

Into another world - Cassini und Huygens auf dem Weg zum Saturn

Andreas Dittrich – dittrich@informatik.hu-berlin.de
Peter Haider – haider@informatik.hu-berlin.de

Abstract: Die Cassini-Huygens-Mission zum Saturn ist das bisher ambitionierteste Projekt der planetaren Weltraumerforschung. Zum ersten Mal gelang es, mit einer Sonde auf einem Himmelskörper des äußeren Sonnensystems zu landen. Das internationale Projekt, das sich insgesamt über einen Zeitraum von 25 Jahren erstreckt, ist nicht nur ein ingenieurtechnischer Erfolg, sondern liefert auch viele wertvolle wissenschaftliche Daten, die zum Verständnis des Sonnensystems beitragen. Um so ein Vorhaben zuverlässig durchführen zu können, war es nötig, sämtliche Komponenten hinsichtlich Ausfallsicherheit und Vorhersagbarkeit zu optimieren.

1 Die Mission – Von der Erde bis zu Saturn

Die Cassini-Huygens-Mission ist benannt nach Christiaan Huygens (1629-1695) und Jean-Dominique Cassini (1625-1712). Huygens war ein holländischer Wissenschaftler, der die Saturnringe und 1655 dessen größten Mond, Titan, entdeckte. Der Italiener Cassini entdeckte die vier Saturnmonde Iapetus, Rhea, Tethys und Dione. Außerdem entdeckte er 1675 die heute als Cassini-Spalte bekannte schmale Lücke in den Saturnringen. Die Mission ist ein Gemeinschaftsprojekt von ESA, NASA und der italienischen Raumfahrtagentur Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Das Cassini-Raumschiff der NASA soll Saturn vier Jahre lang umkreisen um ihn und seine Monde ausgiebig zu untersuchen. Die Huygens-Sonde ist das erste menschengeschaffene Objekt, das auf einem Himmelskörper des äußeren Sonnensystems, dem größten Saturnmond Titan, gelandet ist. Im Optimalfall sollen die durch Cassini und Huygens gewonnenen Daten Aufschluss über die Entstehung des Lebens auf der Erde liefern.

Der Start fand am 15. Oktober 1997 in Cape Canaveral statt. Trägerrakete war eine Titan-IVB mit Centaur-Aufsatz, die eine Gesamthöhe von 55,8 Metern erreichte. Das Gesamtstartgewicht der insgesamt vierstufigen Rakete betrug 1.038.000 Kilogramm, wovon 5650 Kilogramm Nutzlast, die Cassini-Huygens-Sonde, waren.

Auf ihrer Reise unternahm die Sonde vier Swing-by-Maneuver, um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Bei einem Swing-by-Maneuver, auch Gravity-Assist genannt, nähert sich ein Raumschiff von hinten einem Planeten, d.h. sie bewegt sich in der selben Richtung wie der Planet. Dabei wird sie vom Gravitationsfeld des Himmelskörpers angezogen und ändert ihre Flugrichtung. Ihre Geschwindigkeit relativ zum Planeten ändert sich dabei nicht, doch addiert sich zu ihrer Geschwindigkeit relativ zur Sonne die Geschwindigkeit des Planeten relativ zur Sonne hinzu, so dass sie im Endeffekt beschleunigt wird. Die Sonde passierte

zweimal die Venus, einmal am 27. April 1998 in einer Entfernung von 284 km und einmal am 24. Juni 1999 im Abstand von 603 km. Danach führte sie am 18. August 1999 ein Swing-by-Manöver bei der Erde im Abstand von 1173 km durch, woraufhin sie das innere Sonnensystem verlassen konnte. Die letzte Beschleunigung erhielt sie am 30. Dezember 2000 vom Jupiter in einer Entfernung zu dessen Oberfläche von 9,7 Millionen km.

Am 1. Juli 2004 erreichte die Sonde das Ziel ihrer Reise, den Saturn. Um von seinem Schwerfeld eingefangen werden zu können, musste sie sich gegen die Flugrichtung drehen und für 78 Minuten den Antrieb feuern. In dieser Phase erreichte sie ihre größte Nähe zum Saturn während der ganzen Mission, nämlich einen Abstand von 20.000 km zur Oberfläche.

2 Die Cassini-Sonde

Die Cassini-Huygens Raumsonde ist eine der grössten, schwersten und komplexesten Raumsonden, die jemals gebaut und in den Weltraum geschickt wurden. Mit einer Höhe von 6,7 sowie einer Breite von 4 Metern und einer Gesamtmasse von knapp über zwei Tonnen wird sie nur noch von den zwei russischen Phobos-Sonden übertroffen. Der Leistungsverbrauch lag bei Beginn der Mission bei 885W und sinkt bis zum Ende im Jahr 2008 auf 633 Watt. Cassini ist auf drei Achsen stabilisiert. Die Sonde besitzt eine große und zwei Ersatzantennen, welche an der Basis des zylindrischen Grundkörpers angebracht sind. Dieser Grundkörper ist in drei Teile unterteilt: das obere Ausrüstungsmodul, welches den Großteil der an Bord befindlichen Instrumente beherbergt - sämtliche Wahrnehmungsinstrumente sowie Geräte für die magnetische Feld- und Partikelanalyse befinden sich hier. Bis auf drei Geräte sind diese alle fixiert und werden durch die Bewegung der Sonde ausgerichtet, da die Eigenbewegung eines Teils in der Schwerelosigkeit auch die Sonde bewegen würde. Das zweite Modul beinhaltet den gesamten Antriebsapparat. Schließlich dann das untere Ausrüstungsmodul, auf dem die fixierte, über die gesamte Breite der Sonde reichende Antenne befestigt ist.

