

Die Bahnen der Weltraumteleskope HERSCHEL und PLANCK

Wie man den Librationspunkt L_2 erreicht, und welche Vorteile er für die astronomische Beobachtung bietet

VON MARTIN HECHLER

Die beiden europäischen Satelliten HERSCHEL und PLANCK sind ganz unterschiedlichen astronomischen Fragestellungen gewidmet. Aber eine einzige ARIANE-5-Rakete wird sie gemeinsam in den Weltraum tragen. Sie werden ihre Mission in einer Gegend weit jenseits des Mondes in antisolarer Richtung erfüllen. Die bahndynamischen Aspekte dieses Projekts und die sich daraus ergebenden Vorteile für die Wissenschaft sind das Thema dieses Beitrags.

Ende 2008 soll eine ARIANE 5 die Weltraumteleskope HERSCHEL und PLANCK auf ihre Reise zum Librationspunkt L_2 im Sonne-Erde-System schicken. Dieser »Gleichgewichtspunkt« liegt etwa 1,5 Millionen Kilometer außerhalb der Erdbahn auf der Verlängerung der Verbindungslinie Sonne-Erde. Vom L_2 aus gesehen stehen Sonne und Erde immer in der gleichen Richtung. Ein dort platziertes Teleskop kann deshalb relativ einfach gegen die Infrarotstrahlung von Sonne und Erde abgeschirmt werden, und seine Blickrichtung wird von Erde und Mond nicht

zusätzlich eingeschränkt. Aufgrund dieser geometrisch bedingten Vorteile wird in den nächsten Jahren eine ganze Flotte von Astronomiesatelliten die Gegend um den L_2 bevölkern.

Am Librationspunkt L_2 herrscht in dem mit der Erde um die Sonne rotierenden System ein Gleichgewicht der Anziehungs- und Zentrifugalkräfte – im Idealfall bleibt ein dort geparkter Satellit dort stehen. Allerdings ist dieses Gleichgewicht instabil: Das Problem, einen Flugkörper zum L_2 zu schicken und ihn dort zu halten, ist vergleichbar mit dem Problem, einen Minigolfball in der Wei-

se auf eine glatte Bergkuppe zu befördern, dass er dort liegen bleibt. Wie die Satelliten HERSCHEL und PLANCK dieses Problem bewältigen sollen, um ihre astronomischen Missionen auszuführen, wird in diesem Artikel beschrieben.

Astronomie im Weltraum

Die Beobachtung der Planeten mit erdgebundenen Teleskopen war früher ein wichtiger Bestandteil der Astronomie. Die Erkundung durch automatische oder ferngesteuerte Sonden, oder gar durch Astronauten vor Ort, macht heute die erdgebundenen astronomischen Beobachtungen aller Körper im Sonnensystem weniger interessant. Aber die Raumfahrt hat den Astronomen neue Instrumente gegeben, um in weitere Entfernungen und in andere Spektralbereiche vorzudringen. Zunächst wurden mit dem Weltraumteleskop HUBBLE, das 1990 ein neues Zeitalter der Astronomie einleitete, die klassischen optischen Beobachtungen in den Raum außerhalb der Erdatmosphäre verlegt. Im optischen Spektralbereich haben die erdgebundenen Teleskope mittlerweile dank moderner Technologien, wie adaptiver Optik oder Interferometrie, gegenüber HUBBLE aufgeholt. Die Untersuchung von Strahlung, die (zu unserem Glück) nicht durch die Atmosphäre dringt oder dabei stark gestört wird, bleibt jedoch den Satelliten und Raumsonden vorbehalten. Das ist im kurzwelligen Bereich die Gamma- und Röntgenstrahlung, und auf der anderen Seite des Spektrums die Infrarot-, Submillimeter- und Radiostrahlung: Hier arbeiten HERSCHEL und PLANCK.

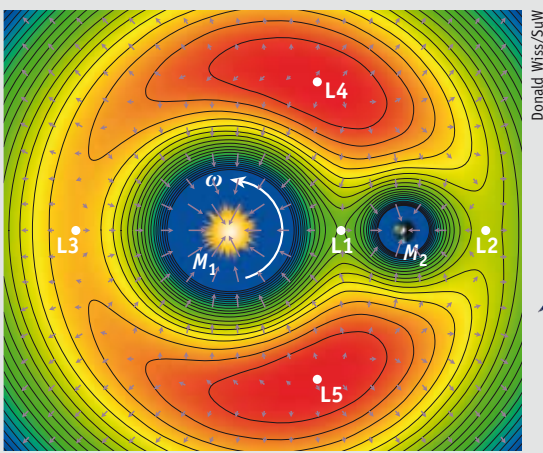
»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht



Als Ergänzung zu diesem Beitrag stehen Ihnen kostenlos ausführliche didaktische Materialien unter der Internetadresse www.wissenschaft-schulen.de zur Verfügung.

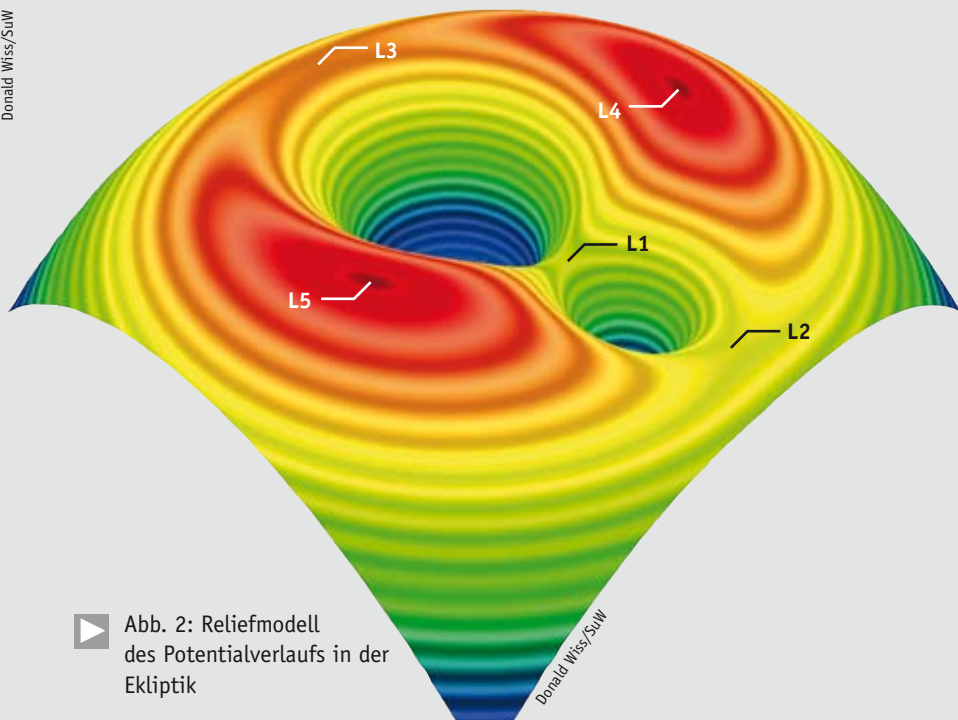
Wir machen uns grundsätzliche Gedanken zum Thema Librationspunkte. Wir gehen dort den Fragen auf den Grund, was an diesen Punkten so besonders ist, wie sich ihre Existenz im Weltraum ma-

nifestiert und warum die Gegend um den Librationspunkt L_2 im Sonne-Erde-System in den nächsten Jahren durch eine Flotte von Astronomiesatelliten bevölkert werden wird. Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH gefördert.



