

Ab dem Jahr 2030 soll die europäische Raumsonde JUICE den Riesenplaneten Jupiter, seine Monde und Ringe sowie sein Magnetfeld erkunden. Dabei werden besonders die großen Eismonde Kallisto, Ganymed und Europa intensiv erforscht. Sie sind hier maßstabsgerecht dargestellt.

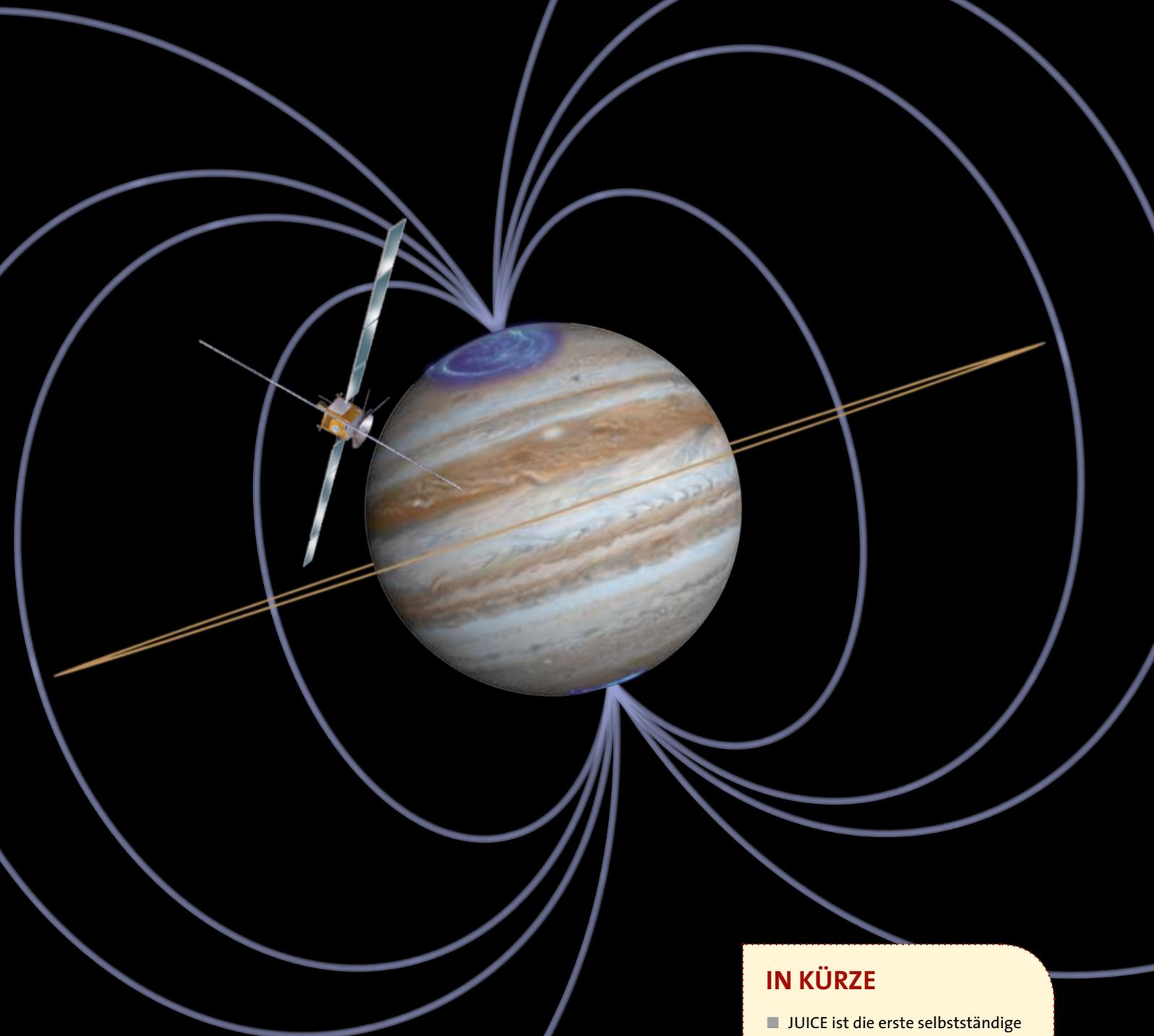
W I S wissenschaft
in die schulen!

[www.wissenschaft-schulen.de/
artikel/1069420](http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1069420)

Die europäische Mission **JUICE**

Der Jupiter Icy Moons Explorer besucht den König des Sonnensystems

Die erste europäische Jupitermission JUICE, der Jupiter Icy Moons Explorer, soll im Jahr 2022 starten und 2030 in eine Umlaufbahn um den Riesenplaneten eintreten. Ihr Fokus liegt auf der detaillierten Erkundung der drei großen Monde Kallisto, Ganymed und Europa.



Von Christian Gritzner

Erstmals möchte die European Space Agency ESA selbstständig Jupiter, den größten Planeten unseres Sonnensystems, und seine Monde mit einer eigenen Raumsonde erforschen. Dafür entwickelt sie die Mission JUICE, den »Jupiter Icy Moons Explorer«. Er soll sich im Juni 2022 auf den langen Weg zum Jupiter machen und dort acht Jahre später in eine Umlaufbahn um den Gasriesen einschwenken. Mit dieser anspruchsvollen Mission zieht die ESA als einzige Raumfahrtbehörde weltweit mit der US-amerikanischen NASA gleich, die bislang mehr oder weniger ein Monopol bei der Erkundung des äußeren Sonnensystems hatte.

Warum zum Jupiter?

Jupiter ist der Gigant im Sonnensystem und vereint rund zwei Drittel der Gesamtmasse des Planetensystems auf sich. Damit erreicht er in etwa ein Tausendstel der Sonnenmasse. Mit seinen 67 bekannten Monden, seinem Ringsystem und seinem starken Magnetfeld erinnert er schon an ein eigenes Sonnensystem im Kleinen. Die vier großen Galileischen Monde Io, Europa, Ganymed und Kallisto gingen für sich betrachtet schon als Planeten durch, würden sie nicht Jupiter umrunden.