2.1 Teilsysteme

Die Cassini-Sonde ist extrem modular aufgebaut. Diese Unabhängigkeit der einzelnen Subsysteme ermöglicht nicht nur die dezentrale Entwicklung in vielen verschiedenen wissenschaftlichen Instituten auf der ganzen Welt sondern erhöht gleichzeitig die Ausfallsicherheit des Gesamtsystems, da die einzelnen Schichten nur über fest definierte Schnittstellen miteinander kommunizieren. Somit können im Normal auftretende Fehlerszenarien besser simuliert werden. Diese Teilsysteme umfassen die thermische und mechanische Grundkonzeption, die Energieversorgung und den Antrieb und nicht zuletzt die zur Datenverarbeitung und Kommunikation mit der Erde nötigen Instrumente. Die einzelnen Module sind im folgenden aufgeführt, die Benennung der einzelnen Module ist zwecks eindeutiger Zurordnung mit den Erwähnungen in den offiziellen Dokumenten in englisch

gelassen:

2.1.1 Structure Subsystem

Das strukturelle Subsystem sorgt für die mechanische Unterstützung und Ausrichtung aller Teile der Sonde, inklusive der Huygens-Sonde, welche unten genauer erklärt werden wird. Es besitzt Befestigungs-Punkte für die Fertigung auf der Erde und fungiert als Skelett oder Rahmen des Flugkörpers. Ausserdem ist es elektrisch geerdet und dient als Equipotential, verhindert also ungleichmässige elektrische Felder. Der Rahmen ist gut wärmeleitend und sorgt so für die Verteilung der Temperaturspitzen innerhalb der Sonde, die extremen Schwankungen ausgesetzt ist. Zusätzlich schützt der Rahmen die sensiblen Innereien vor Funkstörungen oder kosmischer Strahlung, nicht zuletzt auch vor Mikrometeoriten.

2.1.2 Mechanical Device Subsystem

Dieses Teilsystem beherrscht alle mechanischen Geräte der Sonde. Dies beinhaltet das Equipment für autarke Bewegungsabläufe der Sonde innerhalb der Mission – zum Beispiel die Trennung von der Centaur-Rakete – und die dafür notwendigen pyrotechnischen Aktoren und Initiatoren. Ebenfalls dazu gehört das für den Notfall vorgesehene Ersatz-Reaktionsrad zur Ausrichtung der Sonde, auf diese Konstruktionen wird später eingegangen werden. Für den Wärmehaushalt fungieren hier aktive externe Radioisotopen-Heizeinheiten und für den passiven Wärmetransfer Schlitze in der Außenhaut.

2.1.3 Temperature Control Subsystem

Dieses Teilsystem reguliert den Temperaturhaushalt in verschiedensten Umgebungen innerhalb eines für die Sonde und ihre Instrumente akzeptablen Bereichs. Die Route zu Saturn führt Cassini und seinen Begleiter Huygens durch Extreme, die wesentlich stärker sind als auf der Erde. Auf dem Vorbeiflug an der Venus wird es etwa dreimal so heiß wie auf der Erde und rund um Saturn können die Temperaturen besonders im Schatten bis zu 100 mal kälter als auf der Erde werden. Die optimale Temperatur wird durch einer Kombination aus richtiger Auswahl der Hardware und speziellen Prozeduren beibehalten. Auf dem Weg zu Saturn sorgt die grosse Hauptantenne innerhalb einer Distanz von 2,7 astronomischen Einheiten als Hitzeschild in Richtung Sonne. Es existieren Schutzfolien zur Insulation, ebenso thermische Schilde, um die Komponenten vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen. Die oben genannten Schlitze entlassen die Hitze aus dem Inneren der elektronischen Schächte. Jedes Instrument besitzt seine eigene Heizung.

2.1.4 Power and Pyrotechnic Subsystem

Das Energiemodul versorgt die Sonde gleichmäßig mit 30 Volt. Die Energie liefern drei thermoelektrische Generatoren. Diese benutzen die Hitze aus dem radioaktiven Zerfall von knapp elf Kilogramm Plutonium. Die Leistung liegt zu Beginn der Mission bei etwa 300

Watt und senkt sich bis zum Ende der elfjährigen Mission auf 211 Watt. Dieses Modul initiiert auch alle elektro-explosiven oder pyrotechnischen Geräte und wird benutzt, um einmalige Ereignisse anzustoßen, zum Beispiel das Lösen der Sonde von der Startrakete Centaur.