Donald Wfss/SuW

▲ Abb. 1: Das Gravitations- und Fliehkraftfeld des von Lagrange behandelten Dreikörpersystems mit den Librationspunkten L_1 bis L_5 . In unserem Fall steht M_1 für die Sonne und M_2 für das Erde-Mond-System.



▶ Abb. 2: Reliefmodell des Potentialverlaufs in der Ekliptik

Donald Wfss/SuW

Auch die Weltraumtechnologie hat sich seit 1990 weiter entwickelt. ISO, der erste europäische Satellit für Infrarot-astronomie, wurde 1993 in eine exzentrische 24-Stunden-Bahn um die Erde eingeschossen, deren erdfenster Punkt bei 60 000 Kilometer Abstand lag. Heute, da die für interplanetare Missionen entwickelten Kommunikationssysteme verfügbar sind, würde man wohl ISO, wie seinen Nachfolger HERSCHEL, zum L_2 befördern, 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt.

Die Lagrange'schen Librationspunkte

Die Lage der fünf Librations- oder Lagrange-Punkte zeigen Abb. 1 und 2. Diese Punkte hat der Mathematiker Joseph-Louis de Lagrange (1736–1813, Abb. 3) zum ersten Mal theoretisch beschrieben, und zwar im Rahmen des »restringierten zirkulären Dreikörperproblems«, das heißt unter der Annahme, dass sich ein Körper der Masse M_2 (ein Planet) auf einer Kreisbahn um einen anderen größeren Körper der Masse M_1 (die Sonne) bewegt, und dass die Masse des dritten Körpers (etwa eines künstlichen Satelliten) verglichen mit den ersten beiden sehr klein ist. Die Gravitationskräfte der beiden Primärmassen – in unserem Fall: der Sonne und des Erde-Mond-Systems – wirken dann in den fünf Librationspunkten so zusammen, dass sie den dritten Körper, den Satelliten, dort »festhalten«, sodass er in der gleichen Zeit wie die Erde gleichförmig um die Sonne kreist.

Bei einer exakten Behandlung des Problems ist die Erdbahn allerdings nicht als Kreis, sondern als Ellipse anzunehmen

(die Sonne steht in einem der Brennpunkte, die Entfernung der Erde zur Sonne variiert über das Jahr zwischen 147,1 und 152,1 Millionen Kilometern), und weiterhin muss man auch Erde und Mond getrennt behandeln, und nicht nur ihren gemeinsamen Massenschwerpunkt als zweiten Körper betrachten. Die Librationspunkte selbst sind dann nicht mehr so einfach zu beschreiben, wir werden uns eher mit Bewegungen, »Bahnen«, um die Librationspunkte zu beschäftigen haben.

Die beiden Punkte L_4 und L_5 liegen auf der Bahn der Erde um die Sonne 60 Grad vor der Erde und 60 Grad hinter der Erde. Diese beiden Punkte sind dynamisch stabil, das heißt, alles, was sich in ihrer Umgebung ansammelt, bleibt auch dort. Im Sonne-Erde-System (und auch im Erde-Mond-System) sind diese Punkte (so viel wir heute wissen) astronomisch bedeutungslos, im Sonne-Jupiter-System hat sich dort (verteilt auf die Umgebung von L_4 und L_5) die Asteroidenfamilie der Trojaner angesammelt.

Für die Raumfahrt interessant sind die kollinearen Librationspunkte L_1 , L_2 und L_3 , die alle auf der Geraden liegen, welche die beiden größeren rotierenden Massen verbindet. L_3 , auf der anderen Seite der Sonne gelegen, ist kaum erreichbar. Die Punkte, die für die Raumfahrt immer wichtiger werden, sind L_1 und L_2 , und das nicht nur im System Sonne-Erde, sondern auch im System Erde-Mond. Satelliten, die beim L_2 im System Erde-Mond geparkt sind, »stehen« über der Rückseite des Mondes. Schon in den siebziger Jahren wurden sie als Nachrichtenrelais für ein Teleskop auf der Rückseite



▶ Abb. 3: Joseph-Louis de Lagrange (1736–1813)

des Mondes vorgeschlagen. In der Praxis sollte ein solcher Satellit nicht im Librationspunkt selbst stehen, sondern sich etwas davon entfernt bewegen, damit der Mond nicht in die Blicklinie zur Bodenstation auf der Erde gerät. Ganz neue Projekte (»Zurück zum Mond!«) sehen den L_1 , zwischen Erde und Mond gelegen, als »Halte- und Umpackstation« für bemannte Mondmissionen vor.

Im System Sonne-Erde liegt der Librationspunkt L_1 1,5 Millionen Kilometer ($1/100$ Astronomische Einheit) von der Erde entfernt in Richtung Sonne. Schon 1995 wurde das Sonnenobservatorium SOHO (Solar Heliospheric Observatory) von ESA und NASA auf eine Bahn um L_1 gesetzt.

Der Librationspunkt, der seit etwa zehn Jahren zum Favoriten der weltraum-

Instabilität und die stabile Mannigfaltigkeit beim L_2

Für jene, die einmal eine Mathematikvorlesung hören mussten: Die linearisierten Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die die Bewegung im rotierenden System (x -Achse von der Sonne zur Erde) näherungsweise beschreiben, haben außer konjugiert komplexen Eigenwerten (das ergibt periodische Schwingungen) auch zwei reelle Eigenwerte, einen positiven und einen negativen. Der positive ist der problematische, er erzeugt in der Bewegung einen exponentiellen Term mit positivem Exponenten. Zunächst ist der Trick, dass man den Koeffizienten vor diesem Term (und auch vor dem anderen exponentiellen Term) durch Wahl der Anfangswerte zu Null machen kann. Übrig bleibt eine periodische Bewegung um den Librationspunkt. Aber schon die geringste Abweichung von der diesen Anfangswerten entsprechenden Bahn (und die gibt es bei Satelliten immer) schaltet den Term wieder ein, und der Satellit entfernt sich exponentiell (schneller und schneller) von der gewünschten periodischen Bahn.

