das Plasmawellen-Subsystem (PWS) und die Plasmawissenschaften (PLS). Außerdem ist noch ein weiteres Instrument an der Sonde montiert. Das Ultraviolett-Spektrometer (UVS) ist ein Belichtungsmesser und bestimmt das Vorliegen von bestimmten Atomen und Ionen. Nicht zu den Instrumenten oder Subsystemen zählt die High-Gain-Antenne (HGA), welche die Datenübertragung zur Erde sicherstellt, das optische Kalibrierungsziel, dies dient zur Ausrichtung von Instrumenten auf ein ausgewähltes Ziel, und die thermoelektrischen Radioisotop-Generatoren (RTG), welche die zentrale Energiequelle des Raumfahrzeuges sind.¹⁵

Unerwähnt blieben bisher nur die beiden Herzstücke der Voyagers. Dabei handelt es sich um das Befehlscomputer-Subsystem (CCS) und das Attitude and Articulation Control Subsystem (AACCS). Die Hauptaufgabe des CCS beschränkt sich auf die Sequenzier- und Steuerfunktion. Es führt feste Routinen wie zum Beispiel Fehlererkennung und Korrekturroutinen durch. Das AACCS steuert die Ausrichtung der Sonde. So kann die HGA gezielt auf die Erde ausgerichtet werden.¹⁶

5 Die Golden Records

Außerirdisches Leben ist ein Thema, welches die Menschheit wohl niemals ruhen lassen wird. Ob aus Filmen oder den wildesten Verschwörungstheorien, wohl jedem sind Außerirdische ein Begriff. Dennoch scheint dieses Thema für jeden weit entfernt oder sogar völlig absurd zu sein. Doch nicht für die NASA. Mit den Voyager-Sonden schickte die NASA zwei goldene Schallplatten aus unserem Sonnensystem heraus bis in den interstellaren Raum. Mit dem Ende der Menschheit werden die Platten möglicherweise der einzige Beweis dafür sein, dass wir existierten.¹⁷

¹⁵ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/instruments/>

¹⁶ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/>

¹⁷ https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager_Golden_Record

Carl Sagan, Leiter des Komitees für die Golden Records, war mitverantwortlich für die Inhalte, die auf die 12-Zoll vergoldeten Kupferplatten gespielt wurden.¹⁸ Sagan sagte damals: „Das Raumschiff wird nur angetroffen und die Platte abgespielt, wenn es fortgeschrittene Raumfahrtzivilisation im interstellaren Raum gibt“¹⁹ und begründete damit die getroffene Auswahl für die Inhalte der Schallplatte. Das Ziel der Botschaft ist es, Außerirdischen die Geschichte unserer Welt mitzuteilen. Sie sollen die Vielfalt des Lebens und der Kultur auf Erden sehen. „The Sounds of Earth“, so der Name der Schallplatte, wurde schließlich mit 115 Bildern, einer Vielzahl an natürlichen Geräuschen, einer Auswahl an Musik aus diversen Epochen und Kulturen sowie mit 55 Grußbotschaften in verschiedenen Sprachen ausgestattet. Allerdings wurde Sagan und seinem Team nicht viel Zeit gelassen, dies verlangte viel Improvisation ab. Da sie also die Schallplatte innerhalb weniger Wochen fertigstellen mussten, suchten die Beteiligten meist bei ihren Freunden um Rat und baten diese oder weitere Bekannte darum, Grüße in der gewünschten Sprache, welche an außerirdisches Leben gerichtet sein sollten, aufzunehmen.²⁰

Neben den Inhalten, die insgesamt eine Abspieldauer von etwa 2 Stunden füllen, spielte auch das Titelbild der Platte eine große Rolle. Es musste sichergestellt werden, dass, falls die Platte auf eine fortgeschrittene Raumfahrtzivilisation trifft, diese auch in der Lage wären, die Schallplatten abzuspielen. Deshalb wurde jede Platte mit einer Patrone und einer Nadel versehen, mit der sie zusammen in einer Schutzhülle aus Aluminium eingeschlossen wurden. Die zum Abspielen benötigten Anweisungen wurden in symbolischer Sprache auf das Cover graviert (s. Darstellungsverzeichnis). Unter anderem ist dort die Schallplatte mit der Nadel abgebildet, zu einen aus einer Ansicht von oben und zum anderen als Seitenansicht. Um die Schallplatte herum ist die Zeit einer Umdrehung in binärer Arithmetik²¹ angegeben. Ebenso zeigt die Zeichnung, an welcher Stelle die Nadel angesetzt werden muss, und dass sie von außen nach innen abgespielt werden muss. Des Weiteren befindet sich auf dem Cover eine Gravur, die das typische Signal

¹⁸ <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/>

¹⁹ Carl Sagan (<https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/whats-on-the-record/>)

²⁰ <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/whats-on-the-record/>

²¹ Ein Zahlensystem, das zur Darstellung von Zahlen nur zwei verschiedene Ziffern benutzt
<https://de.wikipedia.org/wiki/Dualsystem>

am Anfang eines Bildes zeigt. Auch hier hatten die Forscher keine Mühen gescheut, um das Abspielen der Bilder möglichst verständlich zu gestalten. Erforderliche Erklärungen wurden wieder in Binärcodes und mehreren Bildern angegeben.²²

