

5 ZIELE FÜR DIE RAUMFAHRT

Was die Erforscher des Sonnensystems wissen wollen und wie die Raumfahrtorganisationen dafür sorgen sollten, dass sie es erfahren

Von George Musser

Die Kinder des Weltraumzeitalters wären mehr als erstaunt, wenn sie ein Buch über das Sonnensystem aus der Zeit um 1957 aufschlagen würden. Vor dem Beginn der Sputnik-Ära nämlich kannten wir weder die Schluchten des Roten Planeten, neben denen der Grand Canyon wie ein Straßengraben wirkt. Noch hatten wir je Bilder der großen Vulkane auf dem Mars gesehen,

neben denen selbst der Mount Everest als sanfter Hügel erschiene. 1957 spekulierte man noch, ob sich unter der dichten Wolkenhülle der Venus ein dampfender Dschungel, eine trockene Wüste, ein mit Kohlensäure angereicherter Ozean oder schlicht eine Oberfläche aus Teer verbirgt. Die Wahrheit lautet: Die Venusoberfläche ist vulkanisches Ödland, eine Sintflut geschmolzenen Gesteins. Traurig muten auch alte Aufnahmen des Saturns an. Sie zeigen zwei unscharfe Ringe, wo wir heute über hunderttausend kennen. Auch von Methanseen und Staubgeysiren auf den Monden der Riesenplaneten war damals noch lange nicht die Rede. Und niemand hatte unsere Erde je aus der Distanz gesehen: als



ALLE BILDER: NASA, AUSSER RECHTE SPALTE, 2. BILD VON OBEN (VANGUARD EXPLOSION): US NAVY

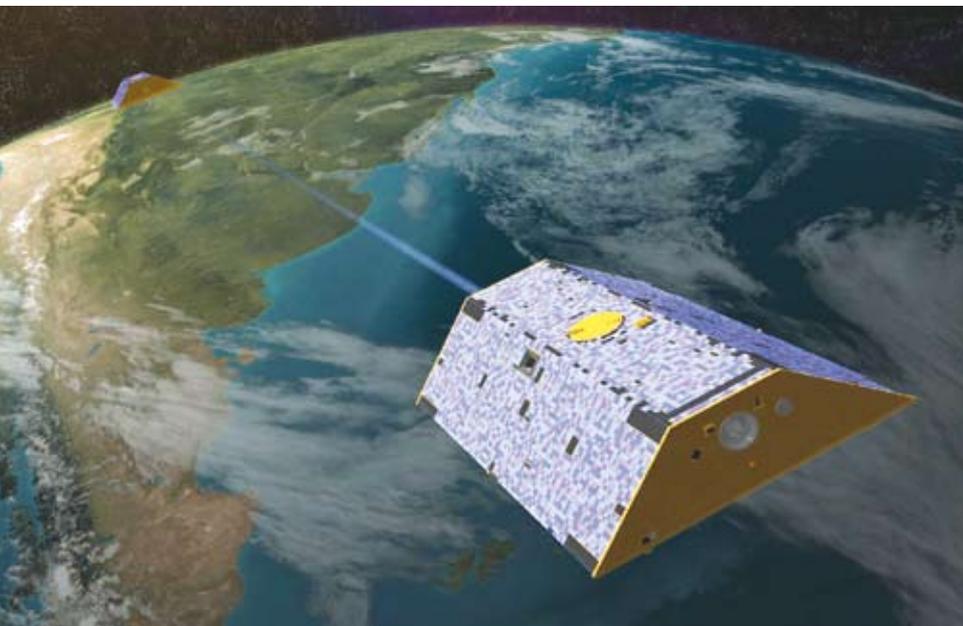


ILLUSTRATION: NASA, JPL

Das durch Mikrowellenfunk verbundene Satellitenduo Gracemisst Veränderungen der Gravitation, die durch Wasserbewegungen verursacht werden. Seit 2002 ist es im Orbit und hat seine auf fünf Jahre ausgelegte nominelle Lebensdauer bereits überschritten. Entwickelt wurde es von der Nasa gemeinsam mit dem DLR.

blaue Murmel auf schwarzem Samt, umgeben nur von einer hauchdünnen, verletzlichen Schicht aus Wasser und Luft.

Dieses Wissen hat uns verändert. Dank einer neuen Perspektive auf die Erde verstehen wir besser, wie sehr der Mensch seine Umwelt beeinflusst. Jüngste Entdeckungen im Sonnensystem treiben uns an, immer mehr über unsere Nachbarwelten im All in Erfahrung zu bringen. Sogar neue Gefahren tauchen aus dem All auf: Die schiere Möglichkeit, dass Asteroiden auf unseren Planeten treffen könnten, ist heute Grund genug, uns mit Abwehrmaßnahmen zu beschäftigen.

Zuständig für das Abarbeiten des Aufgabekatalogs ebenso wie für die Visionen sind vor allem die großen Weltraumorganisationen. Allen voran die US-Raumfahrtbehörde Nasa,

die mit einem Jahresbudget von derzeit 16,8 Milliarden Dollar ausgestattet ist. Bis zu 60 Prozent davon fließen allerdings in die wissenschaftlich eher unergiebigere bemannte Raumfahrt. Allein der bis 2020 anstehende bemannte Flug zum Mond soll bis zu 100 Milliarden Dollar verschlingen. Das Jahresbudget der Europäischen Weltraumorganisation Esa hingegen erreicht 2007 bescheidene 3 Milliarden Euro. Hightech soll die Europäer trotzdem auf Augenhöhe mit den USA bringen. Ebenfalls mit im Spiel sind Russland, China, Japan und Indien. Immer öfter wird auch gemeinsame Sache gemacht. Drohen Missionen an den Finanzen zu scheitern, werden Eitelkeiten zumeist hintangestellt.

Am schwersten hat es derzeit die Nasa. »Sie ringt um ihre Identität«, sagt Anthony Janetos vom Pacific Northwest National Laboratory. Janetos gehört einem Ausschuss des amerikanischen Wissenschaftsrats (*National Research Council, NRC*) an, der das Erdbeobachtungsprogramm der Nasa überwacht. Denn die Behörde kann nicht alles gleichzeitig leisten, was von ihr verlangt wird: bemannte Raumfahrt, Erforschung des Sonnensystems und des Kosmos, Erdbeobachtung und Umweltschutz.