Mit Ausnahme von Io werden die anderen drei Trabanten als potenzielle Orte für Leben angesehen, denn möglicherweise gibt es unter ihren Eiskrusten Wasser in

IN KÜRZE

- JUICE ist die erste selbstständige Mission Europas zur Erforschung des Jupiter und seiner Monde.
- Die Sonde soll Mitte 2022 losfliegen und Anfang 2030 in eine Umlaufbahn um den Gasriesen eintreten.
- Zum Missionsende im Juni 2033 wird sich JUICE in einer Kreisbahn um den größten Jupitermond Ganymed befinden und dann gezielt zum Absturz gebracht werden.



ESA

So könnte die Jupitersonde JUICE aussehen, wenn sie im Jahr 2030 beim Riesenplaneten ankommt. Derzeit ist ihre Konfiguration noch nicht endgültig festgelegt. Die weiße Antenne hat einen Durchmesser von drei Metern, die Sonde soll insgesamt 4,8 Tonnen wiegen. Solarzellen mit einer Gesamtfläche von rund 75 Quadratmetern dienen der Stromversorgung.

flüssiger Form. Verantwortlich dafür sind die starken Gezeitenkräfte des Riesenplaneten, die auf die ihn umrundenden Monde einwirken. Der innerste Mond Io besitzt kein Wassereis, dafür finden sich auf seiner Oberfläche mehrere hundert aktive Vulkane, die heiße Lava und Schwefelteilchen ausspucken.

Der Gasriese selbst ist von enormem wissenschaftlichem Interesse. Somit ist es nicht verwunderlich, dass bereits in den 1970er Jahren vier Raumsonden zu ihm aufbrachen. Den Auftakt machten 1973 und 1974 die beiden noch sehr einfachen Instrumententräger Pioneer 10 und 11, die erstmals ins nahe Umfeld des Planeten vordrangen. Sie übermittelten erste Detailbilder der dynamischen Jupiteratmosphäre und erste grobe Aufnahmen der vier Galileischen Monde. Zudem belegten ihre Messungen, dass das Magnetfeld des Planeten enorm stark ist und extrem intensive Strahlungsgürtel enthält. In ihnen würde ein ungeschützter Mensch innerhalb von wenigen Stunden an der Strahlenkrankheit sterben. Somit dürften die Jupitermonde niemals bemannt erforscht werden

Im Jahr 1979 passierten die Sonden Voyager 1 und 2 den Jupiter und übermittelten dabei Tausende von atemberaubenden Detailaufnahmen. Obwohl sie sich nur kurz in der unmittelbaren Nähe des Riesenplaneten und seiner Monde aufhielten, revolutionierten sie unser Bild vom König des Sonnensystems. Von der Erde aus waren schon seit Jahrhunderten

mit den größten Teleskopen die veränderlichen Wolkenstrukturen und der Große Rote Fleck beobachtet worden, aber nun wurde eine unglaubliche Detailtiefe erreicht. Eine große Überraschung waren die extrem unterschiedlichen Erscheinungsbilder der Monde: Keiner der vier großen Trabanten ähnelt dem anderen.

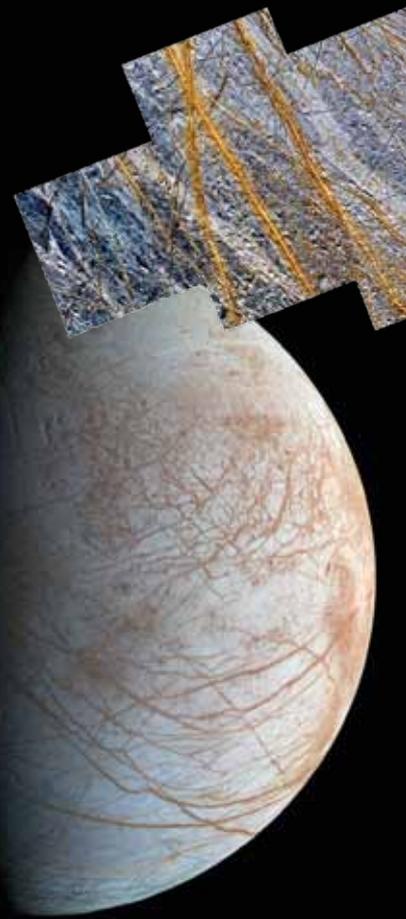
Die Voyager-Missionen hatten das wissenschaftliche und auch das öffentliche Interesse geweckt, und somit bereitete die US-Raumfahrtbehörde NASA die Jupitersonde Galileo vor. Sie umkreiste Jupiter als erster künstlicher Satellit. Geplant war, aus der Umlaufbahn für mindestens 20 Monate Bilder und Messdaten zur Erde zu funken. Der Start erfolgte nach vielen Verzögerungen 1989, und Galileo erreichte Jupiter im Juli 1995. Trotz einiger ernster technischer Probleme wie einer verklemmten Hauptantenne wurde Galileo ein riesiger Erfolg, und die Sonde übertraf die geplante Lebensdauer beträchtlich. Bis 2003 konnte sie Jupiter, seine Monde und sein Ringsystem systematisch und sehr detailliert untersuchen.

Erst durch Galileo erfuhren wir, wie abwechslungsreich und dynamisch die Vorgänge im Reich dieser Riesenwelt sind. Die Atmosphäre verändert sich innerhalb weniger Stunden und die vulkanische Aktivität auf dem Mond Io ist so extrem, dass manche Planetenforscher von einer Welt sprechen, die »geologisch Amok läuft«. Auf Io sind ständig mehr als 100 Vulkane gleichzeitig aktiv. Die glatte Oberfläche des

Die Eismonde von Jupiter

Ein Großteil der Informationen über die Hauptmonde des Jupiter stammt von der US-Raumsonde Galileo, die das Jupitersystem im Zeitraum von 1995 bis 2003 im Detail erforschte. Ganymed ist der größte Jupitermond und der größte Mond des Sonnensystems. Seine Oberfläche ist von zahlreichen Kratern sowie von hellen und dunklen Regionen bedeckt (rechts). Letztere weisen auf eine innere geologische Aktivität des Himmelskörpers hin. Ganz anders erscheint die Oberfläche von Kallisto (rechts unten): Sie ist von Tausenden von Kratern übersät und stammt offenbar aus der Frühzeit des Sonnensystems von vor mehr als vier Milliarden Jahren. Offenbar kam es auf diesem Mond nie zu größerer geologischer Aktivität.