Für viel Kritik sorgte jedoch das Cover mit der Gravur der Pulsarkarte. Diese wurde zuvor schon auf den beiden Sonden Pioneer 10 und 11 montiert, welche 5 Jahre zuvor ihre Missionen antraten. Die Karte zeigt die Position des Sonnensystems in Bezug auf 14 Pulsare²³. Viele Kritiker sehen es als naiv an, Botschaften ins All zu schicken und auch noch zu zeigen, wo wir uns befinden. Für sie ist die Schallplatte dementsprechend eine Einladung zur Invasion.²⁴

Mit das Wichtigste auf dem Cover der Schallplatte ist die Zeichnung eines Wasserstoffatoms in seinen beiden niedrigsten Zuständen. Als grundlegende Zeitskala wurde das Zeitintervall von dem Übergang von einem Zustand in den anderen verwendet. Doch nicht nur die Gravuren auf den Titelseiten der Platten enthalten wichtige Informationen über Bedienung und Herkunft der Platten, zusätzlich wurden sie mit einer Art radioaktiver Uhr versehen. Auf den Platten befindet sich eine ultrareine Uran-238-Quelle. Durch die Untersuchung dieses Bereiches ist es möglich, mit Blick auf den Zerfall des Urans die Zeit der Platzierung dieser Quelle auf der Platte zu berechnen.²⁵

6 Die Planetenreise von Voyager 1

6.1 Voyager 1 startet in Richtung Jupiter

Am 5. September 1977 war es so weit. 16 Tage nach dem Start ihrer Schwestersonde Voyager 2 sollte auch Voyager 1 ihre Mission starten. Trotz des späteren Starts der Sonde nannte man sie Voyager 1, da sie früher als ihre Schwestersonde an den ersten Missionszielen, Jupiter und Saturn, ankommen würde. Ebenso wie Voyager 2 wurde die Sonde mit einer Titan IIIE-Centaur-Rakete vom Kennedy Space Center in Florida gestartet.²⁶ Die

²² <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/golden-record-cover/>

²³ Ein Pulsar ist ein schnell rotierender Neutronenstern
<https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsar>

²⁴ <https://www.scinexx.de/dossierartikel/die-goldene-schallplatte/>

²⁵ <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/golden-record-cover/>

²⁶ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-launches>

ersten Aufnahmen der Sonde ließen nicht lange auf sich warten. Etwa zwei Wochen nach ihrem Start wurden die Kameras der Sonde auf unseren Planeten Erde gerichtet und machten das erste Einzelbild des Erde-Mond-Systems.²⁷

Am 5. März 1979 erreichte Voyager 1 ihr erstes Missionsziel: Jupiter. Die ersten Bilder konnte die Sonde bereits vor dem Vorbeiflug am Planeten machen. Zu diesem Zeitpunkt galten alle Monde im Sonnensystem noch als unspektakulär und gleich. Das sollte mit den ersten Aufnahmen des Mondes Io geändert werden. Die Kameras zeigten ein großes orange-schwarz-farbenes Bild. Dies war nur das erste Zeichen dafür, welche Überraschungen und unerwarteten Ergebnisse die Mission in ihrem Verlauf aufdecken werden würde.²⁸ Aus einer Distanz von 18640 km²⁹ zu Io gelang es, Aufnahmen zu machen, die Vulkanausbrüche auf dem Mond zeigten. Es stellte sich heraus, dass der Jupitermond nicht kalt und tot, sondern eine hyperaktive vulkanische Welt mit Ausbrüchen ist, die 30-mal so hoch wie der Mount Everest sind. Damit erklärte sich auch die besondere Oberflächenfarbe des Mondes, welche von ausgestoßenen Elementen stammt.³⁰

Neben Io wurden auch die weiteren drei großen Jupitermonde Ganymed, Europa und Kallisto untersucht. Außerdem wurden die beiden Monde Thebe und Metis entdeckt. Besonders viel Aufmerksamkeit zog der Eismond Europa auf sich. Untersuchungen der Oberfläche ergaben, dass es unter dieser einen Ozean aus flüssigem Wasser geben könnte. Voyager 1 lieferte nicht nur Daten zu den aktiven geologischen Prozessen auf den Jupitermonden und veränderte damit unser Verständnis von Gasriesen und ihren Monden, sondern lieferte auch entscheidende Erkenntnisse über Jupiter selbst. Unter den fast 18 000 Aufnahmen³¹ die Voyager 1 tätigte, befanden sich auch Nahaufnahmen von bisher unbekanntem Planetenringen und Bilder, die das gigantische Sturmsystem des Planeten zeigen. So wurde der große rote Fleck

²⁷ <https://www.nasa.gov/feature/45-years-ago-voyager-1-begins-its-epic-journey-to-the-outer-planets-and-beyond>

²⁸ <https://www.spektrum.de/news/voyager-1-und-2-grenzgaenger-des-sonnensystems/2068344>

²⁹ <https://astrokramkiste.de/jupiter-missionen>

³⁰ <https://www.spektrum.de/news/voyager-1-und-2-grenzgaenger-des-sonnensystems/2068344>

³¹ <https://raumfahrtmissionen.dlr.de/programme/voyager-programm/13-missionsbeschreibungen/211-voyager-1>

auf Jupiter als riesiger zyklonähnlicher Sturm identifiziert. Des Weiteren wurden Blitze entdeckt, die noch aus einer Entfernung von Millionen Kilometern sichtbar sind.³² Darüber hinaus konnten Forscher feststellen, dass Io wie eine Art elektrischer Generator für Jupiter wirkt. Ionen, die von seiner Oberfläche abgelöst werden, bilden einen Gas-Torus³³ um Jupiter und erweitern so sein Magnetfeld. Über dieses Magnetfeld sendet Io fünf Millionen Ampere Strom zu Jupiter.³⁴

6.2 Voyager 1 begegnet Saturn

Nach 30 Stunden verließ die Sonde das Jupitersystem wieder, beschleunigte mithilfe des großen Planeten auf 16 Kilometer pro Sekunde und wurde geradewegs in Richtung Saturn abgelenkt. Ein Jahr nach dem Besuch bei Jupiter erreichte sie am 9. November 1980 den Ringplaneten Saturn.