US-Präsident George W. Bush hatte ihr zwar 2004 ein klares Ziel gesetzt: Fuß zu fassen auf Mond und Mars. Um die Finanzierung zu stemmen, riss die Nasa mittlerweile aber sogar die Brandmauer ein, die zwei ihrer Aufgaben – das Wissenschaftsprogramm und die bemannte Raumfahrt – bislang vor Kostenexplosionen des jeweils anderen geschützt hat. Trotzdem: Die Raumfahrtbehörde hat weiterhin schlicht »nicht genug Geld, um alles zu tun, wozu sie aufgefordert ist«, so Nasa-Strategie Bill Claybaugh.

DIE ZUKUNFT DER NASA-RAUMFAHRT

1957 startete überraschend der sowjetische Sputnik – die USA waren nur die Nummer 2 im All. Auch heute steht die Raumfahrt der Nasa wieder vor dramatischen Entwicklungen.

Der Start von Sputnik im Oktober vor 50 Jahren hat Spuren hinterlassen. Schließlich hatten sich die Vereinigten Staaten damals schon als erste Nation gesehen, die eine Raumsonde ins All befördern könne. Doch anders als etwa der Mord an John F. Kennedy oder die Attentate vom 11. September 2001, die sich tief ins kollektive Gedächtnis Amerikas eingebrannt haben, war der Start des sowjetischen Satelliten weit weniger einschneidend.

Natürlich: Wer möchte schon, dass plötzlich ein kleiner leuchtender Ball hoch über das eigene Land fliegt – gesteuert von einem Gegner, der im Kalten Krieg auch mit nuklearen Waffen drohen konnte –, ohne dass sich dagegen etwas unternehmen ließe? Trotzdem verbanden sich mit dem Aufbruch ins Raumfahrtalter – egal,

wer ihn als Erster unternahm – vielerlei Hoffnungen. Die Menschheit erhebt sich endlich aus ihrer Wiege, jubelten Visionäre. Bald würde sie den Sternen zustreben. Pragmatiker hofften auf Kommunikations- und Wettersatelliten. Selbst heute noch entfaltet der Lichtpunkt, der vor einem halben Jahrhundert am Abendhimmel vorüberzog, seine Wirkung: Nicht wenige Wissenschaftler und Ingenieure führen ihre Leidenschaft für den Weltraum auf genau jenes Ereignis zurück. »Jahrtausendlang schon blickt die Menschheit zu den Sternen, doch niemals bot der Himmel ein solch überwältigendes Schauspiel wie im Jahr 1957«, schrieben die Astronomen Fred Whipple und J. Allen Hynek damals.

Auch heute, fünfzig Jahre später, stehen dem US-Weltraumprogramm wieder aufregende Zeiten bevor. Schon in zehn Jahren wird es kaum wiederzuerkennen sein. Der Spaceshuttle – trotz all seiner Schwächen das raffinierteste jemals entwickelte Fluggerät – wird der Vergangenheit angehören. Zunehmend bündelt die US-

Doch auch andere Raumfahrtationen lassen Projekte aus Kostengründen in der Schublade verschwinden. Welche der vielen Vorhaben aber sind tatsächlich wünschenswert? Was kann und sollte man sich von den Programmen der Planetenforschung in aller Welt erhoffen? Fragen wie diese legen sich die Ausschüsse des NRC regelmäßig vor. Fünf Prioritäten haben sie identifiziert und geben damit einen langen Weg vor – hier zeigen wir, welcher Teil der Strecke noch vor Nasa, Esa & Co. liegt.

JESSE ALLEN, EARTH OBSERVATORY / NASA / JUSUS ERGOS DATA CENTER



1 Überwachung des irdischen Klimas

Rover, die über den Mars rollen, oder erste Blicke unter den Dunstschleier von Titan sind aufregender als das mühselige Geschäft der Erdbeobachtung. Nicht allzu verwunderlich also, dass das wichtige Thema von der Nasa und der US-Behörde für Ozeane und Atmosphäre, NOAA, vernachlässigt wurde. Schon 2005 hatte der entsprechende NRC-Ausschuss zwar auf das »vom Kollaps bedrohte« System von US-Umweltsatelliten hingewiesen. Dennoch leitete die Nasa binnen fünf Jahren 600 Millionen Dollar aus den Erdbeobachtungsbudgets in Kassen für die Raumfähren und die Raumstation ISS um.

Das hat Folgen. Weil das »National Polar-Orbiting Operational Environment Satellite System« (NPOESS) sein Budget überschritt, wurden nun Instrumente gestrichen, die klimarelevante Daten hätten messen sollen. Kritisch ist auch die Situation der zwei Dutzend Eos-Satelliten: Das »Earth Observation System« wird das Ende seiner erwarteten Lebensdauer erreichen, bevor Ersatz bereitsteht.

»Wir dürfen nicht warten, bis alles auseinanderfällt«, sagt Robert Cahalan, Leiter des Bereichs Klima am Goddard Space Flight Center, dem größten der Nasa-Raumflugzentren. Denn der Schaden wäre nicht wiedergutmachen. Wer komplexe Trends in der Atmosphäre ermitteln will, scheitert leicht an Datenlücken. Außerdem werden die Daten unzuverlässig. Wenn etwa ein neues Instrument eine hellere Sonne zu sehen glaubt als noch sein Vorgänger: Liegt dann tatsächlich ein (sonnen-)physikalisches Phänomen vor oder ist einfach nur eines der Instrumente schlecht kalibriert? Ohne zeitlich überlappende Messreihen lässt sich diese Frage kaum eindeutig beantworten.

Kleine Lücken gibt es bereits. Dem Landsat-System, das die Erdoberfläche seit 1972

Feuer in Alaska und im kanadischen Yukon-Territorium im Jahr 2004. Aufgenommen wurde dieses Bild in verschiedenen Wellenlängen von Landsat 7. Seit im Jahr 2003 der Scan Line Corrector des US-Satelliten ausfiel, der dessen Vorwärtsbewegung kompensiert, liefert Landsat 7 Daten geringerer Qualität. Ersatz gibt es nicht, denn schon seit über einem Jahrzehnt kämpft das Landsat-Programm mit Budgetproblemen.