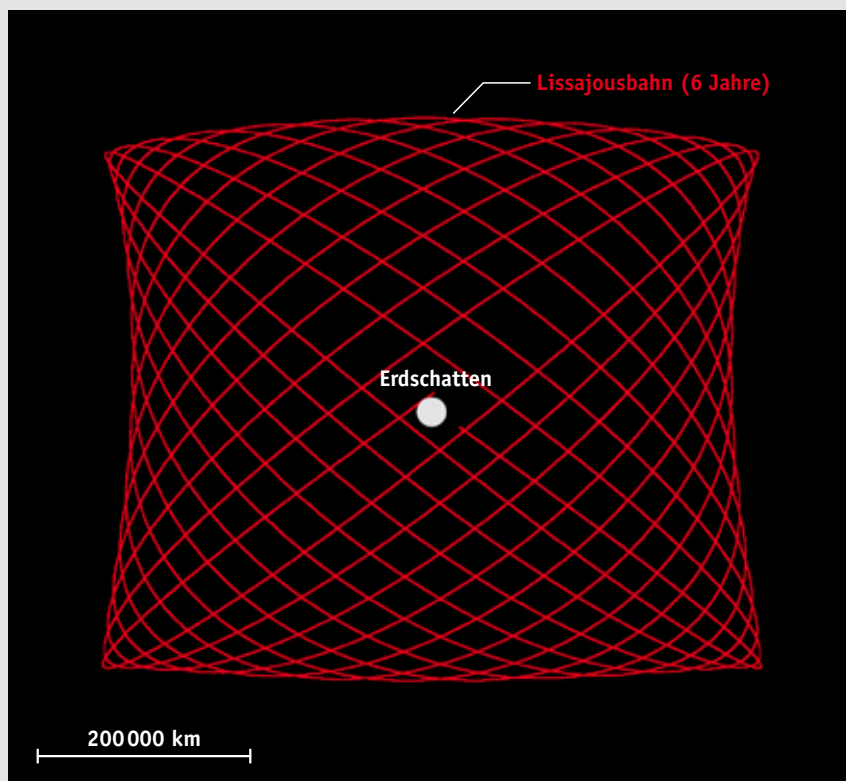
Der zweite nichtperiodische Term in den Bewegungsgleichungen, durch den negativen reellen Eigenwert repräsentiert, erzeugt, wenn man die volle nichtlineare Dynamik berücksichtigt, ein geometrisches Gebilde im Raum, die stabile Mannigfaltigkeit, von der aus sich Satelliten ganz von

alleine in eine Bahn um den Librationspunkt hinein bewegen. Theoretisch dauert das unendlich lange, praktisch von der Erde aus drei Monate.

Die periodische Lösung der linearen Differentialgleichung, ohne die exponentiellen Terme, sieht so aus, dass die Bewegung in der Erdbahnebene (der als x - y -Ebene gewählten Ekliptik) eine Ellipse um den

Librationspunkt beschreibt. Die Bewegung senkrecht dazu (in z -Richtung) ist eine eindimensionale, mit der Bewegung in der x - y -Ebene nicht gekoppelte Schwingung (auf und ab), allerdings mit einer anderen Frequenz als die Bewegung in der Ekliptik. Das führt dazu, dass die Satellitenbahn von der Erde aus gesehen (in der y - z -Ebene) als eine Lissajous-Figur um den Libra-

▶ Abb. 4: Eine Lissajous-Bahn um den L_2 , wie sie von der Erde aus erscheint.



Hechler/SuW

gestützten Astronomie geworden ist, ist L_2 im System Sonne-Erde. Er liegt auf der Geraden, die Sonne und Erde verbindet, 1,5 Millionen Kilometer außerhalb der Erdbahn.

Bahnen zum L_2 und um den L_2

Die kollinearen Librationspunkte, oder genauer Bahnen um diese Punkte, besitzen eine interessante dynamische Dualität. Auf der einen Seite sind sie instabil – ohne aktive Kontrolle bleibt kein Körper dort stehen. Auf der anderen Seite haben sie aber auch eine geradezu gegensätzliche Eigenschaft. Von einem bestimmten Gebilde im Raum (einer Art gekrümmten Fläche) aus bewegt sich ein Körper in eine Bahn um einen dieser Punkte hinein. Diese Fläche (Abb. 5) nennt man die stabile Mannigfaltigkeit der Bahn um den L_2 .

Oben haben wir das instabile Verhalten bei L_2 mit einem Minigolfball auf einer Bergspitze verglichen. Ein besserer Vergleich für diese Dualität wäre der mit einem Minigolfball auf einem

Sattel, oder noch besser einer Passhöhe: Hier hat man die stabile Mannigfaltigkeit, den Berggrat, auch im Bild. Dieser dynamische »Berggrat« hat sich für die HERSCHEL-Mission als außerordentlich nützlich erwiesen. Es gibt tatsächlich Bahnen um den L_2 , deren stabile Mannigfaltigkeit, der Grat also, so dicht an die Erde heranreicht, dass HERSCHEL von der ARIANE-5-Rakete direkt auf diesen »Strudel zum L_2 « eingeschossen werden kann. Der Satellit wandert dann frei, ohne weitere Manöver, entlang des Grats bis in eine Bahn um den L_2 . Man braucht dabei nur kleine Korrekturen anzubringen, um die Instabilität zu beherrschen, damit man nicht auf der einen oder anderen Seite des Grats hinunterfällt.

In der Umgebung des L_2 angekommen, kann die Bewegung des Satelliten um den Librationspunkt sehr unterschiedlich sein. Wenn man bestimmte Anfangsbedingungen erreicht hat, sodass man nahe beim Librationspunkt bleibt, wird die Bewegung gut durch die

im obigen Kasten gezeigte Lissajous-Figur beschrieben. Eine solche Figur wird der Satellit PLANCK fliegen.

Wenn man sich weiter vom Librationspunkt wegbewegt, gilt das mathematische Denkmodell, das die linearen Differentialgleichungen beschreiben, nicht mehr so genau. Der periodische Teil der Bewegung gleicht immer noch einer Schwingung, wenn jedoch die Amplituden dieser Schwingungen um den Librationspunkt noch größer werden als bei der oben gezeigten Bahn, kommen die Nichtlinearitäten stärker ins Spiel: Die beiden Frequenzen der Schwingungen in der Ekliptik und senkrecht dazu hängen von den Amplituden der Schwingung ab. Und tatsächlich kann man die Amplituden so wählen, dass die beiden Frequenzen genau gleich werden. Wenn man die Anfangsbedingungen geschickt wählt, entsteht eine geschlossene Bahn um den Librationspunkt. Diese Bahn, gezeigt in Abb. 6, nennt man einen Halo (Heiligenschein). Der Sonnenbeobach-

tionspunkt erscheint, so wie der Lichtpunkt einer in Schwingungen versetzten Lampe (Abb. 4).

In dem gezeigten Fall dauert ein »Umlauf« um den Librationspunkt etwa ein halbes Jahr (genauer: 177 Tage in der Ekliptik und 184 Tage senkrecht dazu). Der durch die unterschiedlichen Frequenzen verursachte Zyklus bis zur Wiederholung der Lissajous-Figur dauert etwa 13 Jahre. Die Anfangsbedingungen der in Abb. 4 gezeigten Bahn wurden so gewählt, dass die Bahn am Anfang gerade den Erdschatten tangiert (der Halbschatten hat 1,5 Millionen Kilometer hinter der Erde einen Radius von 13000 Kilometern, der Kernschatten endet bereits bei einer Million Kilometer). Es dauert dann mehr als sechs Jahre (einen halben Lissajous-Zyklus), bis die Bahn wieder in den Erdschatten eindringt. Diese Eigenschaft ist wichtig für die Raumfahrtmissionen, denn die Satelliten sind auf die Sonnenenergie angewiesen, müssen also um den Erdschatten herum fliegen.