2.1.5 Cabling Subsystem

Die gesamte Verkablung aller anderen System der Cassini-Sonde wird hier zur Verfügung gestellt. Diese Verbindungen sind notwendig zum Transfer von elektrischer Energie. Dies beinhaltet auch die Kommunikation der einzelnen Geräte, also die Übertragung von Signal-, Kommando- und anderen Missionsdaten. Die Verkablung für sich ist komplett passiv, sie enthält keinerlei aktive Komponenten, generiert keine Signale und braucht keine Energie. Die einzige Funktion besteht im Transfer elektrischer Signale von einem Subsystem zum anderen, idealerweise ohne die Signale auf dem Weg zu verändern.

2.1.6 Propulsion Module Subsystem

Dieses Modul sorgt für den Antrieb, auch gerichteter Impuls genannt, um die Flugbahn oder den Orbit zu ändern oder um die Sonde neu auszurichten. Die große Hauptdüse dient zur Geschwindigkeitsaufnahme und um die Flugbahn zu korrigieren. Sie ist in der Lage 445 Newton Schub zu erzeugen und existiert aus Sicherheitsgründen doppelt. Der zweite Antrieb tritt in Kraft, falls der erste ausfällt. Zur genaueren Positionierung dienen 16 kleinere Düsen, welche in Gruppen zu je vier angebracht sind, diese generieren einen Schub von etwa einem halben Newton. Noch genauere Ausrichtung im schwerelosen Raum erlaubt das *Attitude and Articulation Control Subsystem*, welches unten noch genauer erklärt wird.

2.1.7 Attitude and Articulation Control Subsystem

Der genauesten Ausrichtung entlang der drei Achsen des Raumflugkörpers dient dieses Teilsystem. Mit einer Kamera und drei internen Gyroskopen wird anhand von Sterndatenbanken die relative Position und Bewegung der Sonde bestimmt. Extrem feine Änderungen können mit drei elektrisch angetriebenen Reaktionsrädern vorgenommen werden. Diese sind entlang der drei Raumachsen angebracht und bewirken durch ihre Drehung einen Impuls in die entgegengesetzte Richtung. Dies reicht im schwerelosen Raum aus, um Cassini im Bewegung zu bringen und ermöglicht perfekte Kontrolle.

2.1.8 Radio Frequency Subsystem

Die Kommunikation mit der Erde geschieht über einen X-Band Träger mit 8,4 Gigahertz. Dieser wird mit den empfangenen Daten des *Command and Data Subsystem* moduliert und verstärkt an das *Antenna Subsystem* geschickt. Mitbenutzt wird dieses Subsystem vom *Radio Science Instrument*. Die maximale Datenrate des verwendeten Verfahrens liegt

zwischen fünf Bit und 249 Kilobit pro Sekunde, je nachdem, welcher Teil des *Antenna Subsystems* benutzt wird. Aufgrund der Entfernung der Sonde von bis zu 10,6 astronomischen Einheiten im Orbit des Gasplaneten sind die Signale maximal 84 Minuten zur Erde unterwegs.

2.1.9 Antenna Subsystem

Hiermit sind alle Antennensysteme der Cassini-Sonde zusammengefasst. Cassini besitzt eine große Hauptantenne, deren Reflektor vier Meter im Durchmesser misst. Für omnidirektionale Abdeckung, und auch, wenn die Hauptantenne im ersten Teil der Reise als Schutzschild gegen die Sonnenstrahlung benutzt wird, stehen zwei weitere kleine Antennen zur Verfügung die über eine wesentlich reduzierte Sendeleistung verfügen.

2.1.10 Command and Data Subsystem

Dies lässt sich als das Gehirn von Cassini bezeichnen, sozusagen der Hauptcomputer an Bord. Hier werden alle anfallenden Daten der anderen Subsysteme, Sensoren und wissenschaftlichen Instrumente verarbeitet und gespeichert. Es bietet einheitliche Schnittstellen für das Senden von Kommandos zu allen Teilsystemen, entweder direkt von der Erde gesendet oder durch automatische Fehler-Korrektur-Routinen angestoßen. Sollte zum Beispiel die Sonde durch ein unerwartetes Ereignis – etwa einen Ausfall eines Ausrüstungsteils – in einen kritischen Zustand gebracht werden, so kann von hier aus autark der Übergang in eine sichere und stabile Lage durchgeführt werden. Das Herz des Rechners stellen zwei strahlungsgehärtete Pace-1750-A 16 Bit Mikroprozessoren von IBM dar, welche mit 20 Megahertz Systemtakt laufen. Kommuniziert mit den einzelnen Subsystemen wird über eine Bus-Schnittstelle.

2.1.11 Solid State Recorder

Der *Solid State Recorder* ist der zentrale Datenspeicher der Mission vor Ort. Sämtliche Missionsdaten werden hier gespeichert. Auch kritische Flugprogramme sind hier gesichert. Er beinhaltet keine beweglichen Teile und speichert alles vierfach redundant. Unterstützt werden Aufzeichnung und Wiedergabe. In regelmäßigen Abständen wird der komplette Inhalt zur Erde gesendet und nach erfolgreicher Übertragung gelöscht. Die Cassini-Huygens-Mission ist die erste Weltraummission, welche diese Technologie benutzt. Frühere Missionen waren auf spezielle Bandlaufwerke angewiesen.

2.1.12 Electronic Packaging Subsystem

Dies bezeichnet ein *Rack* mit zwölf standardisierten Schächten. Hier werden die verschiedenen elektronischen Module mit dem Rest des Systems verbunden. Beim Design wurde auf die Bedürfnisse aller enthaltenen Teile bezüglich Verkabelung, Temperatur, Strahlung, Schwerpunkt etc. eingegangen.