Raumfahrtbehörde Nasa ihre Aktivitäten im Constellation-Programm, das Astronauten zu Mond und Mars bringen soll. Kein schlichter Pendelverkehr zwischen Erde und Internationaler Raumstation mehr, sondern die Errichtung einer Basisstation auf dem Mond, der Besuch eines Asteroiden und schließlich die Gründung menschlicher Siedlungen auf dem Mars sind die hochgesteckten Ziele. Seinen langsamen, aber stetigen Kurs hofft Nasa-Chef Michael Griffin auch bei begrenzten Budgets nicht verlassen zu müssen – bis 2020 sollen wieder Menschen auf dem Mond landen.

Umwälzungen versprechen die kommenden Jahrzehnte auch in der Planetenforschung. Die Pionierjahre, in denen man sich einen ersten Überblick über das Sonnensystem verschaffte, sind vorbei. Mittlerweile sind die Weltraumorganisationen auf – manchmal im Wortsinn – tiefer schürfende Untersuchungen aus. Noch unbeantwortet ist schließlich auch die wohl wichtigste Frage, ob es in Reichweite unserer Raumsonden Leben gibt oder zumindest gege-

ben hat. Manche Monde etwa von Jupiter und Saturn könnten dem Leben recht freundlich gesinnt sein.

2057 schließlich werden die Zeiten noch einmal andere sein. Die strikte Trennlinie zwischen bemannter Raumfahrt und Robotermissionen dürfte sich bis dahin längst verwischt haben. Schließlich stoßen automatisierte Missionen schon jetzt an Grenzen, die nur Astronauten werden überschreiten können. Derzeit allerdings tut erst einmal Stabilität not. Die Schwankungen, die das Nasa-Budget in den letzten Jahren erlebte, haben ebenso wie wechselnde Strategien, die die gesamte Behörde betrafen, manches Projekt in die Sackgasse geführt und manche Anstrengung fruchtlos bleiben lassen. Darum ist nichts wichtiger, als die Prioritäten für die nächsten Jahrzehnte klar im Auge zu behalten.

Steven Ashley und George Musser

Die Autoren sind Redakteure bei Scientific American.



ILLUSTRATION: ESA / ASES MEDIAL AB

Im Rahmen der Don-Quixote-Mission könnte der Orbiter Sancho (rechts) die Folgen des Einschlags von Hidalgo auf einen Asteroiden beobachten.

In Kürze

- ▶ **Fünf wichtige Ziele**, so sagen Forscher, sollten die Raumfahrtorganisationen in den kommenden Jahrzehnten in den unbemannten Missionen verfolgen. Die Stichworte: Erdbeobachtung, Asteroidenabwehr, Suche nach Leben, Erforschung der Planetenentstehung, Überschreiten der Grenzen des Sonnensystems
- ▶ **Viele Vorhaben erfordern** neue Technologien, etwa das Beschaffen von Bodenproben vom Mars, ein Heißluftballon für Titan oder die Beeinflussung der Bahn eines Asteroiden. Beschränkte Budgets zwingen allerdings dazu, Prioritäten zu setzen.
- ▶ **Die größte Expedition** soll eine interstellare Sonde unternehmen. Sie könnte zunächst den Rand des Sonnensystems untersuchen und anschließend Aufschluss über den interstellaren Raum geben. Dabei würde sie Forschern auch zu kosmologischen Erkenntnissen verhelfen. Ihr endgültiges Reiseziel wäre ein Stern wie Epsilon Eridani.

überwacht, droht seit Jahren das endgültige Aus. Mittlerweile fehlen manche Daten, ohne dass es Ersatz gibt. Indische Satellitenbetreiber mussten schon mit Daten über die Getreideproduktion aushelfen. Der NRC-Ausschuss forderte daher, das Erdbeobachtungsbudget wieder auf das alte Niveau anzuheben. Dann könnte man im kommenden Jahrzehnt 17 neue Missionen finanzieren, die etwa die polaren Eisschilde und den Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre überwachen würden.

Erfreulicher ist die Situation bei der Esa. »In Sachen Erdbeobachtung gibt Europa zurzeit das Tempo vor«, sagt Mark Drinkwater, Chef der Abteilung für *mission science* der Esa-Erdbeobachtungsprogramme. Der Briten kennt auch die andere Seite: 13 Jahre lang arbeitete er für die Nasa. Viel unmittelbarer als die Esa sei die US-Behörde Regierungsinteressen, Legislaturperioden und Budgetveränderungen unterworfen. Die europäische Weltraumorganisation hingegen, in der 17 Mitgliedsstaaten ihre Bemühungen vereinen, sei so gut in Schwung, »dass neue Missionen häufiger und regelmäßiger beschlossen werden«.

437 Millionen Euro fließen 2007 in die Erdbeobachtung. Selbst das ist vergleichsweise wenig: »Wir haben derzeit eine Delle in der finanziellen Entwicklung. Manche Projekte sind abgeschlossen, andere noch nicht angeht«, sagt Rainer Krutsch, Chef-Controller des Esa-Bereichs für Erdbeobachtung. Vor einigen Jahren lag das Budget bei 600 bis 700 Millionen Euro, »spätestens in zehn Jahren sollten wir mindestens 800 oder 900 Millionen Euro erreichen«. Zum Vergleich: Heute ist die Raketenentwicklung mit 627 Millionen Euro der größte Posten im Esa-Budget – bei stabiler, eher rückläufiger Tendenz.

Das Living-Planet-Programm der Esa umfasst zum einen die Earth-Explorer-Missionen. Sechs Satelliten werden bis 2013 abheben, die Finanzierung ist schon gesichert. Goce etwa wird das Erdschwerefeld messen und Auskunft über Meeresströmungen, Meeresspiegelhöhe und Polareismengen geben. Das Swarm-Trio wird sich dem Erdmagnetfeld widmen und neben Informationen über das Erdinnere auch klimarelevante Ergebnisse liefern. ADM-Aeolus schließlich soll messen, wie sich die Eigenschaften von Wind und Wolken in vertikaler Richtung verändern.