Das erste Ziel der Sonde im Saturnsystem war der Mond Titan. Wissenschaftler empfanden Titan als besonders interessant, da bereits zuvor bekannt war, dass der Mond eine eigene Atmosphäre hat. Diese galt es zu untersuchen. Aufgrund der Dichte der Atmosphäre gelang es jedoch Voyager 1 nicht, detaillierte Fotos von der Oberfläche zu machen. So war man dazu gezwungen, die Instrumente auf die Atmosphäre auszurichten und diese genauer zu betrachten. Forscher stellten fest, dass die Atmosphäre größtenteils aus Stickstoff, Methan und Ethen besteht. Ansonsten konnten sie den Messdaten nicht viel entnehmen, wodurch Titan für sie noch interessanter wurde.³⁵

Kurz nachdem Voyager 1 Saturn passierte, begann die wohl anspruchsvollste Phase der gesamten Mission. Dem Forschungsteam blieb bloß ein Zeitfenster von zehn Stunden, um die weiteren Monde und das Ringsystem von Saturn zu untersuchen. Als Höhepunkte der Saturn-Begegnung bezeichnet das Jet Propulsion Laboratory zum einen die Entdeckung der drei Monde Atlas, Prometheus und Pandora, sowie die genauere Betrachtung der Saturnringe. Voyager 1 lieferte mit der Entdeckung der Monde Prometheus und Pandora auf dem F-Ring³⁶ die entscheidenden Erkenntnisse, die

³² <https://www.scinexx.de/dossierartikel/ueberraschungen-am-jupiter/>

³³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gas-Torus>

³⁴ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-encounters-jupiter>

³⁵ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-jupiter-saturn.shtml>

³⁶ Ein schmaler Ring des Saturns

die Theorie der Wissenschaftler bestätigte, dass es um die schmalen Ringe des Saturns hütende Monde geben muss, die das Ringmaterial in einer Linie halten.³⁷ Mit dem Verlassen des Saturnsystems trennten sich die Wege der Zwillingssonden. Voyager 1 wurde nach oben aus der Ebene der Planeten heraus, mit Kurs auf den interstellaren Raum, in den freien Weltraum geschickt.³⁸

6.3 Ein Abschiedsfoto von Voyager 1

Carl Sagens Wunsch war eine letzte Aufnahme, bevor die Kameras der Sonde aufgrund von Energiesparmaßnahmen ausgeschaltet werden sollten. Tatsächlich gelang es dem Astronomen die NASA zu überzeugen, noch eine letzte Reihe von Bildern zu erstellen. Am 14. Februar 1990 wurde das ISS-System von Voyager 1 ein letztes Mal in Richtung Sonnensystem ausgerichtet und erstellte eine Reihe von 60 Bildern, in denen sechs Planeten des Sonnensystems eingefangen wurden. Als sogenanntes „Familienportrait“³⁹ ging die Bilderreihe durch die Medien. Besonders das Bild mit dem Namen „Pale Blue Dot“⁴⁰ oder auch „blassblauer Punkt“ faszinierte die ganze Menschheit. Auf dem Bild zu sehen ist die Erde, aufgenommen aus einer Entfernung von 6,4 Milliarden Kilometern und im Sonnenstrahl schwebend kaum zu erkennen. Aber gerade deshalb inspirierte es Carl Sagan „über die Zerbrechlichkeit und Einzigartigkeit [unserer Erde] nachzudenken“⁴¹. Anschließend schalteten die Ingenieure die Kameras ab.⁴²

7 Der Missionsverlauf von Voyager 2

7.1 Das Sorgenkind auf dem Weg zum Jupiter

Voyager 2 startete etwa zwei Wochen vor Voyager 1 am 20. August 1977. Ihre Reise begann ebenfalls beim Kennedy Space Center mit einer Titan-III-E-Centaur-Rakete, die die Sonde direkt in Richtung Jupiter brachte.⁴³ Schnell entwickelte sich die Sonde zum „Sorgenkind“ der Wissenschaftler.

https://de.wikipedia.org/wiki/Ringe_des_Saturn

³⁷ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-encounters-saturn>

³⁸ <https://www.luffahrt24.de/voyager-sonden/>

³⁹ <https://www.nasa.gov/feature/45-years-ago-voyager-1-begins-its-epic-journey-to-the-outer-planets-and-beyond>

⁴⁰ https://de.wikipedia.org/wiki/Pale_Blue_Dot

⁴¹ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-pale-blue-dot-and-friends>

⁴² <https://www.spektrum.de/news/voyager-1-und-2-grenzgaenger-des-sonnensystems/2068344>