Völlig anders zeigt sich Europa, der kleinste der vier großen Jupitermonde: Seine Oberfläche ist sehr glatt und weist nur sehr wenige Einschlagkrater auf. Charakteristisch für Europa sind die markanten, lang gezogenen Linien, in denen wahrscheinlich neues Material aus dem Inneren des Monds hervortrat.

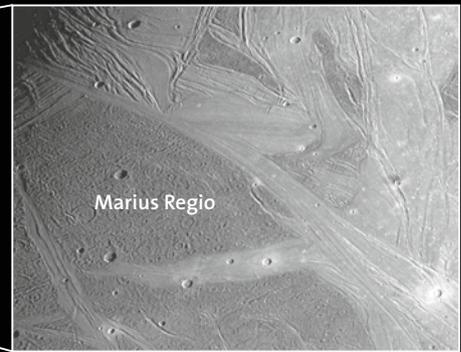


NASA / JPL-Caltech / SETI Institute



NASA

Galileo Regio



Marius Regio

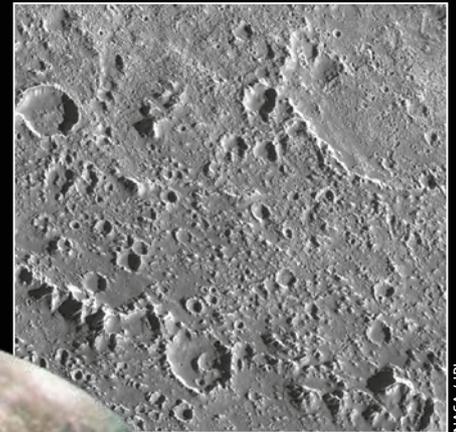
NASA / JPL / Brown University

Riesenmond Ganymed

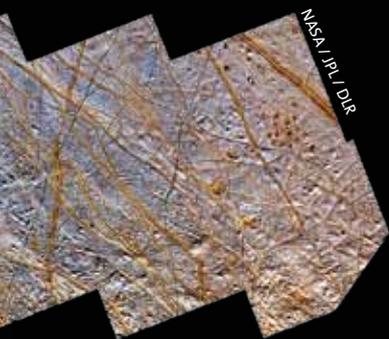
Von Nahem betrachtet, zeigt sich die Oberfläche von Ganymed in zahlreiche dunkle Schollen zerrissen, die von helleren Regionen mit ausgeprägten Rillen umgeben sind. Sie sind Hinweise auf eine innere geologische Aktivität. Vielleicht gab es auf Ganymed eine Plattentektonik ähnlich derjenigen auf unserer Erde. Der Trabant ist nach heutigem Wissensstand nicht mehr aktiv.

Kraterwüste Kallisto

Als »gefrorenes Fossil« bezeichnen manche Planetenforscher Kallisto, den äußersten der vier großen Jupitermonde. Ihre Oberfläche ist von Tausenden von Einschlagkratern bedeckt, sie ist offenbar sehr alt. Auf der Eiskruste hat sich dunkles Material abgelagert, dessen Zusammensetzung derzeit unbekannt ist und von JUICE analysiert werden soll.



NASA / JPL



NASA / JPL / DLR

Junge Europa

Schon auf den ersten Bildern der beiden Voyager-Sonden aus dem Jahr 1979 fiel der Mond Europa durch seine sehr helle und glatte Oberfläche auf. Beides weist auf eine aktive Geologie hin. Die charakteristischen langen Linien sind Brüche in der Eiskruste, an denen frisches Material an die Oberfläche gelangt ist (siehe Detailbild in Falschfarben oben).



NASA / JPL / DLR

Trabanten Europa zog die Forscher in ihren Bann, als andere Messungen der Sonde zeigten, dass sich unter der Eiskruste wohl ein Ozean aus flüssigem Wasser befindet.

Die Raumsonde Ulysses zur Erkundung des Sonnenwinds nutzte im Jahr 1992 die Schwerkraft von Jupiter, um aus der Ekliptik heraus auf eine Bahn über die Pole der Sonne zu gelangen. Dies war der erste europäische Vorstoß zum Jupiter. Beim Vorbeiflug erkundete Ulysses das Magnetfeld und die Strahlungsgürtel des Planeten, die Sonde besaß jedoch keine Kamera. Seitdem besuchten noch zwei Raumsonden Jupiter auf dem Weg zu anderen Zielen im Sonnensystem:

Im Dezember 2000 flog die Saturnsonde Cassini-Huygens am Planeten vorbei, und im Februar 2007 passierte New Horizons auf dem Weg zum Zwergplaneten Pluto den Jupiter. Im Jahr 2011 startete die NASA die Sonde JUNO, die als zweite Raumsonde Mitte 2016 in eine Umlaufbahn um Jupiter eintreten soll. Diese Mission fokussiert sich auf die Erkundung des Magnetfelds und der planetaren Atmosphäre. Eine Erkundung der Jupitermonde ist auch wegen der kurzen Einsatzdauer von rund einem Jahr nicht vorgesehen.

Der Weg zur eigenen Mission

Schon in den späten 1990er Jahren wurden in Europa erste Ideen für eine eigene Jupitermission diskutiert. Unter dem Namen Laplace wurde 2007 ein Konzept für ein solches Projekt vorgelegt, zeitgleich wurden in den USA die Studien Europa Orbiter und Jupiter System Observer ausgearbeitet. Aus diesen drei Projekten entstand schließlich der gemeinsame Missionsvorschlag EJSM-Laplace (Europa Jupiter System Mission). Das Projekt sah den Start von zwei Schwestersonden vor: Dabei würde die ESA die Sonde JGO, den Jupiter Ganymede Orbiter, und die NASA JEO, den Jupiter Europa Orbiter, bereitstellen. Beide sollten unabhängig voneinander gestartet werden und sich dann aber am Jupiter wissenschaftlich ergänzen.