Weitere Satelliten werden bald im Rahmen von GMES ins All gebracht. Die »globale Umwelt- und Sicherheitsüberwachung« von Europäischer Union und Esa gilt wie auch das satellitengestützte Navigationssystem Galileo als Esa-»Leuchtturmprojekt«. Während die Esa für GMES mindestens fünf Sentinels (»Wächter«) in eine Umlaufbahn schießen

wird, ist die EU für die Informationsinfrastruktur zuständig. Behörden, Politikern und anderen Fachleuten wird sie Satellitendaten zu Wirtschaft, Verkehr, Umwelt und Sicherheitspolitik zur Verfügung stellen.

»Sentinel 1A hat den Bewilligungsprozess schon komplett durchlaufen und soll 2011 abheben«, berichtet Mark Drinkwater. Der Radarsatellit wird die Meere beobachten und unter anderem auch unerlaubtes Ablassen von Öl registrieren. Die anderen Umwelt-»Wächter« werden ebenfalls Zusatzaufgaben haben. Informationen über Naturkatastrophen zum Beispiel sind wichtig für den Zivilschutz, auch die Einhaltung internationaler Umweltabkommen werden sie überprüfen. Geld ist genug da: »Rund 2,5 Milliarden Euro werden bis 2023 in die Entwicklung von GMES investiert«, sagt Controller Krutsch. Hinzu kommen künftige Betriebskosten von 80 bis 100 Millionen Euro jährlich. »Der Stellenwert der Erdbeobachtung ist in Europa derzeit höher als in den USA«, bestätigt daher auch Krutsch – zumindest, wenn man von den »gigantischen Budgets« im Militärbereich absehe.

Drei neue MetOp-Satelliten hat die Esa ebenfalls gebaut, als Betreiber fungiert die zwischenstaatliche Organisation Eumetsat. MetOp-A, seit Mai 2007 voll in Betrieb, ist Europas erster meteorologischer Satellit auf einer polaren Umlaufbahn. Er nimmt die Erde aus geringer Höhe unter die Lupe und erlaubt Wettervorhersagen ebenso wie ein verbessertes Verständnis des Klimawandels. Sein Tagespensum ist mit der NOAA abgestimmt: MetOp-A fliegt den »Morgenorbit«, überquert also den Äquator vormittags (Ortszeit), während US-Satelliten die Nachmittagschicht fliegen werden. Selbst MetOp-B und MetOp-C – Letzterer muss auf seinen Start noch bis 2014 warten – liegen bereits fertig montiert in der Lagerhalle.

2 Abwehr von Asteroiden

Ganz abwegig ist ein Szenario, bei dem ein Asteroid einschlägt, nicht. Die Wahrscheinlichkeit, dass zum Beispiel der 320-Meter-Asteroid Apophis im Jahr 2036 die Erde trifft, liegt bei immerhin 1:45 000. Daher ist die Nasa auch ohne offiziellen Auftrag aktiv. Ihr Spaceguard Survey sucht für 4 Millionen Dollar jährlich nach kilometergroßen Objekten im erdnahen Weltraum, die beim Einschlag eine globale Katastrophe auslösen könnten.

Bislang wurden, vor allem von Spaceguard-Astronomen, 900 kilometergroße Himmelskörper identifiziert. Keiner davon stellt in den

nächsten Jahrhunderten eine Gefahr dar. Weil die Entdeckungsrate langsam abnimmt, geht man davon aus, dass rund 80 Prozent aller Objekte dieser Größenordnung bereits gefunden wurden. Kleinere Objekte hingegen werden bisher nicht systematisch ins Visier genommen. Doch rund 20 000 Himmelskörper, so schätzen Experten, können der Erde bedrohlich nahe kommen.

Die Nasa würde daher gerne das bodengebundene 8,4-Meter-Teleskop Large Synoptic Survey Telescope in die Suche einbeziehen. 2014 soll es in Chile in Betrieb gehen und könnte dann auch nach 100 bis 1000 Meter großen Himmelskörpern fahnden. In den ersten zehn Jahren ließen sich rund 80 Prozent der gefährlichen Asteroiden aufspüren, mit mehr Geld vielleicht auch 90 Prozent.

Doch bodengebundene Teleskope wie das LSST sind blind für Objekte, die sich nahe der Erde auf deren Umlaufbahn befinden. Gerade solche gefährlichen Asteroiden rücken nur in der Dämmerung in unser Blickfeld, dann aber können sie vom Sonnenlicht überstrahlt werden. Das zweite Problem: Das LSST gewinnt seine Daten vor allem bei optischen Wellenlängen. Größenabschätzungen, die von der Helligkeit auf die Masse eines Himmelskörpers schließen, sind dadurch aber mit einer Ungenauigkeit von etwa einem Faktor 2 behaftet. »Will man es richtig machen, muss man im Infrarotbereich vom Weltraum aus beobachten«, sagt daher Planetenforscher Donald Yeomans vom Jet Propulsion Laboratory in Kalifornien. Die Nasa schlug bereits ein 500 Millionen Dollar teures Weltraumteleskop vor, das die Sonne auf einer Umlaufbahn umkreist.

Für die unmittelbare Zukunft jedoch liegen die Hoffnungen auf Pan-Starss. Das durch besonders leistungsfähige Computer unterstützte US-amerikanische Beobachtungsprojekt basiert auf einem Teleskop mit weitem Gesichtsfeld und vier 1,4-Gigapixel-Digitalkameras. Errichtet wurde es 2006 auf der hawaiianischen Insel Maui. Mit seiner Hilfe wollen Forscher die Orbits von bedrohlichen Himmelskörpern mit über einem Kilometer Durchmesser vermessen. Zudem sollen 99 Prozent aller Objekte mit Durchmessern ab 300 Meter gefunden werden.

In Europa indessen gibt es derzeit keine nennenswerten Suchprogramme, die meisten wurden eingestellt. »Die Hauptlast liegt bei den Amerikanern«, bestätigt auch Gerhard

Hahn vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der auf die Erforschung erdnaheer Asteroiden spezialisiert ist. »Dafür aber hat die Esa mit ihrem Don-Quijote-Konzept ein Paradeprojekt vorzuweisen, wenn es um die Abwehr eines drohenden Einschlags geht«, so Hahn.