2.2 Wissenschaftliche Instrumente – Fernwahrnehmung

An Bord von Cassini befinden sich zwölf hochempfindliche Instrumente für insgesamt 27 verschiedene wissenschaftliche Experimente, auf die nun im näheren eingegangen wird. Hierbei zu unterscheiden sind Fern- und Nahwahrnehmungsinstrumente. Die Instrumente zur Fernwahrnehmung untersuchen Phänomene, welche nicht in direkter Umgebung der Sonde zu beobachten sind und entweder passiv aufgenommen werden können oder aktiv provoziert werden. Viele dieser Instrumente haben multiple Funktionen, welche im folgenden erklärt werden.

2.2.1 Imaging Science Subsystem

Auch wenn diese zwei Kameras in der Lage sind, im infraroten oder ultravioletten Wellenbereich aufzunehmen, so werden sie doch hauptsächlich im sichtbaren Bereich verwendet. Sie unterscheiden sich im Aufnahmewinkel: eine für extrem weitwinkliger, die andere für Aufnahmen aus der Nähe. Die CCDs der Kameras besitzen etwa ein Megapixel, was auf den ersten Blick etwas wenig scheint. Die Optik ist allerdings extrem hochauflösend, so kann durch das Fotografieren von überlappenden Ausschnitten des zu beobachtenden Objektes eine sehr hohe Schärfe erreicht werden: In einer Entfernung von vier Kilometern ist ein Euro-Cent ohne Problem zu erkennen. Beim Vorbeiflug an Jupiter wurden so beeindruckende Bilder gemacht. Die Kompression der Daten erfolgt noch auf dem bildbearbeitenden Chip. Mit verschiedenen spektralen Filtern sollen die vertikalen und horizontalen Schichten der Saturn-Atmosphäre, sowie der Aufbau der Ringe erforscht werden. Mit diesen Kameras lassen sich auch die Oberflächen von Monden beobachten, eventuell sogar neue entdecken.

2.2.2 Composite Infrared Spectrometer

Hiermit wird das von einem Objekt abgestrahlte infrarote Licht gemessen, um seine Temperatur und Zusammensetzung zu verstehen. So können die verschiedenen Elemente des weitläufigen Saturnsystems besser kategorisiert werden. Auch lassen sich hiermit Druckprofile der Saturn-Atmosphäre und der Verteilung der Aerosole und Wolken erstellen. Ein Vorfahr dieses Systems war auf den Voyager-Sonden im Einsatz, die Instrumente an Bord von Cassini bieten jedoch eine zehnmal höhere spektrale Auflösung und einen breiteren Wellenbereich, was die Zahl der wahrnehmbaren Details stark erhöht.

2.2.3 Visible and Infrared Mapping Spectrometer

Dieses Instrument besteht aus zwei Kameras in einer, die in infraroten und sichtbaren Wellenlängen arbeiten. Ziel ist es, mehr über die Zusammensetzung der Mondoberflächen, der Ringe und der Atmosphären von Saturn und Titan zu erfahren. Zur Untersuchung der Ringssysteme wird sich Cassini von der Sonne aus hinter den Saturn bewegen, um das durch die Ringe strahlende Sonnenlicht zu analysieren. Langjährige Studien sollen die Wellenbewegung und -veränderung auf Saturn zu verstehen helfen, um somit Wettersysteme aufstellen

zu können. Besonders interessant wird es damit, *präbiotische* Materialien aufzuspüren, also minimale Grundbausteine des Lebens, unter welchen Bedingungen sie auftreten und wo. Erhofft sind Erkenntnisse über den Ursprung des Lebens.

2.2.4 Ultraviolet Imaging Spectrograph

Im Gegensatz zu den eben genannten optischen Kamerasystemen arbeitet dieses nun im ultravioletten Bereich. Bei der Untersuchung der Saturnwolken sollen somit umfangreiche Struktur- und Kompositionsanalysen durchgeführt werden. Der Spektograf ist in der Lage sowohl spectrale als auch spatiale Aufnahmen zu machen. Er ist somit geeignet, die Zusammensetzung von Gasen zuverlässig zu ermitteln. Ausserdem ist dieses Instrument schnell genug, Bilder in einer Folge aufzunehmen, so dass sich daraus Filme erstellen lassen.

2.2.5 Radio Detection and Ranging Instrument

Das Radiowellen-Echolot agiert sowohl aktiv als auch passiv. Im aktiven Modus sendet es selbst Echosignale aus und misst deren Reflektion von der Oberfläche, um geologische Oberflächenprofile zu erstellen. Dies ist besonders nützlich bei optisch nicht untersuchbaren Oberflächen wie der des Titan, welche permanent unter einer dichten Wolkendecke verborgen ist, der so vollständig kartografiert werden soll. Ausserdem können mit dem Radiometer im passive Modus von Saturn oder seinen Monden ausgehende Radiowellen erfasst werden.