Als sich die NASA 2011 aus finanziellen Gründen aus EJSM-Laplace zurückzog, war dies erstmal ein Schock für die europäische Planetenforschung. Daraufhin prüfte die ESA, ob ein wissenschaftlich sinnvoller, technisch machbarer und auch finanzierbarer Alleingang möglich wäre. Die Antwort fiel positiv aus, und somit war der Grundstein für die JUICE-Mission gelegt. Im Mai 2012 wählte das

Science Programme Committee der ESA den Missionsvorschlag JUICE als L1-Mission aus. L1 steht für die erste große Mission (L = large) im Cosmic Vision Programme der ESA. Die NASA führte später ihre Ideen als Europa Mission weiter, die Finanzierung der Gesamtmision steht aber noch aus. Kürzlich erfolgte aber schon die Auswahl von neun Instrumenten. Der Start könnte etwa Mitte der 2020er Jahre erfolgen.

Die Ziele von JUICE

Um die europäischen wissenschaftlichen Missionen in ein aufeinander abgestimmtes Konzept zu bringen, setzte die ESA das Cosmic Vision Programme auf. Es gibt den Wissenschaftsmissionen für die Jahre 2015 bis 2035 einen gemeinsamen Rahmen und ist eine Fortführung des vorausgegangenen Programms Horizon 2000. In diesem Programm wurden grundsätzliche Aufgaben und Ziele kommender Missionen zur Weltraumforschung definiert und gegeneinander abgewogen. Dabei spielt auch die Planetologie eine wichtige Rolle.

Für die Mission JUICE wurden zwei wissenschaftliche Hauptziele definiert: Die Sonde soll die Eismonde Europa, Ganymed und Kallisto detailliert erkunden und das Jupitersystem als solches erforschen. Aber wie lebensfreundlich können diese Monde sein und was verbirgt sich in ihren Tiefen?

Ganymed ist der größte Mond des Sonnensystems und übertrifft mit einem Durchmesser von 5276 Kilometern sogar den sonnennächsten Planeten Merkur. In seinem tieferen Inneren werden ein oder mehrere Ozeane aus flüssigem Wasser vermutet, und er ist der einzige Mond im Sonnensystem mit einem eigenen Magnetfeld. Somit sind die Wechselwirkungen seines Magnetfelds mit der Jupitermagnetosphäre von größtem Interesse. Auch die Eiskruste und ihre Bestandteile sollen untersucht werden, dabei möchten die Forscher mehr über deren Entstehung und Entwicklung herausfinden.

Bei Europa soll ebenfalls nach flüssigem Wasser unter dem Eispanzer gesucht werden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf aktiven geologischen Prozessen auf der Oberfläche, wie beispielsweise die Entstehung von Spalten in der Eiskruste oder aktive Geysire ähnlich wie auf dem Saturnmond Enceladus. Auch soll JUICE die detaillierte Zusammensetzung der Eiskruste bestimmen und daraus Schlüsse auf mögliches Leben im Ozean darunter ziehen.