Im Rahmen der auf 300 bis 400 Millionen Euro geschätzten Don-Quijote-Mission soll ein 400 Kilogramm schweres Projektil auf einen Asteroiden abgefeuert werden. Der Rückstoß der durch den Einschlag herausgeschleuderten Trümmer würde dann dessen Bahn verändern. Das Esa-Komitee Neomap (*Near Earth Object Mission Advisory Panel*) empfahl im Jahr 2004 einen ersten Versuch: »Nur so finden wir heraus, ob unser Plan funktioniert«, erklärt der Neomap-Vorsitzende und DLR-Seniowissenschaftler Alan Harris. Noch existiert Don Quijote zwar nur als detailliertes Konzept auf Papier, ist aber der ausgereifteste Abwehrplan, der derzeit existiert. »Im Prinzip könnte die Mission binnen fünf Jahren starten«, so der Brite Harris – wenn denn die Finanzierung geklärt ist. Möglicherweise nehmen Europa und Amerika das Projekt sogar gemeinsam in die Hand. »Unsere Strategie des

ABGELENKT

- ▶ **Eine Daumenregel** besagt, dass man einen Asteroiden wie Apophis um einen Erdradius von seiner Bahn ablenkt, wenn man seine Geschwindigkeit ein Jahrzehnt vor dem Einschlag um einen Millimeter pro Sekunde verändert.
- ▶ »Typischerweise« aber, so DLR-Forscher Harris, müsse man mit einem **kinetischen Impaktor** die Geschwindigkeit von 100- bis 200-Meter-Asteroiden um einige Zentimeter pro Sekunde ändern.
- ▶ Solch kleine Einflüsse müssen sich dann während vieler Umläufe des Asteroiden **aufsummieren, um wirksam zu sein**.



ILLUSTRATION: NASA, DON DAVIS

So sah der Anfang vom Ende der Dinosaurier aus, vermuten viele Forscher. Die heute bekannten kilometergroßen Himmelsbrocken im erdnaheer Weltraum stellen allerdings keine Gefahr dar.



ILLUSTRATION: NASA, TIBOR BALINT

Ein Heißluftballon zehn Kilometer über Titan? Eine Hülle mit zwölf Meter Durchmesser und die Abwärme einer Plutoniumbatterie zum Aufheizen der Titan-»Luft« wären die Voraussetzungen dafür, dass er 160 Kilogramm an Instrumenten tragen könnte.

kinetischen Impaktors erscheint auch bei der Nasa vielen als die beste Lösung«, sagt Harris. Das Projekt aufzuteilen wäre kein Problem, denn Don Quijote besteht aus zwei Sonden. Hidalgo würde auf den noch auszuwählenden Asteroiden rasen, während Sancho aus sicherer Entfernung zuschaut und die Wirkung des Einschlags überprüft.

Doch selbst dies wäre nur ein erster Test. Kündigt sich tatsächlich eine Katastrophe an, ist zu hoffen, dass wir noch mindestens zwanzig Jahre Zeit bis zum Einschlag haben.

3 Leben im Sonnensystem

In letzter Zeit ist die Zahl der Orte im Sonnensystem wieder gewachsen, an denen man plausiblerweise Leben oder seine Vorformen vermuten könnte. Auch einige Trabanten der äußeren Planeten wecken derzeit Hoffnungen. Jupiters Mond Europa oder der Saturnmond Enceladus scheinen unterirdische Ozeane zu besitzen und verfügen zudem über alle Grundbausteine für die Entstehung von Leben. Selbst die heiße Venus könnte einst von Meeren bedeckt gewesen sein.

Ziel Nummer 1 bleibt aber der Mars. Die jüngste Nasa-Mission startete im August:

Mitte 2008 soll Phoenix in der weitgehend unerforschten nordpolaren Region niedergehen. Gemäß

der schon vor Jahren ausgegebenen Devise wird das Landegerät mit einem Roboterarm einige Zentimeter tief graben und Eisablagerungen untersuchen. Das Mars Science Laboratory (MSL) hingegen ist wieder als mobile Mission

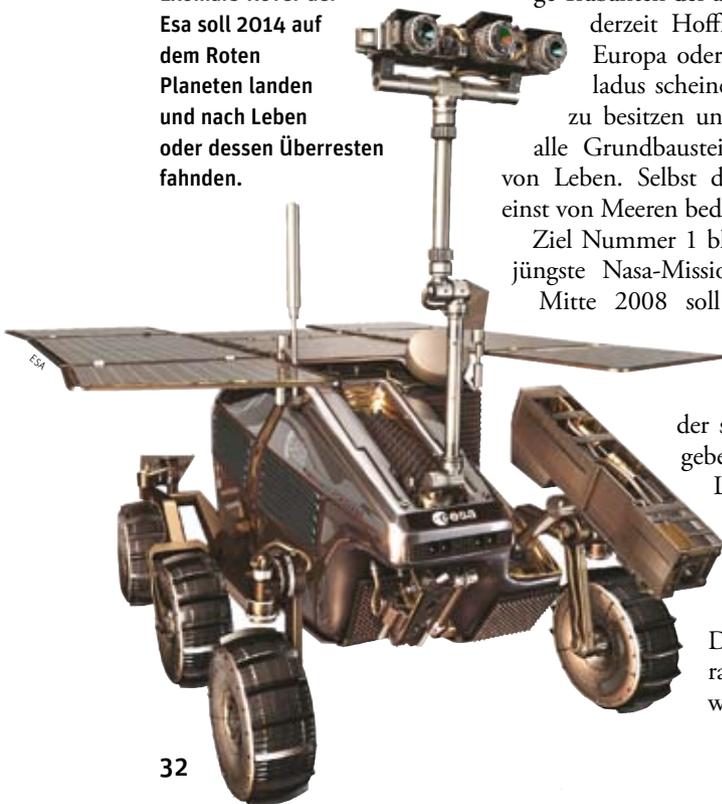
konzipiert. Der 1,5 Milliarden Dollar teure autogroße Rover soll Ende 2009 von der Erde abheben.

Allmählich aber wandeln sich die Suchstrategien wieder hin zur direkten Suche nach Leben oder seinen Überresten. Der für 2013 geplante Exomars-Rover der Esa kann mit seinem Bohrer bis zu zwei Meter tief in den Boden dringen und durch die giftige Oberfläche zu Schichten vorstoßen, in denen organisches Material überlebt haben könnte. »Um den Jahreswechsel herum erwarten wir die endgültige Zustimmung zu dieser Mission«, sagt Manfred Warhaut, Leiter des Missionsbetriebs beim Esoc, dem Esa-Raumflugkontrollzentrum in Darmstadt.