⁴³ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-launches>

Einige Monate nach dem Start fiel bereits der primäre Funkempfänger aus, weshalb der Ersatzfunkempfänger in Betrieb genommen werden musste. Dieser erwies sich unglücklicherweise als fehlerhaft. Die Ingenieure konnten den Fehler nicht beheben. Sie waren dazu gezwungen, den Backup-Empfänger, trotz folglich erschwerter Kommunikation mit dem Raumfahrzeug, weiterhin zu benutzen. Nicht lange ließ das nächste Problem auf sich warten. Man stellte fest, dass die Zahnräder des Antriebs der Plattform mit dem ISS-System klemmten. In Folge dessen kam es zu langsameren und ungenaueren Kalibrierungen des Kamerasystems. Das Problem wurde schnell erkannt. Es musste ein weicher Fremdkörper wie eine Folie sein, der das System blockierte. So gelang es, den Fehler durch wiederholtes Ein- und Ausschalten des Systems zu beheben. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass viele der anfänglichen Probleme weniger mit dem System der Sonde zusammenhängen als mit bürokratischen Vorgängen auf der Erde. Zur gleichen Zeit begannen die Vorbereitungen für die Galileo-Mission, wodurch die Voyager-Mission unter Kapazitätsengpässen litt.⁴⁴

Am 9. Juli 1979 kommt Voyager 2 dem Gasriesen Jupiter mit einer Distanz von 643.000 Kilometern am nächsten und löste damit ihre Schwestersonde fast perfekt ab. Bevor sich die Sonde Jupiter widmete, passierte sie die Jupitermonde Kallisto, Ganymed, Europa, Io und Amalthea. Nach der Vorarbeit von Voyager 1 konnte Voyager 2 an diesen Untersuchungen anknüpfen und entsprechend ergänzen. Wie geplant gelang es der Sonde aufgrund ihrer Flugbahn, im Gegensatz zu ihrer Schwestersonde, die Monde von der vom Jupiter abgewandten Seite zu betrachten. Auch blieb der Sonde eine längere Forschungsphase von 35 Stunden und somit fünf Stunden mehr als Voyager 1. Zusätzlich zu den Monden Thebe und Metis entdeckte das Raumfahrzeug einen weiteren Mond namens Adrastea. Sie näherte sich auf eine geringe Distanz an Europa und bestärkte die Vermutungen eines Ozeans aus flüssigem Wasser unter der Eisschicht des Mondes. Bilder zeigten sich überschneidenden linearen Merkmale auf der Mondoberfläche. Des Weiteren konnten auch wieder Vulkanausbrüche auf Io lokalisiert werden und man stellte fest, dass es sich bei sechs Stück von ihnen um Vulkane handelt, die bereits auf Aufnahmen von Voyager 1 ausbrachen. Daraus wurde

⁴⁴ <https://voyager.jpl.nasa.gov/frequently-asked-questions/fact-sheet/>

geschlossen, dass die Ausbruchsperioden der Vulkane über mehrere Monate andauern und es aktive und inaktive Perioden gibt. Bei der Begegnung faszinierten besonders die ersten Bilder von Jupiters Ringsystem. Ähnlich wie bei der Begegnung von Voyager 1 mit Jupiter, machte auch Voyager 2 um die 18 000 Bilder. Da Voyager 2 den Planeten nicht ganz so dicht passierte wie ihre Zwillingssonde, wurde sie auch nicht so stark beschleunigt. Anfang August 1979 verließ sie das Jupitersystem in Richtung Saturn.⁴⁵

7.2 Voyager 2 begegnet Saturn

Im Gegensatz zur Begegnung mit Jupiter löste Voyager 2 ihre Schwester-sonde beim Eintreffen in das Saturnsystem nicht nahtlos ab. Sie begegnete dem Ringplaneten erst neun Monate später am 25. August 1981. Trotzdem blieb das Verfahren der Forscher gleich. Erneut wurde die Flugbahn der Voyager 2 so ausgerichtet, dass die Sonde die Monde erforschen konnte, welche ihre Schwester nicht zu Gesicht bekam oder welche sie wenige Monate zuvor entdeckt hatte. Die Schwierigkeit lag in der wesentlich kürzeren Untersuchungsphase. So hatte man anstatt einer Phase von 35 Stunden beim Jupitersystem nur ein Zeitfenster von 10 Stunden, in dem deutlich weniger Bilder gemacht werden konnten. Alle Instrumente mussten auf Hochtouren laufen. Die neun Monate bis zum Eintreffen von Voyager 2 im Saturnsystem konnte das Forschungsteam gut nutzen um festzustellen, welche Rätsel die Daten von Voyager 1 aufwarfen, und diesen dann mit ihrem Zwilling nachgehen zu können.⁴⁶

Es gelang Voyager 2, mehrere genauere Aufnahmen von den Eismonden zu machen. Darunter waren auch Bilder des Geländes von Enceladus, welche auf eine geologische Aktivität des Mondes hindeuteten, erkennbar durch junges und altes Gelände. Auch wurden Bilder des Nordpols von Saturn gemacht. In späteren Untersuchungen wurden sie zusammengefügt und enthüllten ein sechseckiges Wettermerkmal, das um den Pol zirkuliert.⁴⁷ Bis heute gibt es keine belegte Erklärung für die Ursache dieses Phänomens. Klar ist, dass das hexagonförmige Wolkensystem mit einer Seitenlänge von etwa 13.800 Kilometern mitverantwortlich für Winde auf dem Planeten mit