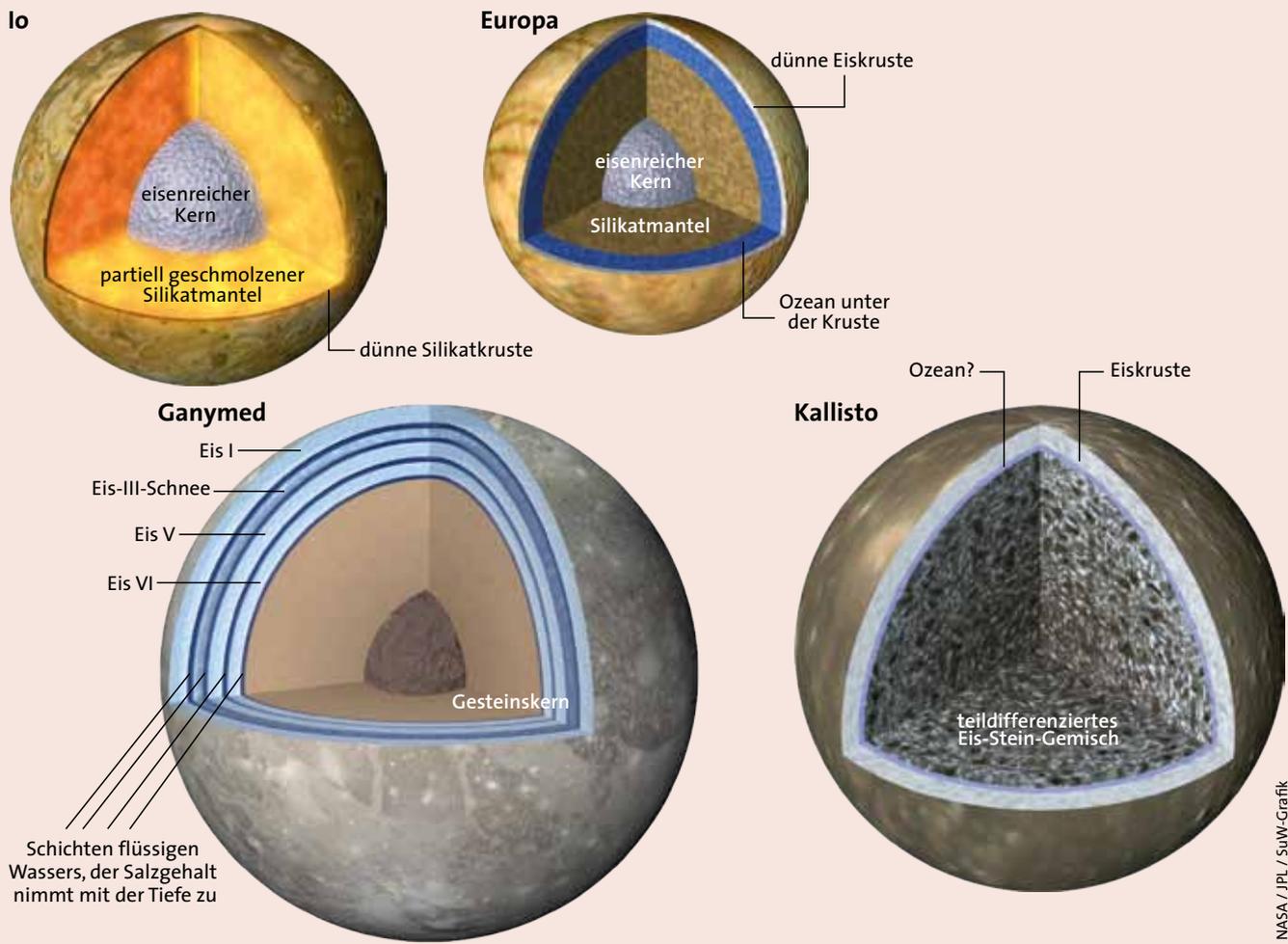
Das Innere der Galileischen Monde

Die vier Galileischen Monde unterscheiden sich nicht nur durch ihre Oberflächen, auch ihr jeweiliger innerer Aufbau trägt individuelle Züge. Io weist eine schwefelhaltige Kruste auf, die in einen wahrscheinlich weitgehend aufgeschmolzenen Mantel aus Silikatgesteinen übergeht. Im Zentrum befindet sich ein Eisenkern. Europa ist von einer Eiskruste umgeben (grau), darunter befindet sich mit großer Wahrscheinlichkeit ein Ozean aus flüssigem Wasser (blau). Darauf folgen ein Mantel aus Silikatgesteinen und ein Eisenkern. Das Innenleben von Ganymed ähnelt prinzipiell demjenigen seines inneren Nachbarn Europa. Unterschiedliche Modifikationen von Wassereis sorgen womöglich für mehrere alternierende Schichten aus Eis und flüssigem Wasser. Kallisto besteht aus einem Gemisch aus Wassereis und silikatischen Mineralen, sie besitzt wahrscheinlich keinen Eisenkern. Die Oberfläche wird von einer Eiskruste gebildet, darunter könnte sich eine dünne Schicht flüssigen Wassers befinden.

Kallisto ist ein Zeitzeuge aus der Frühzeit des Jupitersystems von vor mehr als vier Milliarden Jahren. Auf ihrer stark zerkraterten Kruste sind die Zeugnisse der Urzeit konserviert, da dieser Mond kaum Hinweise auf innere geologische Aktivität bietet. Auch bei Kallisto wird unter der Eiskruste ein Ozean vermutet, JUICE soll aber vor allem die Zusammensetzung der Kruste untersuchen.

Bei allen drei Eismonden könnte in den möglichen Wasserozeanen vielleicht Leben entstanden sein und sogar heute noch vorkommen. Allerdings kann JUICE dies nicht direkt überprüfen, wird aber durch indirekte Verfahren diese möglichen Lebensräume analysieren (siehe Kasten oben und S. 30).

Der innerste Galileische Mond Io wird von JUICE nicht angefliegen. In seiner Nähe erreicht die Strahlungsintensität des Jupitermagnetfelds ihr Maximum und könnte sogar die Elektronik der Sonde ernsthaft gefährden. Auch im Umfeld von Europa ist die Strahlungsdichte noch sehr hoch, daher wird JUICE nur zweimal dicht an diesem Mond vorbeifliegen.



NASA / JPL / SuW-Grafik

Neben den drei großen Eismonden widmet sich JUICE dem Riesenplaneten selbst und erkundet seine Atmosphäre und sein Magnetfeld, welches das stärkste im gesamten Sonnensystem ist. Von besonderem Interesse sind die Dynamik und die Zirkulation der Atmosphäre des Gasriesen und ihre chemische Zusammensetzung. Ein besonderes Augenmerk richtet JUICE auf den Großen Roten Fleck und die in ihm ablaufenden chemischen Prozesse. Auch die vertikale Schichtung der Jupiteratmosphäre soll gezielt untersucht werden.

Das mächtige Magnetfeld ist von enormem Interesse. Es ist ein schneller magnetischer Wirbel und verhält sich wie ein Teilchenbeschleuniger. JUICE soll die Wechselwirkungen des Felds mit seinen Strahlungsgürteln und mit den Monden als Quellen und Senken von magnetischem Plasma erkunden. Das Jupitermagnetfeld ist etwa 20-mal so stark wie das der Erde.

Das dünne Jupiter-Ringsystem ist ein Ergebnis der starken vulkanischen Aktivität auf Io, denn die dortigen Vulkane stoßen schwefelhaltiges Material mit Fluchtge-

windigkeit aus, das in das Ringsystem gerät und sich dort ansammelt. JUICE wird die Ringe und die in ihnen umlaufenden vier kleinen Monde Amalthea, Adrastea, Metis und Thebe erforschen. Über diese Monde konnten die Vorgängermissionen nur wenig in Erfahrung bringen.

Bei europäischen Wissenschaftsmissionen werden üblicherweise die Aufgaben zwischen der ESA und den teilnehmenden Staaten aufgeteilt. Bei JUICE ist die ESA zuständig für das Gesamtmanagement, die Entwicklung und die Fertigung der Sonde, sowie deren Start, Betrieb und die Datenarchivierung. Hierzu vergibt die Raumfahrtbehörde auch größere Aufträge an die Industrie. Nach der Auswahl von JUICE als L1-Mission beauftragte die ESA zwei separate Industriestudien, um das Flugsystem weiter zu definieren. Die Konzepte wurden dann hinsichtlich zahlreicher Kriterien verglichen.

Im Juli 2015 gab die ESA bekannt, dass Airbus Defence & Space in Frankreich den Zuschlag erhielt, als Hauptauftragnehmer für die Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Integration, Test, Startkampagne und

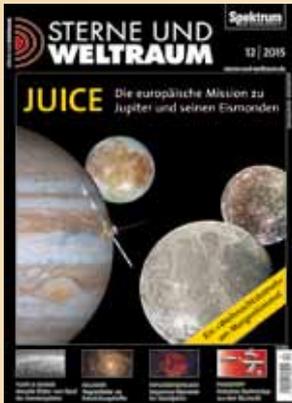
Inbetriebnahme zuständig zu sein. Der Start der Sonde ist nicht Bestandteil des Vertrags und wird später mit dem Satellitentransportunternehmen Arianespace vereinbart. JUICE entsteht unter Mitwirkung vieler ESA-Mitgliedstaaten in Toulouse, dabei ist der deutsche Anteil besonders groß.