2.2.6 Radio and Plasma Wave Science Instrument

Hiermit werden elektrische und magnetische Feldmessungen durchgeführt, sowohl in direkter Umgebung der Sonde als auch in der Ferne. So sollen im interplanetaren Raum Messungen genommen werden, als auch besonders im Saturnsystem Untersuchungen über die Elektronendichte und Temperatur angestellt werden. Die Stärke und Ausdehnung der Magnetosphäre werden vollständig erfasst werden. Auf Saturn selbst interessiert vor allem die Ionosphäre und das Vorkommen von Plasma und Blitzschlag in der Atmosphäre. Ebenfalls untersucht wird die Verteilung von Staub und Meteoriten im gesamten Planetensystem.

2.2.7 Magnetospheric Imaging Instrument

Auch dieses Modul arbeitet sowohl lokal als auch in der Ferne. Es erlaubt eine genaue Untersuchung der Magnetosphäre des Saturn und somit ein Studium alle möglichen Energiequellen im Planetensystem des Gasgiganten. Die ist notwendig, um die Dynamik in Saturns Magnetfeld und Atmosphäre zu verstehen.

2.3 Wissenschaftliche Instrumente – Nahuntersuchung

Nahuntersuchung wird dann möglich, wenn sich zu untersuchende Objekte oder physikalische Begebenheiten in direkter Umgebung der Sonde befinden bzw. ereignen. Diese können mit lokal arbeitenden Instrumenten untersucht werden, welche im folgenden aufgeführt sind.

2.3.1 Plasma Spectrometer

Hier werden Partikel aufgefangen und bezüglich ihrer Masse, Ladung und Richtung untersucht. Der Ionenfluss wird als eine Funktionen der Energie pro Ladung und Ankunfts-winkel relativ zur Raumsonde erfasst. So können Moleküle aus Saturns Ionosphäre identifiziert werden und der Aufbau des Magnetfeldes bestimmt werden. Ausserdem wird das Plasma in diesen Regionen erforscht werden und in Saturns Magnetosphäre auch der Sonnenwind.

2.3.2 Cosmic Dust Analyzer

Schon immer faszinierte Astronomen ein seltsames schwaches Leuchten am Nachthimmel. Giovanni Cassini war der erste, der die Ursache – kosmischen Staub im interplanetaren Raum – ausmachte. Den Ursprung dieses kosmischen Staubs und seine Zusammensetzung zu beleuchten ist eines der Hauptziele der Mission, und so verdankt die Sonde diesem Gerät zu einem gewissen Anteil ihren Namen. Staubpartikel werden hier eingefangen und während sie beim Aufprall innerhalb des Instruments verpuffen, wird ihre Geschwindigkeit, Richtung und chemische Zusammensetzung gemessen. So erhofft man sich wichtige Erkenntnisse über den Ursprung der Himmelskörper und damit des Universums. Dieses Instrument verbraucht sehr wenig Energie und arbeitet komplett passiv.

2.3.3 Ion and Neutral Mass Spectrometer

Dieser Spektrometer analysiert geladene Partikel, wie Protonen und schwerere Ionen, und neutrale Teilchen, wie Atome. So kann mehr über die Atmosphären, aber auch die neutralen Umgebungen der eisigen Trabanten des Gasplaneten erfahren werden.

2.3.4 Dual Technique Magnetometer

Hiermit werden vergleichbar mit dem *Magnetospheric Imaging Instrument* Messungen der Stärke und Richtung des Magnetfeldes nahe an Cassini durchgeführt. Dies ermöglicht die Erstellung eines dreidimensionalen Modells der Magnetosphäre Saturns. Ausserdem kann die Rolle der eisigen Satelliten im Saturnsystem besser verstanden werden.

2.3.5 Radio Science Subsystem

Abschliessend nun das einzige Instrument, welches zur Hälfte auf der Erde und zur anderen Hälfte an Bord von Cassini arbeitet. So werden Daten, welche durch die Ringe und die Atmosphäre hindurch geschickt werden, auf der Erde im *Deep Space Network* empfangen und ausgewertet. Kleinste Änderungen der Information birgen wichtige Information über das planetare Gravitationsfeld, die Masse der Monde oder die Struktur der Ringe.

3 Die Huygens-Sonde

3.1 Mechanische und thermische Konzeption

Die Huygens-Sonde wurde unter der Leitung der Aerospatiale in verschiedenen Teilen der Welt gefertigt. Ihr Gewicht beträgt 318 kg zuzüglich dem 30 kg schweren Probe Support Equipment, das bei der Trennung von Cassini bei ihr verblieb, und sie hat einen Durchmesser von 2,70 m. Das Probe Support Equipment ist unter anderem für die korrekte Abtrennung von der Muttersonde, die Temperaturregulierung während der Reise und für die Datenübertragung zuständig.