⁴⁵ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-jupiter>

⁴⁶ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-jupiter-saturn.shtml>

⁴⁷ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-saturn>

einer Geschwindigkeit von bis zu 500 Metern pro Sekunde ist.⁴⁸ Des Weiteren war ein Ziel der Mission eine genauere Untersuchung des Ringsystems auf Struktur und Natur der verdrillten Ringe und Speichen. Bei dem dafür wichtigsten Instrument handelt es sich um das Photometer (PPS). Im Gegensatz zu dem modifizierten Kamerasystem ISS, war das PPS dazu in der Lage, viel genauere Untersuchungen zu tätigen. Allerdings hatte dies bereits beim Vorbeiflug an Jupiter mehrfach Probleme, was den Forschern Sorgen bereitete. Doch das PPS lief einwandfrei und sammelte über 150 Minuten der wichtigsten Daten der ganzen Mission. Anstatt den von Voyager 1 zuvor aufgenommenen 100 Ringen, konnte das Photometer bei dem Vorbeiflug von Voyager 2 um die 1000 Ringe lokalisieren sowie die Feinstruktur detailliert messen.⁴⁹

Nichtsdestotrotz kam Voyager 2 nicht ohne Schäden von der Saturnbegegnung davon. Das Bodenteam konnte die Scanplattform, an der das ISS montiert ist, nicht mehr bewegen und hatte somit keinen Zugriff mehr auf die Ausrichtung der Kameras. Dadurch nahmen diese eine Zeit lang nur den leeren Weltraum auf und dem Forschungsteam entgangen alle Aufnahmen, die nach dem Durchqueren der Ringebeine geplant waren. Im folgenden Verlauf der Mission konnte man die Plattform nur noch mit einer geringen Geschwindigkeit ausrichten. Später stellten Ingenieure fest, dass zuvor die Plattform zu oft zu schnell bewegt wurde und es dadurch zum Austritt von Schmiermittel kam.⁵⁰

7.3 Die Uranusmission

Trotz der Tatsache, dass Voyager 2 ursprünglich nur für eine Laufzeit von vier Jahren konstruiert wurde und diese beim Uranus Encounter⁵¹ bereits weit überschritten sein würde, sowie dass die Wahrscheinlichkeit der Funktionstüchtigkeit beim Eintreffen in das Uranussystem auf 65% geschätzt wurde, erhielt die NASA die Zustimmung der Regierung für die Missionsverlängerung. So leitete das Team des Voyager-Programms schon im Frühjahr

⁴⁸ <https://www.lufffahrt24.de/voyager-sonden/>

⁴⁹ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-jupiter-saturn.shtml>

⁵⁰ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-jupiter-saturn.shtml>

⁵¹ Encounter = Begegnung

1981 mit einer Korrektur des Kurses die Erweiterung der Mission um die letzten beiden Planeten des Sonnensystems, Uranus und Neptun, ein.⁵²

Bei den folgenden Missionen musste unter neuen Bedingungen gearbeitet werden. Deshalb war es erforderlich, das grundlegende System umfangreich zu überarbeiten. Insgesamt mussten sich die Forscher mit drei Problemen auseinandersetzen. Zum einen war man gezwungen, mit einer deutlich geringeren Übertragungsrate zu arbeiten. Dafür griff die NASA auf mehrere Empfangsantennen zurück und schaltete diese zusammen. Auch machte man sich neue Fehlerkorrekturcodes zu Nutze, welche eine Reduzierung der Datenmenge ermöglichte, indem falsch übertragene Signale auf der Erde korrigiert wurden. Zum anderen war der verfügbare Strom der Radionuklidbatterien auf 400 Watt gesunken, was zur Folge hatte, dass nicht alle Systeme zugleich betrieben werden konnten. Schnell fanden die Wissenschaftler der NASA eine Lösung. Durch wiederholte Simulationen auf der Erde bestimmten sie einen Zeitplan, der vorgab, wann welche Instrumente genutzt werden durften. Zusätzlich erwies sich das geringe Licht als kompliziertes Problem, da folglich längere Belichtungszeiten notwendig waren. Das Problem wurde durch eine Stabilisation der Sonde gelöst, außerdem wurden Korrekturmaßnahmen mit dem Einschalten von Düsen durchgeführt.⁵³

Die Arbeit der Wissenschaftler wurde am 24. Januar 1986 belohnt, als es zum Uranus Encounter kam. Voyager 2 passierte den jupiterartigen Planeten mit einem Abstand von ungefähr 107.000 Kilometern und den innersten aller Uranusmonde, Miranda, mit einem geringen Abstand von 28.000 Kilometern. Obwohl die Mission nur wenige Stunden dauerte, kam es zu überraschenden Ergebnissen. Nahaufnahmen zeigten die Struktur der Methanwolken des Planeten, wodurch es Wissenschaftlern ermöglicht wurde, endlich die exakte Rotationsdauer von Uranus zu ermitteln. Diese wurde auf 16 Stunden und 48 Minuten mit Abweichungen von +/- 18 Minuten bestimmt. Auch gelang es, aus den Daten der Magnetometer des Raumfahrzeuges zu belegen, dass es sich beim Magnetfeld des Planeten um ein globales Magnetfeld mit Magnetosphäre handelt. Im Gegensatz zur Erde hat der Uranus also ein geneigtes Magnetfeld, wodurch die Pole näher am Äquator liegen. Ähnlich wie bei den

⁵² <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-uranus-neptun.shtml>

⁵³ <https://www.luftfahrt24.de/voyager-sonden/>

Saturnmonden ließ sich auch bei den Monden im Uranussystem feststellen, dass diese keineswegs nur eintönige Welten widerspiegeln. Insbesondere der Miranda machte in dieser Hinsicht auf sich aufmerksam. Die Oberfläche des Planeten erwies sich als tektonisch höchst interessant und ist gezeichnet von verschiedensten Formen.⁵⁴ Forscher konnten daraus schließen, dass der Mond Erwärmungsperioden durch den Sog anderer Planeten erlebt haben muss. Insgesamt gelang es Voyager 2, mit Bildern elf neue Monde zu entdecken. Des Weiteren gelang es der Sonde als erste, die sehr dunklen neun schmalen Ringe des Planeten aufzuzeichnen. Uranus wurde zum kältesten Planeten unseres Sonnensystems erklärt, nachdem die Sonde Temperaturen von bis zu -353 Grad Celsius maß.⁵⁵