Je weiter man sich vom Librationspunkt entfernt, desto ungenauer beschreiben die linearen Differentialgleichungen die Bewegung. Die Verformung des Rechtecks, das die Lissajous-Figur in Abb. 4 einschließt, resultiert aus der Berücksichtigung nichtlinearer Effekte bei der Erzeugung der gezeigten Bahn mit 300000 Kilometer Amplitude der beiden ungekoppelten Schwingungen.

tungssatellit SOHO bewegt sich seit 1995 auf einem solchen Halo um den L_1 .

Halo-Bahnen verlaufen weit außerhalb des Halbschattens der Erde. Dort steht ununterbrochenes und gleichmäßiges Sonnenlicht zur Stromerzeugung zur Verfügung. Bahnen mit großen Amplituden sind auch leicht zu erreichen – HERSCHELs Bahn zum Beispiel erreichen wir »frei«, ohne Manöver, auf der stabilen Mannigfaltigkeit.

Für Bahnen mit kleinen Amplituden reicht die stabile Mannigfaltigkeit nicht bis dicht an die Erde heran. Man kann sie trotzdem erreichen, indem man von der einen auf die andere Mannigfaltigkeit (dort, wo sie sich schneiden) »springt«. Das geschieht durch ein Bahnmanöver, das heißt durch eine Änderung der Geschwindigkeit, indem durch Öffnen der Schubdüsen des Satelliten für eine kurze Zeit beschleunigt wird. Ein solcher Transfer mit Manövern wird für PLANCK benötigt, wie in Abb. 7 gezeigt. Man sieht diesen Sprung in der Geschwindigkeit als

Ecke in der Projektion auf die Ekliptik (die x-y-Ebene), und danach sieht man, wie die Bahn exponentiell in die Lissajous-Bahn mündet. Die PLANCK-Mission dauert nur zweieinhalb Jahre, man sieht deshalb auf der rechten Projektionswand nur einen Teil der gesamten Lissajous-Figur. Auf die Frage, warum für PLANCK eine Bahn mit kleinen Amplituden vorzuziehen ist, kommen wir später zurück.

Selbst wenn der Librationspunkt in der wirklichen Welt streng genommen nicht existieren mag, kann man aus den numerischen Berechnungen schließen, dass es Bahnen um ihn gibt, und dass diese Bahnen die wesentlichen durch die vereinfachte (urale) lineare Mathematik beschriebenen Eigenschaften geerbt haben, vor allem deren Instabilität und die Existenz der stabilen Mannigfaltigkeit.

Warum eine Flotte von astronomischen Satelliten den L_2 bevölkern wird

Der offensichtliche Vorteil, den der Librationspunkt L_2 für die Weltraumstronomie bietet, ist, dass die Erde, und bedingt auch der Mond, vom Teleskop aus gesehen immer in der gleichen Richtung wie die Sonne steht. Die Bewegung der Erde um die Sonne herum erlaubt dann im Laufe eines Jahres Beobachtungen nach allen Richtungen, ohne das Teleskop in die Nähe der Sonne oder der Erde richten zu müssen. Nicht so offensichtlich, aber noch wichtiger ist, dass diese spezielle Geometrie ein Design des Satellitenteleskops erlaubt, bei dem eine einzige Abschirmung alle thermische Strahlung abfängt. Unter dieser Bedingung und mit der richtigen Isolierung lässt sich eine weitgehend passive Kühlung der CCDs in der Fokalebene erreichen – und damit

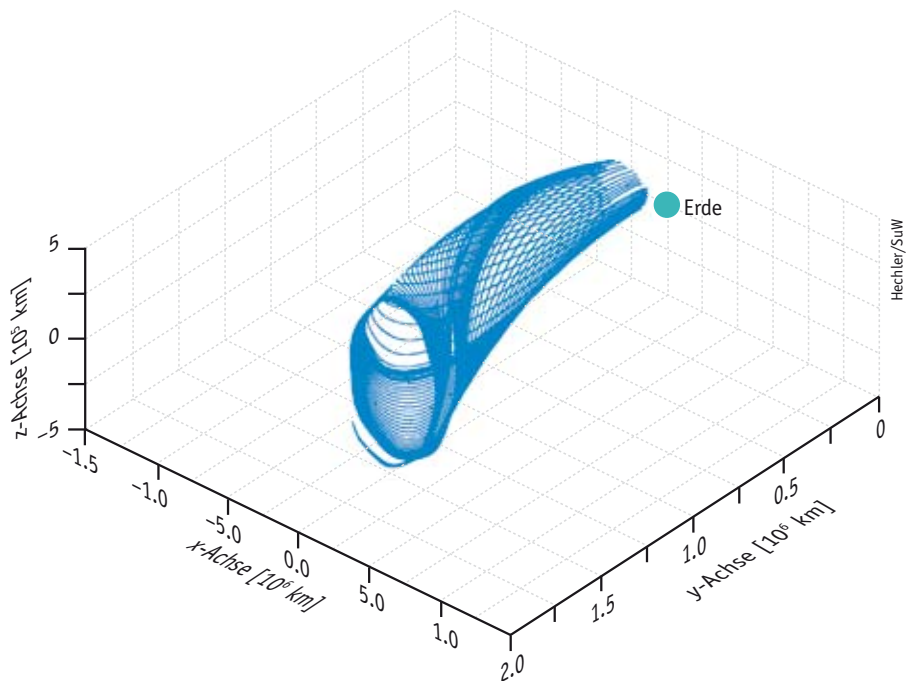
das thermische Rauschen reduzieren. Die tiefen Temperaturen der CCDs, die für die Instrumente auf HERSCHEL und PLANCK notwendig sind, lassen sich allerdings nicht rein passiv erreichen. Deshalb haben beide Satelliten zusätzliche Kühlsysteme, der eine mit einem großen Gefäß flüssigen Heliums, der andere mit Kühlpumpen nach dem Kühlschrankprinzip.

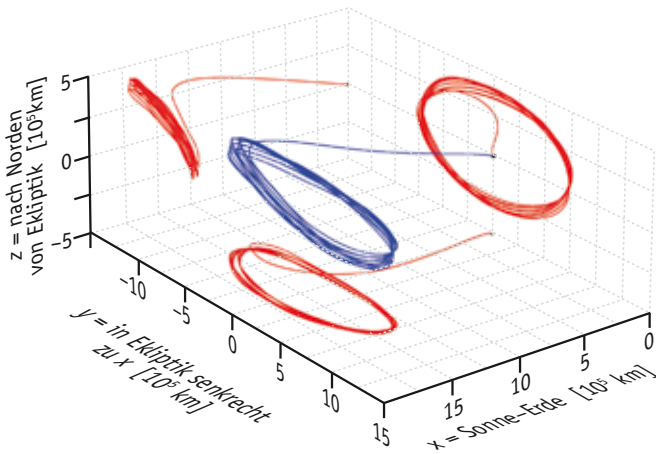
Auf einer näher bei der Erde verlaufenden Bahn kann man zwar die Strahlung der Sonne abschirmen, die Infrarotstrahlung der Erde fällt aber bei jedem Umlauf auf die Rückseite des Satelliten. Man müsste dann zum Beispiel bei HERSCHEL mehr Helium zum Kühlen verdampfen, und während eines Teils der Umlaufbahn ließen sich gar keine Beobachtungen durchführen.