Das Front Shield Subsystem macht mit 79 kg massenmäßig den größten Anteil der Sonde aus. Es ist dafür zuständig, die Sonde beim Anflug auf Titan zunächst auf Mach 1,5 abzubremesen. Wenn diese Geschwindigkeit in ca. einer Höhe von 160 km über der Oberfläche erreicht ist, wird der erste der drei Fallschirme aktiviert. Er entfaltet sich 27 m hinter der Sonde auf eine Größe von 2,59 m und zieht die Hinterabdeckung von der Sonde weg. Die Hinterabdeckung zieht bei ihrer Abtrennung gleichzeitig den zweiten und größten Fallschirm aus seinem Depot. Mit seinem Durchmesser von 8,30 m ist er dafür zuständig, dass die Sonde stabilisiert wird und so weit abgebremst wird, dass der Vorderschild gefahrlos abgeworfen werden kann. Danach wird der letzte Fallschirm mit 3,03 m Durchmesser aktiviert. Durch seine geringere Größe wird die Sonde in dieser Phase sogar wieder beschleunigt. Dies ist notwendig, um die Zeit bis zum Aufprall auf die Titanoberfläche von mehreren Stunden auf weniger als 30 Minuten zu verkürzen. Dies ist ungefähr die Zeit, für die die Batterien von Huygens verlässlich ihre Spannung aufrechterhalten können, um Daten zu Cassini zu funken. Würde man die Sonde nicht wieder beschleunigen, wären die Batterien bei der Ankunft schon leer und man könnte keine Daten über die Oberfläche gewinnen.

Sämtliche Systeme und Instrumente der Sonde sind an das Inner Structure Subsystem montiert. Es ist bis auf ein 6 cm² großes Loch an der Spitze vollständig versiegelt und besteht aus einer 73 mm dicken und einer 25 mm dicken Honigwaben-Sandwich-Plattform, Aluminiumschalungen vorne und hinten und radialen Titanstreben. Das Gesamtgewicht dieser Konstruktion beträgt 41 kg.

Um die korrekte Funktionsweise der Sonde in allen Phasen der Mission zu gewährleisten, muss ein großer Aufwand bei der Temperaturregulierung betrieben werden. Die Sonneneinstrahlung variiert von 3800 W/m² in Venusnähe und 17 W/m² beim Titan, und die At-

mosphäre des Titans hat in 45 km Höhe eine Temperatur von 70 K. Deshalb sind alle Außenoberflächen mit einer mehrschichtigen Isolierung überzogen, und 35 Radioisotopenheizeinheiten produzieren kontinuierlich jeweils 1 W Wärme, selbst wenn sich die Sonde im Schlafmodus befindet. Ein weißer Aluminiumüberzug von 0,17 m² an der Vorderseite fungiert als kontrolliertes Wärmeleck mit einer Abstrahlung von ca. 8 W während der Reise, um die Sensibilität gegenüber der Effizienz der Isolierung zu verringern. Während dem Abstieg zur Titanoberfläche wird die Isolierschicht verbrannt und weggerissen.

3.2 Elektronischer und elektrischer Aufbau

Das Command and Data Management Subsystem (CDMS) dient zur autonomen Kontrolle der Sonde nach der Abtrennung und zur Übertragung von Daten aller Subsysteme zur Cassini-Sonde. Die Hauptanforderung für das CDMS ist intrinsische Single-Point-Fehlertoleranz. Nach der Abtrennung von der Muttersonde hat man von außen keine Kontrolle mehr über Huygens, deshalb wurde großer Wert auf Redundanz gelegt. Es werden zwei identische Command and Data Management Units, dreifach redundante Missions-Timer-Einheiten und dreifach redundante Central Acceleration Sensor Units eingesetzt. Die beiden CDMUs agieren unabhängig und simultan, mit dem Unterschied, dass die eine Einheit ihre Daten mit 6 Sekunden Verzögerung schickt, um eventuelle temporäre Unterbrechungen der Verbindung zu kompensieren. Die Probe Onboard Software (POSW) basiert auf einem top-down-hierarchischen und modularen Ansatz mit der Hierarchical Object-Oriented Design (HOOD) Methode, die in Ada-83 implementiert ist. Sie besteht, soweit möglich, aus einer Ansammlung von synchronen Prozessen, die durch eine Hardware-Referenzuhr mit einer Wiederholrate von 8 Hz gesteuert werden. Interrupt-gesteuerte Aktivitäten werden vermieden, um ein vorhersagbares Verhalten zu gewährleisten. Die meisten Prozesse nutzen Tabellen, um ihren Ablauf zu steuern. Sie liegen in einem EEPROM und werden beim Start des Systems in den RAM geladen. Die Tabellen im EEPROM lassen sich patchen, um im Ausnahmefall die Parameter der Mission ändern zu können. Beim Start prüft das System die gepatchten Tabellen auf Integrität und, falls dieser Test fehlschlägt, fällt auf die Standardtabellen zurück. Die Software läuft in einer MIL-STD-1750A-Mikroprozessorumgebung.

Für die Energieversorgung der Sonde ist das Electrical Power Subsystem zuständig. Es besteht aus zwei Modulen mit jeweils 13 seriell geschalteten LiSO₂ Zellen, die 7,6 Ah liefern. Sie sollen die Sonde bis mindestens 30 Minuten nach der Ankunft auf der Oberfläche von Titan mit Spannung versorgen. Die maximale Last, die das Electrical Power Subsystem liefern muss, beträgt 400 Watt und wird über einen 28V Bus an die Abnehmer verteilt. Während der Reise wird Huygens von Cassini mit Strom versorgt und die bordeigenen Batterien werden durch die Power Conditioning & Distribution Unit (PCDU) isoliert. Die PCDU stellt auch einen geschützten 5 V Anschluss zur Verfügung, die von der Pyro-Einheit benutzt wird. Die Pyro-Einheit hat zwei redundante Gruppen von je 13 Pyro-Leitungen, über die die pyrotechnischen Systeme zur Absprengung der Schilde und Fallschirme gesteuert werden. Zwischen den Batterien und den Zündern befinden sich 3 Stufen von Sicherheitsrelays, um ein Zünden zum falschen Zeitpunkt zu verhindern. Die

erste Stufe, das Energieunterbrechungsrelay, wird von der PCDU am Ende der Leerlaufphase aktiviert. Das Entsicherungsrelay wird durch den Hardware-Entsicherungszeitgeber aktiviert, und schließlich wird das Auswahlrelay von der Software in der Command and Data Management Unit geschaltet.