7.4 Der letzte Planet in unserem Sonnensystem

Nach der Uranusmission ging es für Voyager 2 weiter zu Neptun und damit auch zum letzten Planeten, den die Sonde je für die Menschheit aufnehmen würde. Die Voyager-Sonde war die erste Sonde, die den Gasriesen zu Gesicht bekam. Daher gab es entsprechend viel Diskussionsbedarf bei der Entscheidung des Verlaufs der Neptunmission. Letztendlich entschied man sich für eine Flugbahn, die in einem Abstand von 4.800 Kilometern zu Neptun und 38.500 Kilometern zum Mond Triton⁵⁶ entlangführte. Wie auch schon bei der Vorbereitung zum Uranus Encounter, mussten die Wissenschaftler der NASA zahlreiche Vorbereitungen am Grundsystem der Sonde treffen. Da es sich dabei um die gleichen Probleme handelte, wurden auch ähnliche Maßnahmen getroffen. Erneut wurde die Empfangstechnik aufbereitet und die Nutzung der Instrumente noch weiter eingeschränkt. Auch wurde das Mitführen der Kameras bei noch längeren Belichtungszeiten perfektioniert.⁵⁷

Bereits vor der angedachten Beobachtungsphase gelang es Voyager 2, erste Erkenntnisse über Neptun zu sammeln. Auch hier gelang es Forschern, die innere Rotationszeit zu bestimmen. Anders als bei Uranus erkannte man schon aus großer Entfernung einen Sturm, der auf dem Planeten wütete. Unter den 9.000 Bildern, die das ISS während der gesamten

⁵⁴ DIE STERNE: *ERSTE ERGEBNISSE DER URANUSMISSION VON VOYAGER 2*, Dr. J. Dorschner, 1986.

⁵⁵ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-uranus>

⁵⁶ Triton war der einzige Mond, der von Voyager 2 erreicht werden konnte. <https://www.luftfahrt24.de/voyager-sonden/>

⁵⁷ <https://www.luftfahrt24.de/voyager-sonden/>

Beobachtungsphase machte, befanden sich auch mehrere des Sturmes, den die Wissenschaftler „The Great Dark Spot“ taufen. The Grate Dark Spot wurde als ein riesiger Sturm, der gegen den Uhrzeigersinn rotiert, im Süden von Neptuns Hemisphäre⁵⁸ identifiziert. Am 25. August 1989 kam es zum Neptun Encounter und es wurden die ersten Aufnahmen des Ringsystems gemacht, welches man zuvor nur vermuten konnte. Auch kam das Magnetometer wieder zum Einsatz. Überraschenderweise stellte man fest, dass der Planet ein deutlich schwächeres Magnetfeld als Uranus und Jupiter hat.⁵⁹

Durch den nahen Vorbeiflug an Neptun wurde Voyager 2 viel stärker beschleunigt als zuvor bei der Begegnung mit anderen Planeten. Dadurch brauchte die Sonde nur fünf Stunden, bis sie die ersten Nahaufnahmen des Mondes Triton sendete. Das JPL beschreibt den Mond als „eine[n] bitterkalten, zerbrochenen Mond mit einem Gelände, das die Textur einer Honigmelone hat“⁶⁰. Bei der genaueren Auswertung der Voyager-Daten bestimmten die Forscher die Größe von Triton auf etwa 2.760 Kilometer und stieß auf Geysire, die flüssigen Stickstoff ausspuckten. Dieser Stickstoff rieselte später als Schnee wieder auf den Boden des Mondes.⁶¹

Neptun war der letzte Planet in unserem Sonnensystem, den Voyager 2 besuchte. Die Sonde wurde, wie auch schon Voyager 1 von Saturn, vom Planeten abgelenkt und begann damit ihre Reise aus dem Sonnensystem heraus.⁶² Am 10. Oktober und 5. Dezember 1989 wurde das Kamerasystem abgeschaltet.⁶³

8 Die Interstellare Mission der Voyager-Sonden

Nachdem Voyager 2 den Gasriesen Neptun hinter sich gelassen hatte, wurde die Planetenreise der Sonden beendet. Im Jahr 1990 begann die Voyager Interstellar Mission (VIM). Mit der VIM will die NASA die Erforschung des Sonnensystems bis über die äußeren Planeten und noch weiter bis in den interstellaren Raum fortsetzen. Die grundlegenden Missionsziele sind

⁵⁸ Die nördliche und südliche Hälfte eines Planeten.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Hemisph%C3%A4re>