Die wissenschaftliche Ausrüstung

Die Instrumente werden durch die Teilnehmerstaaten bereitgestellt. Sie organisieren auch deren Betrieb und die Datenauswertung. Hierfür sind die PI-Teams verantwortlich, PI steht für Principal Investigator, also den verantwortlichen Leiter des Instruments. Zur Finanzierung der Geräte dienen Mittel der entsprechenden nationalen Raumfahrtagenturen sowie Eigenmittel der beteiligten Institute. Dafür werden auch Aufträge an Industriefirmen vergeben. Aus den definierten wissenschaftlichen Zielen wurden die technischen Anforderungen an die Geräte abgeleitet. Sie dienen als Grundlage für eine Ausschreibung von Vorschlägen.

Für die Instrumente reichten mehrere internationale Konsortien unterschiedlich-

★ **Wissen verschenken und Freude bereiten – mit einem Geschenk-Abonnement!**



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung.

12 AUSGABEN, € 89,-
(ERMÄSSIGT € 67,80)



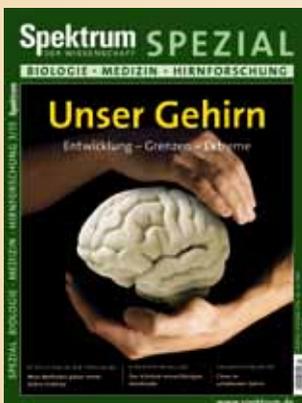
Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie.

12 AUSGABEN, € 89,-
(ERMÄSSIGT € 69,90)



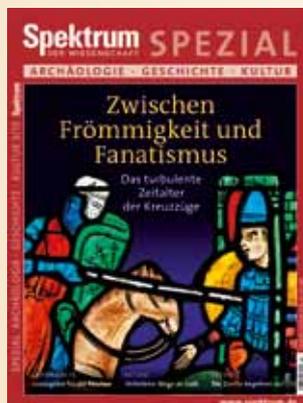
Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin.

12 AUSGABEN, € 85,20
(ERMÄSSIGT € 68,40)



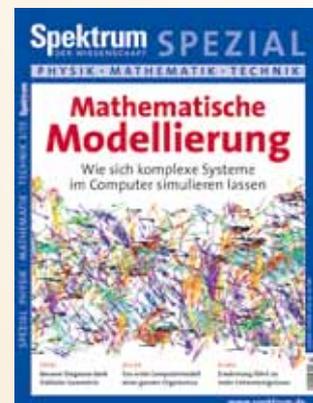
Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751, E-Mail: service@spektrum.de,

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogstraße 3–5, 69126 Heidelberg



+ GRUSSKARTE



Ein ganzes Jahr Freude:

Schenken Sie ein Magazin mit anspruchsvollen Artikeln über die neuesten internationalen Entwicklungen aus allen Bereichen der Wissenschaft und Forschung.

Mit Grußkarte:

Der Beschenkte erhält das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen. Auf Wunsch auch zu Weihnachten.

Plus Geschenk zur Wahl:

- 1 Kalender »Himmel und Erde 2016«
- 2 Spiel »Dog Compact«
- 3 Reisetheil-Shoulderbag »Stamp«
- 4 Buch »Den Kopf frei machen und so bleiben«
- 5 DVD »Die Tricks der Pflanzen«
- 6 Füllhalter »Kaweco Sport«

+ EIN GESCHENK FÜR SIE



Die Messinstrumente von JUICE

Name	Instrument	Zentrale Forschungsziele
3GM	Radio Science	Innerer Aufbau von Ganymed, Nachweis eines Ozeans und anderer Schwereanomalien; Oberflächeneigenschaften von Ganymed und Kallisto; Atmosphärenforschung an Jupiter und den Monden sowie Untersuchung des Ringsystems
GALA	Laser Altimeter	Entfernungsmessung zur Bestimmung der Topografie und der Gezeitenverformung von Ganymed – dadurch soll es möglich sein, die Wasserozeane eindeutig nachzuweisen.
JANUS	Kamerasystem	Beobachtung lokaler geologischer Prozesse der Eismonde, Aufnahmen von Io und der Jupiteratmosphäre; Bestimmung der globalen Oberflächenmorphologie von Ganymed – global bis regional bei Kallisto und Europa; physikalische und dynamische Eigenschaften der kleinen Monde und der Ringe
J-MAG	Magnetometer	Untersuchung von Ganymeds Magnetfeld und dessen Wechselwirkungen mit dem Jupitermagnetfeld; Messung induzierter Magnetfelder als Hinweis auf unterirdische Ozeane der Eismonde
MAJIS	Abbildendes hyperspektrales VIS-IR-Spektrometer	Analyse von Zustand und Zusammensetzung des Eises und der nicht eishaltigen Bestandteile der Monde; Verfolgung von troposphärischen Wolkenmerkmalen, Aerosolen, Hot Spots und der Aurora der Jupiteratmosphäre
PEP	Partikel Package	Plasmazusammensetzung und -verteilung in der Jupitermagnetosphäre; Wechselwirkungen der Magnetosphären von Jupiter und Ganymed; Beobachtung von Plasma- und neutralen Atombereichen um Europa und Io; Charakterisierung der Exo- und Ionosphären der Monde und deren Reaktionen mit dem Plasma
RIME	Radar	Analyse des Untergrunds der Eismonde; Suche nach warmen Taschen und Strukturen im Eispanzer; Suche nach Übergängen von flüssigem Wasser zu Eis
RPWI	Radio- und Plasmawellen-Instrument	Erkundung der Exo- und Magnetosphäre von Ganymed; bei Europa und Kallisto: Untersuchung von induziertem Magnetfeld und der Plasmaumgebung; Studium der Jupitermagnetfelds und der Wechselwirkungen mit den Monden
SWI	Submillimeter-Instrument	Erforschung der Dynamik der Jupiteratmosphäre; Aufnahme vertikaler Wind- und Temperaturprofile; Zusammensetzung und Struktur der Exosphäre der Eismonde
UVS	Abbildender UV-Spektrograf	Zusammensetzung, Struktur und Dynamik der Atmosphäre von Jupiter und den Eismonden und deren Interaktion mit Jupiters Magnetosphäre und Plasma; Suche nach Wasserdampffontänen und Geysiren