3.3 Missionsziele

Die Huygens-Sonde wird in der Saturnumlaufbahn von Cassini losgekoppelt und soll dann beim Landeanflug auf Titan und nach der Landung wertvolle Daten über die Atmosphäre und die Oberfläche des Mondes sammeln. Die Aufgaben der wissenschaftlichen Instrumente sind:

- Untersuchung der Hauptkomponenten der Atmosphäre des Mondes, Bestimmung der Isotopenverhältnisse der vorkommenden Elemente und Entwicklung von Entstehungsszenarien der Formation und Evolution von Titan und seiner Atmosphäre
- Untersuchung der horizontalen und vertikalen Verteilung von Spurengasen, Suche nach komplexeren organischen Molekülen, Suche nach Energiequellen der atmosphärischen chemischen Prozesse, Modellierung der Photochemie der Atmosphäre, Formierung und Zusammensetzung von Aerosolen untersuchen
- Winde und globale Temperaturen messen, Wolkenphysik, allgemeine Zirkulation und jahreszeitliche Effekte der Atmosphäre messen
- physikalischen Zustand, Topographie und Zusammensetzung der Oberfläche bestimmen, interne Struktur des Mondes ableiten
- obere Atmosphäre, ihre Ionisierung und ihre Rolle als Quelle von neutralem und ionisiertem Material für die Magnetosphäre von Saturn untersuchen

3.4 Wissenschaftliche Instrumente

Um ihre Aufgaben zu erfüllen, trägt die Sonde sechs verschiedene wissenschaftliche Instrumente:

3.4.1 Gaschromatograph und Massenspektrometer

Der *Gaschromatograph und Massenspektrometer (GCMS)* ist ein vielseitiges chemisches Analysegerät, das mehrere atmosphärische Komponenten identifizieren und quantifizieren kann. Er befindet sich an der Vorderseite der Sonde, wo der dynamische Druck das Gas in das Instrument presst. Es kann Argon und andere Edelgase analysieren und Isotopenmessungen durchführen.

3.4.2 Aerosolsammler und Pyrolisierer

Der *Aerosolsammler und Pyrolisierer (ACP)* sammelt die Aerosole in zwei Schichten der Atmosphäre, in ungefähr 40 km und 20 km Höhe, erhitzt sie stufenweise und pumpt die pyrolysierten Produkte in den GCMS zur weiteren Untersuchung.

3.4.3 Abstiegskamera und Spektralradiometer-Modul

Das *Abstiegskamera und Spektralradiometer-Modul (DISR)* ist ein multisensorisches optisches Instrument, das unter anderem im sichtbaren und infraroten Spektrum Bilder von der Oberfläche von Titan aufnehmen kann.

3.4.4 Huygens Atmosphärenstrukturinstrument

Das *Huygens Atmosphärenstrukturinstrument (HASI)* misst die physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre, z.B. Ionisierung, elektrische Entladungen, Beschleunigungen und Temperatur.

3.4.5 Doppler-Windexperiment

Das *Doppler-Windexperiment (DWE)* benutzt eine der beiden redundanten Sonde-Orbiter-Funkverbindungen. An sie sind zwei ultra-stabile Oszillatoren angeschlossen, einer bei Huygens, einer bei Cassini. Beide schwingen mit exakt 10 MHz ($\pm 0,1$ Hz). Diese Signale werden auf der Erde mit 110 Meter-Radioteleskopen aufgefangen. Aus der Dopplerverschiebung des Signals von Huygens und der Interferenz mit dem Signal von Cassini lässt sich die schwingende Bewegung von Huygens beim Abstieg und damit indirekt die Windgeschwindigkeit auf Titan auf 1 m/s genau bestimmen.

3.4.6 Surface Science Package

Das *Surface Science Package (SSP)* ist ein Paket aus relativ einfachen Sensoren zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften des Landeplatzes. Ein Kraftwandler misst die Wucht des Aufpralls, andere Sensoren messen Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, Schallgeschwindigkeit usw. Für den Fall, dass Huygens in einer Flüssigkeit landet, ist ein Sonar an Bord, um die Tiefe der Flüssigkeit zu messen.