Nachteilig bei der Durchführung einer Mission am L_2 ist die große Entfernung, welche die Kommunikation gegenüber einer Mission näher bei der Erde erheblich erschwert. Aber dieser Nachteil wurde durch den technologischen Fortschritt aufgehoben.

Die beiden technologischen Entwicklungen, die eine Mission in 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde möglich machen, sind: erstens, der Übergang vom S-Band (zwei Gigahertz) zum X-Band (acht Gigahertz) für die Datenübertragung, und zweitens, die Verfügbarkeit leichter und kleiner Datenspeicher.

▼ Abb. 5: Die stabile Mannigfaltigkeit einer Bahn um den L_2 hat die Form einer Röhre, die rückwärts in der Zeit von der Bahn um den L_2 bis in die Nähe der Erde reicht. Die Entfernungen auf den Achsen sind erdzentrisch in Kilometern angegeben.





▲ Abb. 6: Diese in 3D-Projektionen gezeigte Halo-Bahn (es ist die Referenzbahn für HERSCHEL) wurde nicht theoretisch erzeugt, sondern für das exakte Problem numerisch integriert, unter Berücksichtigung der exzentrischen Erdbewegung und mit der korrekten Behandlung von Erde und Mond. Die Projektion auf die rechte Wand entspricht dem Halo, den wir von der Erde aus sehen werden. Auch die Transferbahn von der Erde entlang der stabilen Mannigfaltigkeit der Halo-Bahn ist zu sehen. Die ARIANE 5 schießt den Satelliten HERSCHEL direkt auf diese Transferbahn ein.

Der winzige USB-Stick für 9,99 Euro mit einem Gigabyte Speicherkapazität würde im Weltraum zwar nicht funktionieren, denn Weltraumtechnologie muss speziell gegen Strahlung »gehärtet« sein. Die heutigen großen (gehärteten) Datenspeicher machen die zeitliche Trennung der Beobachtungen von der Datenübertragung möglich. Man speichert die Daten während der Beobachtungen, und richtet anschließend den Satelliten täglich für vier Stunden zur Datenübertragung Richtung Erde aus – und zwar immer dann, wenn die Bodenstation auf der Erde gerade auf der Nachtseite ist (dann ist sie vom L_2 aus sichtbar). Man könnte auch eine mechanisch drehbare Antenne auf dem Satelliten montieren, solche Antennen sind aber gegen Störungen anfällig und deshalb weniger beliebt.

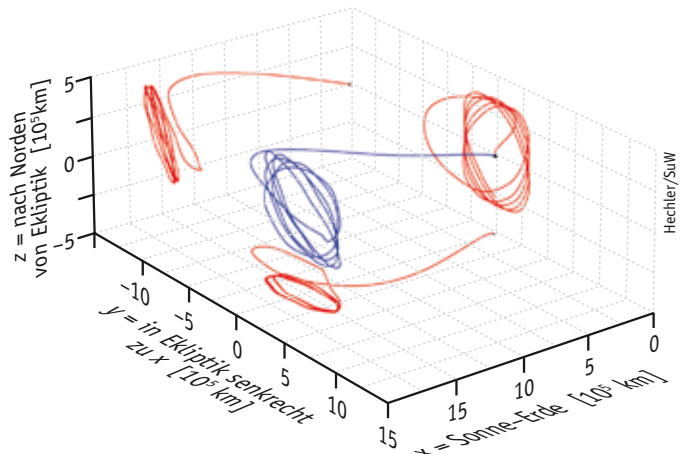
Die Datenrate, die man von einer Satellitenantenne mit einer bestimmten Sendeleistung zu einer Bodenstation übertragen kann, ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung, sie ist aber auch proportional zum Quadrat der Frequenz. Man kann also in X-Band die gleiche Datenrate aus der vierfachen Entfernung übertragen wie im S-Band. Der Übergang zur X-Band-Technologie wur-

de bei der ESA vor 2003 vor allem durch die interplanetaren Missionen MARS EXPRESS und ROSETTA forciert. Dazu baute die ESA für diese Projekte zwei Empfangsantennen mit 35 Metern Öffnung, eine in Westaustralien, eine bei Madrid. Die Bodenantennen der vorherigen Generation hatten Durchmesser von nur 16 Metern. Von den neuen, großen Antennen, in Verbindung mit der X-Band-Technologie, werden auch die beiden Astronomiesatelliten profitieren.

Die Bedenken der Verantwortlichen wegen der Instabilität der Bahnen am L_2 wurden (außer durch die mathematischen Analysen) durch die Erfahrungen mit SOHO zerstreut. SOHO demonstriert seit 1993, dass man eine Bahn um einen kollinearen Librationspunkt gegen die Instabilität halten kann. Obwohl SOHO einmal die Lagestabilisierung verloren hat, was zum Einfrieren der Schubdüsen und zum Verlassen der Halobahn führte, konnte er gerettet werden und arbeitet noch heute. Ein kleiner Vorteil dieser Instabilität ist, dass man sich, anders als bei geostationären Satelliten, keine Gedanken machen muss, was mit dem Satelliten am Ende seines aktiven Lebens geschehen soll, damit er die anderen Satelliten nicht stört: Die L_2 -Umgebung ist selbstreinigend.

Für HERSCHEL und PLANCK wurden Bahnen am L_2 wegen der damit verbundenen günstigen Geometrie anderen Optionen klar vorgezogen. Die gleiche Entscheidung traf die NASA für das James Webb Space Telescope (den Nachfolger des Weltraumteleskops HUBBLE) und alle Weltraumagenturen für eine Reihe weiterer Astronomiemissionen. In der ESA sind es folgende:

■ GAIA, eine Astrometriemission, die 2011 oder 2012 starten und eine tausendmal höhere astrometrische Genauigkeit als ihr Vorgänger HIPPARCOS erreichen soll. Für GAIA ist vor allem die thermische Stabilität der optischen Bank wichtig, auf der die beiden Teleskope montiert sind, die gleichzeitig in zwei verschiedene Rich-



▲ Abb. 7: Die Bahn des PLANCK-Satelliten: Transfer und zweieinhalb Jahre lange Driftphase um den Librationspunkt. Der Transfer beginnt auf der gleichen Bahn wie für HERSCHEL. Der Doppelstart auf der ARIANE 5 liefert die beiden Satelliten fast auf die gleiche Bahn ab (ein bisschen verschieden, um eine Kollision zu vermeiden). PLANCK springt dann auf die stabile Mannigfaltigkeit der Bahn mit den kleineren Amplituden.

tungen schauen und damit den Himmel vermessen. Auch dafür sind die stabilen Bedingungen im L_2 besonders günstig.