⁵⁹ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-uranus-neptun.shtml>

⁶⁰ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-neptune>

⁶¹ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-uranus-neptun.shtml>

⁶² <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-uranus-neptun.shtml>

⁶³ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2s-cameras-turn-off>

eine genauere Untersuchung der Heliopause, dem äußeren Bereich des Magnetfeldes der Sonne sowie das Verhalten des Sonnenwindes⁶⁴, dessen Strom nach außen gerichtet ist. Generell wurde die Mission in drei Phasen unterteilt: „The termination shock“, „heliosheath exploration“ und „interstellar explorations phase“⁶⁵. Am 17. Februar 1998 wurde Voyager 1 zum am weitesten von der Erde entfernten Objekt der Menschheit⁶⁶. Knapp sieben Jahre später, am 16. Dezember 2004, überquerte die Sonde den Termination Shock.⁶⁷ Aufgrund der abfallenden Strömungsgeschwindigkeit des Sonnenwindes, tritt zum ersten Mal eine Beeinflussung durch das interstellare Medium auf und der Sonnenwind verdichtet und erhitzt sich. Folglich entsteht eine Schockfront⁶⁸. Unglücklicherweise konnte die Sonde keine Daten aufnehmen, zusätzlich war man auf der Erde nicht auf das Empfangen dieser vorbereitet. Doch am 30. August 2007 durchquerte auch Voyager 2 die Schockfront und hielt erste Messungen der Passage für die Wissenschaftler fest.⁶⁹ Die Auswertung der Daten ergab, dass Voyager 2 den Schock fünf Mal durchstieß, was durch das Wandern des Termination Shock zu erklären war. Auch maßen die Forscher nur eine Temperatur von 200.000 Kelvin, obwohl sie eine viel niedrigere Temperatur von 1 Million Kelvin erwarteten. Weitere Messdaten wiesen darauf hin, dass das interstellare Magnetfeld nicht überall die gleiche Stärke hat, wodurch man sich die Grenze zum Sonnensystem als „eingedellt“ vorstellen muss. Die letzten Erkenntnisse aus den Daten wurden im Jahr 2011 gemacht. Man stellte fest, dass der Übergang zum interstellaren Medium ein turbulentes Magnetfeld aus großen magnetischen Blasen mit einem Durchmesser von bis zu 100 Millionen Kilometern ist.⁷⁰

Am 25. August 2012 passierte Voyager 1 die Heliopause, die äußerste Grenze der Heliosphäre⁷¹, und trat damit als erstes Raumfahrzeug in den interstellaren Raum ein. Zu diesem Zeitpunkt konnte die Sonde die volle

⁶⁴ Ein andauernder Strom von geladenen Teilchen.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwind>

⁶⁵ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/interstellar-mission/>

⁶⁶ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-marathon-runner>

⁶⁷ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-crosses-the-shock>

⁶⁸ [https://de.wikipedia.org/wiki/Heliosph%C3%A4re#:~:text=von%20der%20Sonne.,Randsto%C3%9Fwelle%20\(termination%20shock\),-%5BBearbeiten%20%7C](https://de.wikipedia.org/wiki/Heliosph%C3%A4re#:~:text=von%20der%20Sonne.,Randsto%C3%9Fwelle%20(termination%20shock),-%5BBearbeiten%20%7C)

⁶⁹ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-crosses-the-shock>

⁷⁰ <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-interstellar.shtml>

⁷¹ Ein weiträumiger Bereich im Weltraum, in dem der Sonnenwind wirksam ist.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Heliosph%C3%A4re>

Intensität der kosmischen Strahlung sowie das interstellare Magnetfeld messen.⁷² Bestätigt wurde der Eintritt in den interstellaren Raum durch die Messung der Dichte des Mediums am 9. April 2013. Sechs Jahre später folgte auch ihre Schwestersonde und drang am 5. November 2018 in den interstellaren Raum ein.⁷³ Damit begann die dritte Phase der VIM und dauert bis heute noch an. Am 06.03.2023 hat Voyager 1 einen Abstand von 14.806.996 Kilometern zur Erde, Voyager 2 ist 12.383.537 Kilometer weit entfernt.⁷⁴ Es wird prognostiziert, dass die Sonden noch bis 2025 genug Strom haben, um das Minimum an nötigen wissenschaftlichen Instrumenten betreiben zu können. Auch dann ist die Reise der Zwillingssonden noch nicht vorbei und sie werden weiterhin die Milchstraße durchwandern.⁷⁵

9 Schluss

Abschließend möchte ich auf die Frage eingehen, ob die Voyager-Mission wirklich als eine der erfolgreichsten Missionen der NASA betitelt werden kann.

Mit Sicherheit kann diese Frage mit ja beantwortet werden. Die Voyager Mission war ein Meilenstein in der Erforschung des äußeren Sonnensystems und hat nicht nur zahlreiche Daten über die vier äußersten Planeten geliefert und damit diese in ein völlig neues Licht gestellt, sondern auch Daten über die interplanetare Materie und das interstellare Medium. So konnte die Sichtweise auf unser Sonnensystem erweitert werden. Nach über 45 Jahren ist diese Mission noch nicht beendet und wird sicherlich weitere Erkenntnisse liefern.