Für die meisten Wissenschaftler jedoch hätten Bodenproben, die zur Erde gebracht werden, die höchste Priorität. Sie sind für die Suche nach Leben ebenso wichtig wie für die Erforschung des Sonnensystems. Eine entsprechende Mars-Mission wäre jedoch ein Multi-Milliarden-Dollar-Projekt, das die unterfinanzierte Nasa frühestens 2024 stemmen könnte. Ein schmaler Lichtstreif am Horizont zeigte sich indessen im Frühjahr. Würde das MSL modifiziert, könnte der Rover Bodenproben zumindest schon einmal sammeln und aufbewahren. Eines Tages würden sie, so die noch sehr vagen Pläne, von einer späteren Mission in den Orbit gehievt und von dort aus mit einer weiteren Sonde zur Erde transportiert werden.

Auch die Esa plant eine Mars-Sample-Return-Mission. Ursprünglich sollte sie schon Anfang des kommenden Jahrzehnts starten, derzeit ist eher von 2018 bis 2022 die Rede. Sie wäre ein echtes Novum: Gleich fünf Fluggeräte würden sich auf den Weg machen. Eines davon müsste nach der Landung wieder von der Oberfläche abheben und die Proben an eine weitere Sonde übergeben, die für den Eintritt in die Erdatmosphäre gerüstet wäre. »Schon die Kometen-

Mit Roboterarm und Bohrer auf dem Mars unterwegs. Der Exomars-Rover der Esa soll 2014 auf dem Roten Planeten landen und nach Leben oder dessen Überresten fahnden.



sonde Rosetta war als Sample-Return-Mission geplant«, berichtet Warhaut – wegen allzu hoher technischer Anforderungen wird sie aber nur eine Landesonde auf Tschurjumow-Gerasimenko absetzen. Material vom Marsmond Phobos indessen könnte bereits 2012 auf der Erde eintreffen. Die russisch-chinesische Mission Phobos-Grund soll 2009 abheben. Die geringe Schwerkraft des Mondes macht es ihr leichter: Zum Start der Rückkehrkapsel wird deutlich weniger Schub benötigt.

Im Januar begann die Nasa, auch Missionen zu Europa und zum Saturnmond Titan ernsthaft zu konzipieren. In beiden Fällen kann man über die Existenz von Leben oder seinen Vorformen zumindest spekulieren. Welches der beiden Ziele die US-Behörde Ende des kommenden Jahrzehnts ansteuert, will sie 2008 entscheiden. 2 Milliarden Dollar dürfte das Unternehmen kosten, das andere Ziel müsste ein weiteres Jahrzehnt warten.

Unterirdischer Ozean auf Europa?

Für den Besuch von Titan ist ein Landegerät angedacht, das Bodenproben entnehmen kann. Sein Vorgänger, der (europäische) Lander Huygens der (amerikanischen) Cassini-Mission, war im Januar 2005 nur dafür gerüstet, eine halbe Stunde lang auf der Mondoberfläche zu überleben. »Spätestens seit diesem Zeitpunkt aber sind wir bei planetaren Missionen in Augenhöhe mit den Amerikanern«, sagt Warhaut. »Zumal wir das ganze Spektrum an Daten bieten konnten, sogar Tonaufnahmen aus der Atmosphäre.«

Auf Titan ließe sich auch ein Novum der Weltraumforschung erproben. In seiner erdähnlichen Atmosphäre könnte ein Heißluftballon an verschiedenen Orten Bodenproben sammeln. »Seine Aufgabe wäre die Analyse organischer Materie an der Oberfläche«, so Jonathan Lunine von der Universität von Arizona: Möglicherweise existieren zumindest »systematische Trends, die auf den Beginn einer Selbstorganisation hindeuten«.

Der Jupitermond Europa hingegen wäre wegen seines vermuteten unterirdischen Ozeans interessant. Dessen Existenz könnte bereits ein Orbiter nachweisen. Auf einer Umlaufbahn müsste er überprüfen, ob sich Form und Schwerefeld des Mondes durch Jupiters Gezeitenkräfte verändern. Gibt es tatsächlich ein unterirdisches Meer, hebt und senkt sich Europas Oberfläche regelmäßig um 30 Meter. Magnetfeldmessungen und ein Radar, das unter die Oberfläche blickt, würden bei der Arbeit helfen.

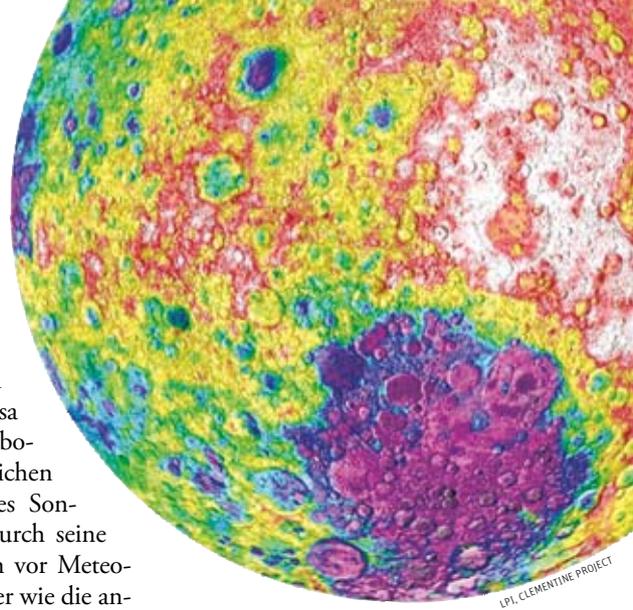
4 Entstehung der Planeten

Offene Fragen haben Forscher auch zum Prozess der Entstehung der Planeten. Eine der wichtigsten gilt Jupiter und könnte ab 2011 vom Jupiter-Orbiter Juno der Nasa beantwortet werden. Als »Erstgeborener« hatte der Gasplanet erheblichen Einfluss auf die Entwicklung des Sonnensystems, zudem könnte er durch seine Gravitation die inneren Planeten vor Meteoroiden geschützt haben. Aber ist er wie die anderen Planeten langsam angewachsen – oder wurde er, wie ein kleiner Stern, durch einen Schwerkraftkollaps geformt? Ist er weiter draußen im Sonnensystem entstanden, wie sein hoher Anteil an schweren Elementen nahelegt? Dann hätte er sich erst später nach innen bewegt und dabei auf seinem Weg kleinere Planeten aus der Bahn geworfen.