Weiter in der Zukunft liegen XRO und DARWIN (um 2020):

■ XRO ist ein Röntgenobservatorium. Es besteht aus zwei Satelliten: »Spiegel« und Fokalebene fliegen getrennt, wobei aber deren relative Lage extrem genau kontrolliert werden muss.

■ Das Non-Plus-Ultra der Missionen, die für den L_2 in der Planung sind, ist DARWIN. Die Mission umfasst drei getrennt fliegende Drei-Meter-Spiegel und einen Relais-Satelliten. Auf der Suche nach Leben soll DARWIN die Wasserlinie in den Spektren terrestrischer Planeten bei anderen Sternen spektral auflösen. Genaueres dazu ist auf den Web-Seiten der ESA-Projekte nachzulesen.

Das Startfenster zu den Halo- und Lissajous-Bahnen um den L_2

Für HERSCHEL wurde eine Bahn um den L_2 gewählt, die entlang der stabilen Mannigfaltigkeit zu erreichen ist, ohne dass eigene Manöver des Satelliten erforderlich wären.

Die Startrampe der ARIANE 5 in Kourou steht fest auf der Erde. Drei Sekunden vor dem Abheben wird eine »Inertial guidance platform« auf der Rakete initialisiert, deren Akzelerometer und Kreisel zusammen mit einer komplexen Software dafür sorgen, dass der Satellit mög-

lichst exakt zu den vorgegebenen Zielbedingungen abgeliefert wird.

Die Erde rotiert, die Orientierung der Startrampe relativ zur Richtung zum L_2 (weg von der Sonne, Mitternacht) muss in einem bestimmten Bereich liegen, um auf die stabile Mannigfaltigkeit einer Bahn um den L_2 zu gelangen. Das legt die möglichen Uhrzeiten beim Start fest. Dieses Zeitintervall für jedes Startdatum nennt man das Startfenster.

Bisher haben wir die stabile Mannigfaltigkeit »in der Zeit rückwärts«, von der Bahn um den L_2 aus, betrachtet. Umgekehrt kann man zeigen, dass für einen Start zu einer bestimmten Zeit, mit festen Einschussbedingungen für ARIANE in einem System, das mit der Startrampe rotiert, genau eine bestimmte Bahn um den L_2 erreicht wird. Nur eine kleine Korrektur der Geschwindigkeit zwei Tage nach dem Start ist nötig. Die Bahn, auf der HERSCHEL dann beim L_2 ankommt, ist für jedes Startdatum und jede Startzeit verschieden, und keinesfalls immer eine Halo-Bahn.

Für den Doppelstart zusammen mit PLANCK muss das gemeinsame Startfenster zusätzlich noch die Bedingungen der PLANCK-Mission erfüllen. HERSCHEL ist ein Observatorium, das einzelne astronomische Objekte beobachtet. PLANCK ist eine Durchmusterungsmission – das heißt: PLANCK wird den gesamten Himmel systematisch abdecken, um den Mikrowellenhintergrund zu kartieren.

Während HERSCHEL jeden Tag für vier Stunden zur Erde ausgerichtet wird, um seine Messdaten zu übertragen, darf PLANCK seine systematischen Kreise über den Himmel nicht unterbrechen. Es muss ständig mit einer Umdrehung pro Minute rotieren und richtet die Spinachse, um die es sich dreht, zur Sonne (und damit auch zur Erde!), sodass der Satellit selbst durch seine Solarzellen gleichmäßig vom Sonnenlicht abgeschirmt bleibt. Die Datenübertragung zur Erde kann also ständig mit einer Antenne erfolgen, die genau auf der Spinachse des Satelliten montiert ist. Um die notwendige Datenmenge übertragen zu können, benötigt man eine Antenne mit Richtwirkung, genauer eine Hornantenne mit einem Konushalbwinkel von 15 Grad. Die Erde darf also vom Satelliten aus gesehen nicht weiter als 15 Grad von der Sonne entfernt stehen. Das übersetzt sich in eine Bedingung für die beiden Lissajous-Amplituden der Zielbahn, etwa $A_y = A_z = 280\,000$ Kilometer.

Halo-Bahnen, und alle frei erreichbaren Bahnen am L_2 , haben typischerweise y -Amplituden von mehr als 800 000 Kilometern. Das heißt, PLANCK muss auf eine Lissajous-Bahn gebracht werden, und das geht nicht ohne ein größeres

Bahnmanöver. Abhängig von Startdatum und Startzeit kostet dieses Manöver mehr oder weniger Treibstoff. Die Tankgröße auf dem PLANCK-Satelliten wurde so gewählt, dass sich damit ein genügend großes Startfenster ergibt.

Die sich aus diesen Bedingungen im Laufe eines Jahres ergebenden Startfenster sind in Abb. 8 dargestellt. Es wird deutlich, dass PLANCK im Sommer zu viel Treibstoff verbrauchen würde – das Startfenster ist hier ganz geschlossen. Die Zeiten, die man ausschließen muss, weil die Satelliten sonst in den Erdschatten fliegen würden, liegen in der Nähe der Äquinoktien. Zwei wesentliche Bedingungen (Sonnenwinkel), die hier nicht diskutiert wurden, haben damit zu tun, dass während des Starts die Sonne nicht von oben auf die in der Raketenspitze verstaubten Satelliten (Abb. 9) scheinen darf. Die grünen Bereiche bilden das endgültige Startfenster, das auch noch weitere Einschränkungen, beispielsweise für HERSCHEL, berücksichtigt.

Wie man aus Abb. 8 ablesen kann, wird der gemeinsame Start von HERSCHEL und PLANCK am frühen Nachmittag (Greenwich-Zeit), also in Kourou bei 52 Grad West am Vormittag, stattfinden.

Der Betrieb der Satelliten HERSCHEL und PLANCK

Abb. 9 zeigt die beiden Satelliten startbereit auf der ARIANE-5. Die obere Verkleidung der Rakete wird 190 Sekunden nach dem Start abgesprengt, wenn die Erhitzung durch die Atmosphäre unter einen zulässigen Schwellenwert gesunken ist. Nach 1500 Sekunden ist die Rakete ausgebrannt, es wird dann zuerst HERSCHEL, der obere Passagier, abgesetzt, dann wird SYLDA, sein Traggerüst, abgeworfen, und zuletzt wird PLANCK freigesetzt.