⁷² <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-the-first-human-made-object-in-interstellar-space>

⁷³ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-nasas-voyager-2-probe-enters-interstellar-space>

⁷⁴ <https://voyager.jpl.nasa.gov/>

⁷⁵ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/interstellar-mission/>

10 Literatur- und Quellenverzeichnis

- DIE STERNE: *ERSTE ERGEBNISSE DER URANUSMISSION VON VOYAGER 2*, Dr. J. Dorschner, 1986.
- <https://astrokramkiste.de/jupiter-missionen>
(07.03.2023)
- <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-gandtour.shtml>
(07.03.2023)
- <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-interstellar.shtml>
(07.03.2023)
- <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-jupiter-saturn.shtml>
(07.03.2023)
- <https://www.bernd-leitenberger.de/voyager-uranus-neptun.shtml>
(07.03.2023)
- <https://www.lufffahrt24.de/voyager-sonden/>
(07.03.2023)
- <https://www.nasa.gov/feature/45-years-ago-voyager-1-begins-its-epic-journey-to-the-outer-planets-and-beyond>
(07.03.2023)
- <https://raumfahrtmissionen.dlr.de/programme/voyager-programm/13-missionsbeschreibungen/211-voyager-1>
(07.03.2023)
- <https://www.scinexx.de/dossierartikel/die-goldene-schallplatte/>
(07.03.2023)
- <https://www.scinexx.de/dossierartikel/ueberraschungen-am-jupiter/>
(07.03.2023)
- <https://www.spektrum.de/news/voyager-1-und-2-grenzgaenger-des-sonnensystems/2068344>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/golden-record-cover/>
(07.03.2023)

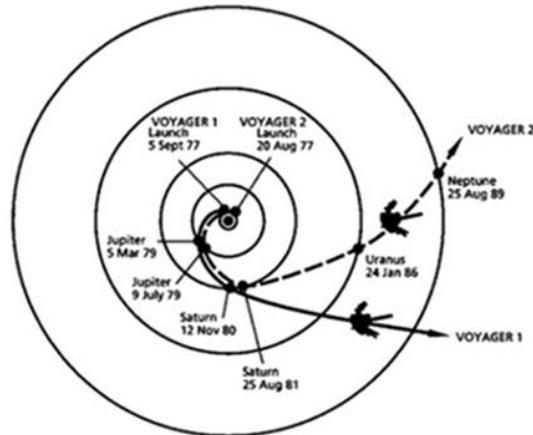
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/interstellar-mission/>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/science/planetary-voyage/>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/instruments/>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-marathon-runner>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-nasas-voyager-2-probe-enters-interstellar-space>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-pale-blue-dot-and-friends>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-the-first-human-made-object-in-interstellar-space>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-crosses-the-shock>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-encounters-jupiter>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-encounters-saturn>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-1-launches>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-crosses-the-shock>
(07.03.2023)

- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-jupiter>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-neptune>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-saturn>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-encounters-uranus>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2-launches>
(07.03.2023)
- <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/timeline/#event-voyager-2s-cameras-turn-off>
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Gas-Torus>
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hemisph%C3%A4re>
(07.03.2023)
- https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellarer_Raum
(06.03.2023)
- https://de.wikipedia.org/wiki/Jet_Propulsion_Laboratory
(07.03.2023)
- https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Raumsonden
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/NASA>
(09.03.2023)
- https://de.wikipedia.org/wiki/Pale_Blue_Dot
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Pulsar>
(08.03.2023)

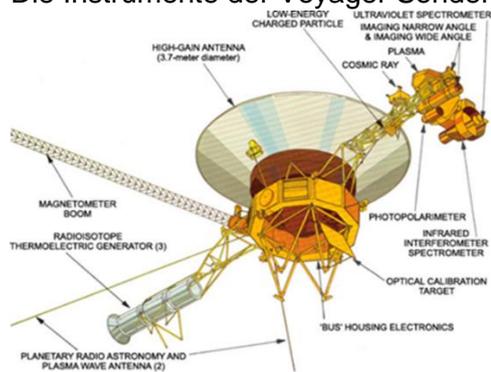
- https://de.wikipedia.org/wiki/Ringe_des_Saturn
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwind>
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Subsystem>
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Swing-by>
(07.03.2023)
- https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager_Golden_Record
(07.03.2023)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager-Sonden>
(06.03.2023)
- https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager_1
(07.03.2023)

11 Darstellungsverzeichnis

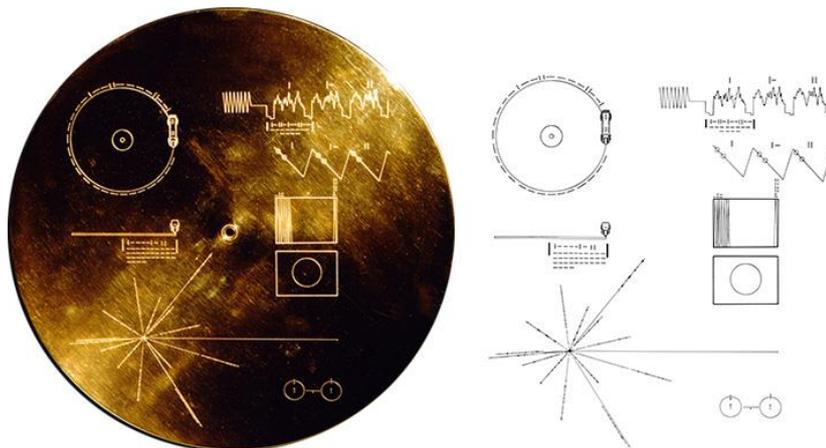
- Missionslogo des Voyager-Programms⁷⁶ (Titelbild)
- Die Flugbahn der Sonden Voyager 1 und Voyager 2⁷⁷



- Die Instrumente der Voyager Sonden⁷⁸



- Das Plattencover der Golden Records⁷⁹



⁷⁶ https://de.wikipedia.org/wiki/Voyager-Programm#/media/Datei:Voyager_-_mission_logo.png

⁷⁷ <https://www.lufffahrt24.de/voyager-sonden/>

⁷⁸ <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/instruments/>

⁷⁹ <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/golden-record-cover/>

12 Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den 09.03.2023

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

13 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den 09.03.2023

Unterschrift der Schülerin / des Schülers