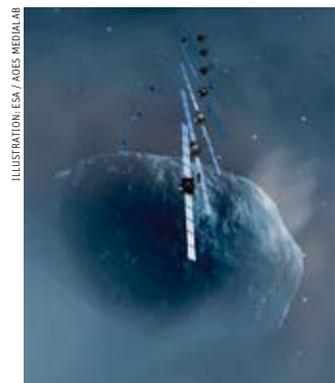
Auch eine Nachfolgemission für Stardust hat unter Planetenforschern Priorität. Die US-Sonde brachte im vergangenen Jahr zwar Materieproben aus der Koma eines Kometen zur Erde. Doch damit haben wir »nur an der Oberfläche gekratzt«, sagt der Chef des Stardust-Teams, Donald Brownlee von der Universität Washington. Aber immerhin: »Stardust bewies, dass Kometen Materie aus der Frühzeit des Sonnensystems, aus dem gesamten solaren Urnebel, aufgesammelt und bis heute in Eis konserviert haben.« Nun plant auch Japans Raumfahrtagentur Jaxa die Entnahme von Proben aus einem Kometenkern.

Rosetta indessen wird Kometenmaterial vor Ort untersuchen. Der Orbiter der Esa-Mission, der erst kürzlich dicht am Mars vorbeiflog, um sich beschleunigen zu lassen, soll Tschurjumow-Gerasimenko 2014 erreichen und unter anderem die Koma des Kometen analysieren. Für Bohrungen in der dunklen, organischen Kruste ist das Landegerät Philae verantwortlich, das sich beim Aufsetzen mit Hilfe einer Harpune fest am Kometen verankern wird. Proben von Eis und Gasen soll es ebenfalls unter die Lupe nehmen.

Doch es muss nicht immer gleich ein Kometenkern sein. Auch über neue Proben vom altbekannten Mond würden sich Kosmoarchäologen freuen, etwa aus dem Aitken-Becken. Der Einschlagkrater auf seiner erdabgewandten Seite ist so groß wie ein ganzer Kontinent, vielleicht der größte des Sonnensystems. Er stammt aus der letzten Phase der Planetenentstehung, sodass er Aufschluss über deren Ende geben könnte. Eine 500 Millionen Dollar teure Robotermission denkt die Nasa daher schon an.



Der wohl größte Krater im Sonnensystem. Das Aitken-Becken nahe dem lunaren Südpol ist ein zwölf Kilometer tiefer Krater (purpurner Fleck), der 2500 Kilometer durchmisst. Die Bestimmung seines Alters spielt eine wichtige Rolle bei der Aufklärung der späten Phasen der Planetenentstehung.



Rosetta wird die erste Raumsonde sein, die in eine Umlaufbahn um einen Kometen einschwenkt. Ihr Landegerät Philae soll die Oberfläche von Tschurjumow-Gerasimenko untersuchen.

Die 2003 gestartete japanische Sonde Hayabusa versuchte 2005, Proben eines Asteroiden einzusammeln. Ob das glückte, ist unklar. 2010 soll sie auf die Erde zurückkehren. Der »Falke« gilt trotz großer Probleme als Vorbild für Sample-Return-Missionen zu Kometen.



ILLUSTRATION: JAXA

ILLUSTRATION: ESA



Vor allem leicht soll es werden. Das Sonnensegel, mit dessen Hilfe eine Sonde die Grenzen des Sonnensystems überschreiten könnte, dürfte maximal rund ein Gramm pro Quadratmeter wiegen – einschließlich der tragenden Streben. Gegenwärtig sind 20 Gramm erreichbar.

Der Venus könnte ebenfalls bald wieder eine Reise gelten. Vielleicht passt auch sie in einen vermuteten Ablauf, wonach die Asteroiden des Asteroidengürtels zeitlich vor dem Mars entstanden und Letzterer wiederum vor der Erde. Jupiter könnte diese zur Sonne hin laufende Welle der Planetenentstehung angeregt haben. Doch betraf sie auch die Venus? »Darüber wissen wir absolut nichts«, sagt Doug Lin, Fachmann für Planetenentstehung von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz.

Zwar befindet sich der Planet noch innerhalb der bewohnbaren Zone des Sonnensystems, definiert als jene Orte, an denen dauerhaft flüssiges Wasser existieren kann. Mit ihren säurehaltigen Wolken, ihrem enormen Luftdruck und ihren höllischen Temperaturen ist die Venus dennoch alles andere als eine freundliche Umgebung. Auch hier könnte ein Ballon vielleicht lange genug auf der Oberfläche verweilen, um Bodenproben zu entnehmen. Danach müsste er allerdings rasch wieder in kühlere Höhen aufsteigen, dort in aller Ruhe die Proben analysieren oder, besser noch, sie zur Erde weiterschicken.

5 Ausbruch aus dem Sonnensystem

Manchmal erhält die Weltraumforschung ausdrückliche Unterstützung von der Öffentlichkeit. Als vor zwei Jahren eine Budgetkrise die ehrwürdigen Voyager-Sonden bedrohte, gab es einen Aufschrei der Empörung – und die Missionen wurden fortgesetzt. Voyager 1 ist derzeit 104 Astronomische Einheiten (AE) entfernt, also über hundertmal so weit, wie der Abstand zwischen Erde und Sonne beträgt. Jedes Jahr kommen weitere 3,6 AE hinzu. Schon im Jahr 2002 (oder 2004, ganz einig sind sich die Wissenschaftler nicht) hatte Voyager 1 die Grenze des Sonnensystems erreicht, wo die Teilchen des Sonnenwinds auf das interstellare Medium treffen.