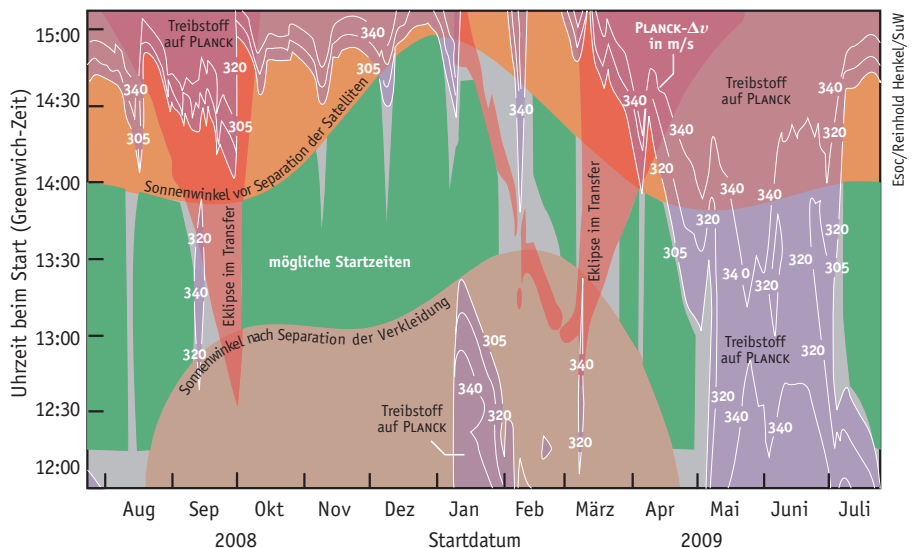
Beide Satelliten führen zuerst eine vorprogrammierte Sequenz aus, das heißt, sie starten ihre Computer und richten sich

autonom zur Sonne aus, um Strom zu erzeugen. Sogleich beginnen sie Daten zu senden, die ihren Zustand beschreiben – also zum Beispiel die Ladung der Batterie, den Zustand der Computer, den Druck in den Treibstofftanks und Leitungen, und Temperaturen an verschiedenen Stellen, nicht viel anders als die Informationen, die man vom Armaturenbrett eines Autos oder am Steuerpult einer komplizierten Maschine abliest. Diese Daten werden von einer der Bodenstationen der ESA empfangen (zuerst werden die Satelliten von der Station in Westaustralien gesehen) und sofort zum Kontrollzentrum nach Darmstadt übertragen. Dort werden die Daten analysiert, und wenn nötig wird per »Befehl« eingegriffen, etwas umgeschaltet oder Computerprogramme an Bord geladen.

Durch verschiedene Messsonden an Bord »kennt« der Satellit seinen Zustand. Auch die Orientierung seiner Achsen (seine Lage) relativ zu einem Inertialsystem kann er selbst bestimmen. Dazu dient ein kleines Weitwinkelteleskop: Die Software an Bord vergleicht das gesehene Sternfeld mit einem Katalog, bis sie weiß, was das Teleskop gerade sieht. Daraus kann sie ableiten, in welche Richtung das Teleskop schaut, und auch wie es um seine Achse gedreht ist, und damit ist die Ausrichtung des Satelliten bekannt.

Seine eigene Position und Geschwindigkeit kann der Satellit allerdings nicht selbst messen: Dazu ist Unterstützung vom Boden erforderlich. Etwas verein-

▼ Abb. 8: Startfenster für den gemeinsamen Start von HERSCHEL und PLANCK auf einer ARIANE 5 in Kourou. Alle Bedingungen, die nicht verletzt werden dürfen, sind auf verschiedene Weise eingefärbt. Im verbleibenden grünen Bereich kann der Start erfolgen.





◀ Abb. 9: Eine ARIANE-5-Rakete wird die Satelliten HERSCHEL und PLANCK gemeinsam ins All befördern. In der Nutzlastspitze befindet sich HERSCHEL oben, PLANCK darunter (links).

facht, misst man die Laufzeit der Signale von der Bodenstation zum Satelliten und zurück, dividiert durch zweimal die Lichtgeschwindigkeit und berechnet daraus den Abstand. Der Satellit bewegt sich nach bekannten physikalischen Gesetzen, die Bodenstation rotiert mit der Erde – es bleibt das Statistikproblem, die sechs orts- und Geschwindigkeitskoordinaten, die eine Satellitenbahn beschreiben, so zu bestimmen, dass die Bahn zu den Distanzmessungen passt – zum Beispiel durch Minimierung der Summe der Fehlerquadrate. Außer den Distanzmessungen benutzt man die Frequenzverschiebung, hauptsächlich erzeugt durch die Bewegung der Bodenstation, um Informationen über die Satellitenposition senkrecht zur Blickrichtung herzuholen.

Im Kontrollzentrum (Abb. 11) wird also der Satellit überwacht und ferngesteuert, die Bahn wird bestimmt, es werden Abweichungen von der gewünschten Zielbahn berechnet, und dann werden mit zum Satelliten gesendeten Befehlen bestimmte Düsen geöffnet, die den Satelliten herumdrehen können, um dann in einer gewünschten Richtung einen Rückstoß zu erzeugen. Die erzeugte Kraft, dividiert durch die Satellitenmasse, entspricht einer Beschleunigung – integriert über ein Zeitintervall ergibt das eine Änderung der Geschwindigkeit.

Im Weltraum gibt es keine Straßen und nichts, woran man sich festhalten oder abstoßen könnte: Richtung und Geschwindigkeit lassen sich nur durch Rückstoß, das heißt durch Wegblasen von Treibstoff, verändern. Man erreicht eine relativ kleine Geschwindigkeitsän-

derung der großen Satellitenmasse durch einen Strom von Treibstoffgasen, die mit hoher Geschwindigkeit die Schubdüsen verlassen (Impulserhaltung!).

Anders als bei einem Auto oder einer Maschine auf der Erde, kann man auch nicht zu einem Satelliten hingehen, ihn aufschrauben und reparieren. Wenn es Probleme gibt, muss man von weitem herausfinden, was nicht funktioniert und warum. Dazu benötigt man Spezialisten auf verschiedenen Gebieten und sehr detaillierte Prozeduren, vergleichbar mit den Checklisten der Flugzeugpiloten. Da man aber keine Möglichkeit hat, den Satelliten zu warten, werden die wichtigen Systeme doppelt und dreifach eingebaut, und vor allem wird ein Satellit vor dem Start sehr genau ausgetestet. Pannen sind in der Raumfahrt deshalb relativ selten.

Bevor unsere beiden Satelliten HERSCHEL und PLANCK anfangen können, ihre Teleskope auszurichten und die wissenschaftlichen Messungen auszuführen, müssen alle ihre Funktionen noch einmal sorgfältig überprüft und eingestellt werden. Das geht per Fernbedienung, Analyse der Telemetrie und der Daten vom Satelliten sowie durch Senden von Telekommandos zum Satelliten.

Gleich nachdem PLANCK das Einschussmanöver in die Lissajous-Bahn (besser gesagt, in deren stabile Mannigfaltigkeit) ausgeführt hat, fängt die Wissenschaft an. Große Mengen wissenschaftlicher Beobachtungsdaten werden ab jetzt täglich vom Satelliten zur Bodenstation übertragen, von dort über terrestrische Leitungen zum Kontrollzentrum in Darmstadt, und von dort weiter an die wissenschaftlichen Institute. In der Rou-

tinephase der Missionen wird nur noch die Bodenstation in Australien benutzt. Das hat zur Folge, dass im Kontrollzentrum in Darmstadt nur in Tagschichten gearbeitet werden muss. Zusammen mit den Wissenschaftsdaten werden immer alle Werte, die den Zustand des Satelliten beschreiben, gesendet, und wenn nötig wird per Befehl vom Boden sofort eingegriffen: Es werden Computerprogramme an Bord geändert, oder nur Steuerwerte neu gesetzt. Gleichzeitig wird dauernd die Bahn überwacht und alle vier Wochen ein Bahnkorrekturmanöver ausgeführt, die Bahnen am L_2 sind ja instabil, ohne aktive Kontrolle bleibt nichts dort.