cher europäischer Partner auch mit weltweiter Beteiligung bei der ESA ihre Konzepte ein. Sie wurden daraufhin analysiert, bewertet und schließlich 2013 ausgewählt. Insgesamt werden zehn Instrumente auf JUICE mitfliegen, die gemeinsam die gesetzten wissenschaftlichen Ziele am besten abdecken und sich dabei teilweise ergänzen. Gleichzeitig berücksichtigte die ESA dabei die jeweils in den Institutionen vorhandene Fachkompetenz und Projekterfahrung (siehe Tabelle oben).

Zwei Instrumente werden unter deutscher Leitung entwickelt: das Laseraltimeter GALA durch das Institut für Planetenforschung des DLR in Berlin-Adlershof und das Submillimeterwelleninstrument SWI durch das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen. An fast allen anderen Instrumenten gibt es auch eine deutsche Beteiligung.

Die Grundlagen für die Planung der Sonde und ihrer Instrumente waren neben den wissenschaftlichen Zielen auch die vorgegebenen Randbedingungen des Missionsprofils und die technischen Anforderungen. Darin gab die ESA für alle Elemente gewisse Eckdaten für Masse, Energiebedarf, Abmessungen und so weiter vor, wobei allerdings Reserven vorgehalten sind. Während der Entwicklung müssen diese Vorgaben streng eingehalten werden.

Sollte sich dies auch mit großem Aufwand als unmöglich herausstellen, so muss nach anderen Lösungen gesucht werden. Problematisch dabei ist, dass fast alle technischen Lösungen eine Erhöhung der Masse und des Energiebedarfs bewirken. In der Systementwicklung laufen daher viele Iterationen ab, teilweise sogar parallel, die vom Management überblickt und gesteuert werden müssen. Schließlich muss bis zum Start ein funktionierendes System herauskommen, das die Anforderungen zu 100 Prozent erfüllt.

Das Design der Raumsonde

Für JUICE gab die ESA detaillierte technische Anforderungen vor: Die Sonde ist drei-Achsen-stabilisiert, und ihre elektrische Energie erhält sie aus Solargeneratoren, die in Jupiterentfernung rund 700 Watt an Leistung liefern müssen. Es ist eine große Sende- und Empfangsantenne vorgesehen, ein Parabolspiegel mit drei Meter Durchmesser, der im X- und Ka-Band überträgt. Zum Empfang der Bilder und Messdaten dient das ESA-Netzwerk ESTRAC. Die Übertragungskapazität soll mehr als 1,4 Gigabit pro Tag betragen. Die Strahlungstoleranz der Elektronik muss bei 50 Kilorad liegen.

Insgesamt soll JUICE eine Geschwindigkeitsänderung von 2700 Metern pro Sekunde durchführen können, um zunächst

in eine Umlaufbahn um Jupiter einzuschwenken und schließlich einen Orbit um Ganymed zu erreichen. In diese Bilanz gehen auch alle weiteren Steuermanöver ein. JUICE wiegt ohne Treibstoffe 1800 Kilogramm, die Startmasse soll bei etwa 4800 Kilogramm liegen. Davon entfallen auf die wissenschaftlichen Instrumente rund 104 Kilogramm.

Bei der technischen Umsetzung müssen einige spezielle Gegebenheiten dieser Mission berücksichtigt werden: So herrschen in der 5,2-fachen Entfernung Erde–Sonne recht tiefe Temperaturen im Bereich von –100 Grad Celsius. Um dieses Problem zu lösen, benötigt die Sonde sowohl Isolierungen als auch Heizelemente. Beide Maßnahmen erhöhen aber die Masse von JUICE und verbrauchen auch zusätzliche elektrische Energie.

Auf dem Weg zum Jupiter wird JUICE nahe an der Venus vorbeifliegen und sich dabei der Sonne auf rund 90 Millionen Kilometer annähern, also etwa 60 Prozent des Abstands Erde–Sonne. Die Sonde muss also so konstruiert sein, dass sie diesen Hitzeschub verkraftet. So kann sie die überschüssige Wärme durch Radiatoren schnell genug abstrahlen. In Jupiterentfernung beträgt die eingestrahlte Sonnenenergie pro Fläche nur noch $\frac{1}{27}$ des Werts auf der Erde, etwa 50 Watt pro Quadratmeter. Für eine Leistung von rund

700 Watt ergibt sich unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads der Solarzellen eine recht große Generatorenfläche von etwa 75 Quadratmeter. Damit die empfindlichen Bauteile wie Elektronik und Sensoren die starke Partikelstrahlung im Jupitersystem aushalten, werden diese speziell dafür ausgelegt und entsprechend abgeschirmt. Alle anderen Bauteile müssen strahlungsresistent sein.

Zum Betrieb von JUICE nach dem Start ist ein Mission Operations Center (MOC) notwendig. Dieses arbeitet mit dem Science Operations Center (SOC) zusammen, das sich um den Betrieb der Instrumente kümmert und sich dafür mit den Wissenschaftlerteams abstimmt. Das SOC koordiniert die lang-, mittel- und kurzfristige Planung der wissenschaftlichen Arbeiten und organisiert das Zusammenspiel der verschiedenen Instrumente.

Für die Kommunikation mit JUICE wird das Antennen-Netzwerk ESTRACK eingesetzt, das 20 unterschiedlich große Antennen weltweit umfasst. Für ihre interplanetaren Missionen errichtete die ESA ab dem Jahr 2000 drei 35 Meter große Radioantennen in New Norcia, Australien, in Cebreros, Spanien, und in Malargüe, Argentinien. Derzeit werden sie für Missionen wie Mars Express und Rosetta genutzt. In Zukunft sollen sie neben JUICE bei der Merkursonde Bepi Colombo verwendet werden, die im Frühjahr 2017 starten wird. Zudem kommen sie in internationaler Zusammenarbeit zum Einsatz, beispielsweise bei der japanischen Asteroidenmission Hayabusa-2 und bei Kooperationen mit den USA, Russland und China.