Nun soll eine neue Sonde hinterhergeschickt werden, wie das NRC bereits 2004 empfahl. Sie hätte viel zu tun: Sie könnte die Frage beantworten, welcher Anteil der organischen Aminosäuren im Sonnensystem aus dem interstellaren Raum stammt. Zudem könnte sie nach Antiteilchen suchen, die aus kleinen Schwarzen Löchern oder aus dem Zerfall Dunkler Materie stammen. Sie könnte herausfinden, wie das Sonnensystem gegen kosmische Strahlung abgeschirmt wird, die möglicherweise einen Einfluss auf das irdische Klima hat. Auch könnte sie Magnetfelder im interstellaren Raum entdecken, die eine möglicherweise entscheidende Rolle bei der Sternentstehung spielen.

Nicht zuletzt könnte die Sonde wie ein winziges Weltraumteleskop arbeiten und, ungehindert vom Staub im Sonnensystem, kosmologische Beobachtungen durchführen. Die »Pioneer-Anomalie«, unerklärliche Bahnabweichungen von Pioneer 10 und 11, müsste sie ebenfalls untersuchen. Und sobald sie das Sonnensystem verlassen hat, könnte sie die Allgemeine Relativitätstheorie testen, indem sie feststellt, wo die Schwerkraft der Sonne das Licht ferner Sterne fokussiert. Das Fernziel der Reise, nach Zehntausenden von Jahren, könn-

REISE ÜBER DIE GRENZE

Vor ihrer Reise zu einem anderen Stern könnte eine interstellare Sonde zunächst den Rand des Sonnensystems erforschen. (Die gestauchte Form der gezeigten Heliosphäre ist Resultat von deren Eigenbewegung durch die Galaxis.)

TERMINATIONSSCHOCK
Hier verlangsamt sich der Sonnenwind auf Unterschallgeschwindigkeit.

HELIOPAUSE
Der Sonnenwind kommt zum Stillstand, interstellare Ionen werden zurückgeworfen.

BUGSTOSSWELLE
Das interstellare Gas verlangsamt sich auf Unterschallgeschwindigkeit.



100 Astronomische Einheiten

GRAFIK: LUCY READING/KKANDA

te schließlich ein naher Stern wie der 10,5 Lichtjahre entfernte Epsilon Eridani sein.

Die ersten Daten vom Rand des Sonnensystems hätten die Astronomen hingegen gerne schon früher. Um die Sonde innerhalb der Lebenszeit eines Wissenschaftlers (und ihrer Plutoniumbatterie) mehrere hundert AE weit hinauszubringen, muss sie auf eine Geschwindigkeit von 15 AE pro Jahr beschleunigt werden. Drei »Motor«-Varianten kommen dafür in Frage. Die »große« ist ein Ionenantrieb mit Kernreaktor, die mittlere ein Ionenantrieb mit Plutoniumgenerator. Variante drei ist ein Sonnensegel.

Bereits 2005 entstanden Entwürfe für zwei Missionen: eine große mit 36 Tonnen und eine mittlere mit einer Tonne Gewicht. Thomas Zurbuchen von der Universität von Michigan in Ann Arbor und Ralph McNutt von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore hatten die Entwicklerteams geleitet. Derzeit allerdings verbucht die leichteste Variante die gewichtigsten Vorteile für sich, sodass die Esa einen entsprechenden Vorschlag von Robert Wimmer-Schweingruber von der Universität Kiel in Betracht zieht. Möglicherweise will sich auch die Nasa beteiligen.

Jenseits des Merkurs von der Sonnenstrahlung profitieren

Wimmer-Schweingruber und sein internationales Team gehen von einer 500 Kilogramm schweren Sonde aus, die durch ein 200 Meter großes Sonnensegel angetrieben wird. Die Sonde soll zunächst die Merkurbahn passieren, um dort von der intensiven Sonnenstrahlung zu profitieren. Nach einem Schwenk des Segels nimmt sie dann Kurs auf die Jupiterbahn. Kurz vor der Ankunft wirft sie das Segel ab und schwebt antriebslos weiter.

Ein entsprechend leichtes Segel, das vermutlich auf einer hochstabilen Polyesterfolie basieren wird, müsste allerdings erst einmal entwickelt und bei weniger anspruchsvollen Missionen getestet werden. Doch »eine solche Mission, ob sie die Esa oder die Nasa leitet, ist der nächste logische Schritt unserer Erforschung des Weltraums«, sagt Wimmer-Schweingruber. »Schließlich besteht das All nicht nur aus unserer unmittelbaren lokalen Nachbarschaft.«

2 Milliarden Dollar wären für die grenzüberschreitende Sonde aufzubringen, die Betriebskosten über drei Jahrzehnte bereits eingeschlossen. Ihr Geld wäre die Mission aber wohl wert. Die Erforschung unserer Nachbarplaneten half dabei, die Erde zu verstehen – nun könnte die Untersuchung der interstellaren Umgebung helfen, unser Sonnensystem besser zu verstehen. ◀

RANDZONE

- ▶ Auch dreißig Jahre nach ihrer Entdeckung bleibt die Pioneer-Anomalie ein Rätsel: Pioneer 10 und 11, die das Sonnensystem derzeit in entgegengesetzter Richtung verlassen, erfahren beide eine unerwartete Abbremsung.
- ▶ Alle erdenklichen Effekte zog man bereits vergeblich zur Erklärung heran: Sonnenwind, Wärmeabstrahlung, Beschleunigung durch Treibstoffverluste, falsche Abschätzungen der Massen im Sonnensystem und vieles mehr. Auch Messfehler lassen sich ausschließen, wie Claus Lämmerzahl und Hansjörg Dittus im Physik Journal (1/2006, Nr. 1) berichteten.
- ▶ Auch die Sonden Galileo und Ulysses scheinen betroffen. Doch nur die Pioneer-Zwillinge lieferten so präzise Navigationsdaten, dass sich der Effekt zweifelsfrei feststellen lässt.
- ▶ Spekuliert wird unter anderem, dass er mit der von der Hubble-Konstanten beschriebenen Expansion des Universums zu tun hat. Einer der diesbezüglichen Hinweise: Die Stärke der Abbremsung ist ungefähr so groß wie das Produkt aus Hubble-Konstante und Lichtgeschwindigkeit.



George Musser ist Redakteur bei Scientific American.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/905474.



Countdown für: Raumfahrt Kosmos ScienceFiction



➤ Blättern Sie im Internet durch das aktuelle Heft:

www.astronomie-heute.de/start

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com