4 Die Mission – Saturn und Titan

Nachdem Cassini mehrmals an Titan vorbei geflogen war und schon einige andere Monde untersucht hatte, besuchte die Sonde Mitte Dezember 2004 ein letztes mal Titan, um die korrekte Parabelflughbahn in Gegenrichtung zu Saturn einzunehmen. Auf dieser sollte Huygens losgelassen werden, um dann ohne Antrieb auf dem Rückweg der Parabel direkt auf

den Gastrabanten zu stürzen. Sieben Tage später war es dann soweit: Die Landesonde wurde abgesprengt, das ganze Manöver dauerte 0,15 Sekunden. Cassini befand sich während des Manövers im *Coast Mode*, in dem kein Düsenantrieb erlaubt ist, um störende Einflüsse zu minimieren. Nach der Absprengung sorgte das *Attitude and Articulation Control Subsystem* für die Stabilisierung Cassinis, während an Huygens nun keine Änderungen mehr vorgenommen werden konnten. Zwei Wochen vor dem Absturz passierten die beiden Sonden Seite an Seite den äußeren Mond Iapetus, von nun an ging es auf Kollisionskurs mit Titan. Sieben Tage vor Null schaltete Huygens nach und nach seine Onboard-Geräte ein, alle Funktionstests liefen ohne Probleme.

Am 14. Januar kam der entscheidende Tag. Während Cassini im letzten Moment ein Ausweichmanöver flog, um aus sicherer Entfernung die Signale seiner kleinen Partneronde aufzufangen, trat Huygens in einem steilen Winkel von 65 Grad in Titans dichte Atmosphäre ein. Dieser steile Winkel und die damit verbundene hohe Geschwindigkeit waren notwendig, da man sich ob der Dichte der Atmosphäre nicht sicher war, ob Huygens sie überhaupt durchdringen könnte. Alles verlief planmässig, der Winkel wurde im Zehntel-Gradbereich eingehalten. Von nun an hatte Huygens eine Batterielaufzeit von maximal viereinhalb Stunden, in der er wissenschaftliche Daten aufnehmen und verschicken konnte.

Im ersten Teil des Abstiegs bis auf eine Höhe von etwa 1000 Kilometern über der Mondoberfläche bremste nichts außer dem Hitzeschild die Sonde. Dann wurde der erste Landefallschirm zum Heck hinausgeschossen, der die Sonde kaum gebremst auf etwa 200 Kilometer brachte, dort wurde dann der große Hauptfallschirm gezündet. Um sicher zu gehen, dass Huygens auch wirklich ankommt, wurde etwa 150 Kilometer über dem Boden der Hauptschirm gelöst und ein wesentlich kleinerer Landefallschirm geöffnet, der die Sonde mit einer Geschwindigkeit von etwa fünf Metern pro Sekunde auf die Trabantenoberfläche brachte. Während Cassini der Erde abgewandt alles überwachte, beobachteten grosse Erdteleskope über den Doppler-Effekt, dass zumindest der Hauptschirm die Sonde korrekt abgebremst hatte; wie sich später zeigen sollte, lief die gesamte Landung nahezu perfekt.

Während Huygens sendete und Cassini lauschte, wartete die Welt fieberhaft auf die ersten direkten Aufzeichnungen der Landesonde. Insgesamt sendete Huygens knapp sieben Stunden Daten, wovon die ersten zweieinhalb jedoch nur leere *Dummy super packets* waren. Nachdem Cassini dies alles empfangen und auf seinem *Solid State Recorder* aufgezeichnet hatte, begann er sich Richtung Erde zu drehen. Dieser Vorgang dauerte über eine Stunde, bis endlich Daten mit der zweieinhalb-fachen Aufzeichnungsgeschwindigkeit auf dem Weg Richtung Erde unterwegs waren. Huygens sendete übrigens über zwei Stunden länger als Cassini aufzeichnen konnte. Leider fiel einer der Sendekanäle aus, so dass nicht redundant gesendete Daten verloren gingen, dies betrifft die Hälfte der optischen Aufnahmen. Dennoch war die Mission sowohl ein technischer als auch ein wissenschaftlicher Erfolg.

Die Eindrücke von Titan zeigen einen geologisch äußerst aktiven Planeten mit einer sehr jungen und ständiger Veränderung unterworfenen Oberfläche. Während des Sinkfluges war Huygens außerdem starken Winden ausgeliefert. Die Atmosphäre besteht zu grossen Teilen aus Methan, von der gefrorenen Oberfläche wird dies ebenfalls vermutet. Insgesamt

sendete Huygens elf Megabyte Rohdaten, wovon der größte Teil für Fotos gebraucht wurde. Auch wenn diese Menge im Vergleich zu heutigen Datenmenge auf Heimcomputern gering scheint, so wird die Auswertung der Daten noch Jahre in Anspruch nehmen. Abgesehen vom Erfolg der nominellen Mission ist die volle Tragweite der durch sie gewonnenen Erkenntnisse also noch gar nicht abzusehen. Nicht zu vergessen ist, dass, während Huygens langsam auf der eisigen Oberfläche Titans einfriert, Cassini weiterhin Untersuchungen im Orbit des zweitgrössten Planeten unseres Sonnensystems durchführt und dies bis mindestens 2008. So tragen beide Sonden auf ihre Art dazu bei, dass ein grosses Kapitel der Astronomie nach den ersten Erkenntnissen der *Voyager 2* Mission in den siebziger Jahren neu geschrieben werden kann.

5 Quellen

- <http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/>
- <http://cassini.capcave.com/esa/cassinihuygens/>
- <http://saturn.jpl.nasa.gov/home/>