Der lange Weg zum Jupiter

Als Trägersystem für den Start am 1. Juni 2022 ist eine Ariane 5 ECA vorgesehen. Sie ist die leistungsstärkste europäische Trägerrakete, aber ihre Schubkraft reicht dennoch nicht aus, JUICE auf den direkten Weg zum Jupiter zu bringen. Um zu ihm zu kommen, benötigt die Sonde drei Fly-by-Manöver an der Erde und eines an der Venus. Daraus ergibt sich eine recht lange Flugzeit von siebeneinhalb Jahren. Sollte sich das Startfenster 2022 nicht erreichen lassen, so sind in den Folgejahren alternative Flugrouten möglich. Dann könnte je nach den Konstellationen der Planeten neben der Erde und der Venus auch noch der Mars als Fly-by-Ziel angesteuert werden. Allerdings ist die Reisezeit bei den späteren Startterminen noch länger.

Die Ankunft beim Riesenplaneten

JUICE soll nach den derzeitigen Plänen am 20. Januar 2030 in eine Umlaufbahn um Jupiter einschwenken. Dabei passiert sie zunächst den massereichsten Mond Ganymed und leitet rund sieben Stunden später das Bremsmanöver mit ihrem Bordantrieb ein. Für die Jupiter Orbit Injection muss das Antriebssystem der Sonde die Geschwindigkeit relativ zum Planeten um rund 900 Meter pro Sekunde reduzieren. Der vorangegangene Vorbeiflug an Ganymed erlaubt es, dabei rund ein Neuntel des insgesamt benötigten Treibstoffs zu sparen – das Manöver reduziert die Geschwindigkeit von JUICE relativ zu Jupiter um etwa 300 Meter pro Sekunde.

Danach ist JUICE im Schwerefeld von Jupiter gefangen und kann den Riesenplaneten erkunden. Bei ihren Umläufen kommt die Sonde immer wieder nahe an den drei

Jeder Bundesbürger bezahlt für die europäische Jupitermission JUICE nur rund zwölf Cent pro Jahr.

Eismonden vorbei. Im September 2032 tritt sie schließlich in eine 500 Kilometer hohe Umlaufbahn um Ganymed ein und soll ihn für mindestens 280 Tage bis Juni 2033 umrunden. Dann ist das geplante Missionsende erreicht. Je nach Zustand der Sonde und der Menge des noch vorhandenen Treibstoffs an Bord könnte jedoch eine Verlängerung der Mission möglich sein. Zum Missionsende ist es geplant, die Umlaufbahn der Sonde um Ganymed immer weiter abzusenken, bis JUICE schließlich auf der Oberfläche des Mondes zerschellt.

Dabei darf die Sonde nicht die Oberfläche von Ganymed biologisch verseuchen. Der Mond ist ein Himmelskörper der Planetary Protection Category 2. Falls auf ihm eine Sonde abstürzt, so ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich irdische Mikroben dort wohlfühlen, sich vermehren und so zu Bio-Invasoren werden. JUICE wird unter strengen Reinraumbedingungen montiert und zudem werden die Bauteile vor dem Einbau auch sterilisiert. Gegenüber einem solchen Montagereinraum sind gewöhnliche Operationssäle in Kliniken regelrecht dreckig. Außerdem dürfte sich der jahrelange Aufenthalt von JUICE in den Strahlungsgürteln des Jupiter für etwaige mitgereiste Mikroben als tödlich erweisen. Dagegen gehört der Mond Europa zur wesentlich strengeren Kategorie 3, so dass eine Kollision mit ihm unbedingt zu vermeiden ist. Allerdings

sind nur zwei Vorbeiflüge an Europa vorgesehen, und die Steuermanöver im Jupitersystem werden schrittweise durchgeführt. So lässt sich eine Kollision selbst bei einem technischen Fehler mit großer Wahrscheinlichkeit ausschließen.

Wie groß ist der finanzielle Aufwand?

Derzeit setzt die ESA für die Mission JUICE Kosten in Höhe von 830 Millionen Euro an. Rund 200 Millionen Euro werden noch für die europäischen Instrumente benötigt, und die NASA will sich mit 100 Millionen Dollar beteiligen. Der größte Teil des Gesamtbetrags entfällt auf die Entwicklungs- und Startkosten, der Betrieb der Sonde macht nur etwa zehn Prozent aus. Der Durchschnittswert pro Jahr liegt somit bei rund 50 Millionen Euro in den 20 Jahren vom Beginn der Vorstudien bis zum Ende

der Mission. Für Deutschland betragen die jährlichen Kosten rund zehn Millionen Euro, das heißt, jeder Bundesbürger bezahlt für JUICE nur rund zwölf Cent pro Jahr – eine wohl erträgliche Belastung. Zum Vergleich: Jährlich bezuschussen der Bund und die Länder in Deutschland Theater und Opernhäuser mit rund 2,5 Milliarden Euro, dieser Betrag entspricht etwa dem Doppelten des deutschen Raumfahrtbudgets.

Die europäische Mission JUICE ist ein Meilenstein der Planetenforschung und wird unser Wissen über das Jupitersystem stark erweitern. Und vielleicht liefert die Sonde auch entscheidende Antworten auf die Frage nach der Entstehung und Entwicklung des Lebens im Weltraum und auf unserer Erde. 

Dieser Artikel und Weblinks im Internet:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1372222



CHRISTIAN GRITZNER ist Raumfahrt-Ingenieur und arbeitet im DLR-Raumfahrtmanagement, Abteilung Extraterrestrik, in Bonn. Im Jahr 1999 veröffentlichte er

ein Sachbuch mit dem Titel »Kometen und Asteroiden« und 2011 mit vier Kollegen das Buch »Warum nimmt der Mond zu und ab?«.