Missionsanalyse

Ein Wissenschaftsprojekt in der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) entsteht ursprünglich aus Vorschlägen der europäischen Wissenschaftler und ihrer Institute. Aus deren Fülle von Ideen werden die wenigen ausgewählt, die dann im Rahmen des ESA-Wissenschaftsbudgets verwirklicht werden können.

Projekte werden nach ihrem wissenschaftlichen Gehalt relativ zu den Kosten durch verschiedene Komitees bewertet. Teil dieses Auswahlverfahrens sind immer Machbarkeitsstudien, das heißt, es wird untersucht, wie sich ein vorgeschlagenes Projekt überhaupt ausführen lässt, und was es dann kostet. Dazu gehört ein vorläufiges Design des Satelliten. Das gelingt nicht ohne zu wissen, auf welcher Bahn er fliegen soll, um seine wissenschaftlichen Zweck am besten zu erfüllen – das heißt, es geht nicht ohne Missionsanalyse.

Der Kern der Missionsanalyse ist die Auswahl der Bahn und die dazugehörige Manöveroptimierung und Treibstoffschätzung. Zusätzlich muss für das Design des Satelliten eine Vielzahl von geometrischen Parametern berechnet werden – beispielsweise für HERSCHEL und PLANCK die zeitliche Entwicklung des Blickwinkels zur Erde relativ zur Sonnenrichtung, oder die Sichtbarkeit des Satelliten von den Bodenstationen aus, oder die Zeiten, zu denen sich der Halbschatten des Mondes beim L_2 über den Satelliten hinweg bewegt.

Offenbar ist die Konstruktion passender Bahnen ein Schlüsselement der Planung interplanetarer Missionen. Solche Projekte erfordern meistens neue Ideen und neue Methoden, selten Routi-

► Abb. 10: Das Satellitenkontrollzentrum beim ESOC in Darmstadt. An den verschiedenen Konsolen sitzen die Spezialisten für die verschiedenen Untersysteme des Satelliten, aber auch die Bodenstationen und die Datennetze werden fernbedient.



nearbeit. So unterstützen die Missionsanalysten bei ESOC alle interplanetaren Projekte der ESA. Die Projekte, die am Ende ausgeführt werden, repräsentieren nur einen kleinen Teil der untersuchten Vorschläge.

Das tatsächlich ausgeführte interplanetare Programm der ESA begann mit der GIOTTO-Sonde, die 1986 am Kometen Halley vorbei flog. Danach kam HUYGENS, die Sonde, die, gestartet 1997 und vom NASA-Satelliten CASSINI zum Saturn getragen, im Januar 2005 auf dem Saturnmond Titan landete. Es folgten MARS EXPRESS, der Weihnachten 2003 in eine Bahn um den Mars einschwenkte, und sein »Nachbau« VENUS EXPRESS, seit Anfang 2006 bei Venus im Einsatz. Nicht zu vergessen ist ROSETTA, seit 2004 auf dem Weg zur Naherkundung des Kometen Tschurjumow-Gerasimenko – eine komplizierte zehnjährige Tour, die mit Unterstützung der nahen Vorbeiflüge an Erde und Mars den nötigen Schwung für das Kometen-Rendezvous im Jahre 2015 holt. Noch komplizierter als ROSETTA ist die zurzeit vorbereitete Mission BEPICOLOMBO zum Planeten Merkur. Um ihn relativ schnell zu erreichen (es dauert immer noch sechs Jahre), benötigt BEPICOLOMBO, zusätzlich zur Gravitationshilfe von Venus und Merkur selbst, ein neuartiges Ionentriebwerk (siehe SuW 7/2007, S. 26 ff.).

Die Missionsanalyse hatte auch wesentlichen Einfluss auf das Design der Missionen HERSCHEL und PLANCK. Die ersten Studien für HERSCHEL (das Projekt hieß damals, Mitte der 1990er Jahre, noch FIRST) begannen mit einer 24-Stunden-Bahn um die Erde, wie bei ISO. Erst durch genaue Untersuchungen wurde klar, dass Bahnen am L_2 erreichbar sind und die wissenschaftlichen Ziele viel besser unterstützen. Erst durch die Zusammenle-

gung der beiden Projekte in einem Doppelstart, ermöglicht durch den Wechsel der stabilen Mannigfaltigkeit für PLANCK, wurden beide Projekte im Rahmen der veranschlagten Gesamtkosten realisierbar.

Im Laufe der Entwicklung eines Projekts müssen die Bahnberechnungen immer genauer werden. Am Anfang, bei der Auswahl der am besten geeigneten Startrakete, geht es grob um hunderte Kilogramm Startmasse (die beiden Satelliten HERSCHEL und PLANCK zusammen wiegen beim Start, voll betankt, mehr als 6000 Kilogramm). Lange bevor man anfängt, den Satelliten zu bauen, ist es sehr schwer, die Masse aller seiner Teile genau zu schätzen. Ein Satellit enthält unter anderem mehr als hundert Kilogramm Daten- und Stromleitungen, mit denen man ein Einfamilienhaus verkabeln könnte. Das hat den Effekt, dass die Masse des Satelliten während seiner Entwicklung meist kontinuierlich zunimmt. Wenn die Satellitenmasse wächst, beginnt das Feilschen um die Treibstoffmasse, beides zusammen muss ja von der Startrakete auf den Weg

gebracht werden. Zu diesem Zeitpunkt muss die Missionsanalyse »bis aufs Kilo« genau sein.

Ein anderer Aspekt der Missionsanalyse sind Studien zur Genauigkeit, mit der man die Bahn vorhersagen kann. Man muss nicht nur Treibstoff laden, um die nominalen Geschwindigkeitsänderungen auszuführen, die man benötigt, um die Zielbahn zu erreichen. Man muss auch auf Ungenauigkeiten und Zufälligkeiten vorbereitet sein. Die erste große Ungenauigkeit ist die Abweichung der von der Startrakete gelieferten Bahn von jener, die man eigentlich haben wollte. Die Korrektur dieses Anfangsfehlers kann viel mehr Treibstoff kosten als später das Halten der instabilen Bahn um den L_2 . Man schätzt den Treibstoffbedarf mit statistischen Methoden. □

Interessante Weblinks zum Thema finden Sie unter www.suw-online.de/artikel/913160.



Martin Hechler studierte an der Technischen Universität in Darmstadt Mathematik und arbeitet seit 1974 als Missionsanalyst am Europäischen Raumfahrt-Operationszen-

trum (ESOC) in Darmstadt. Er war an vielen Projektstudien der ESA beteiligt, an den meisten für interplanetare Missionen. Die hier diskutierten Bahnen für HERSCHEL und PLANCK hat er selbst vorgeschlagen und berechnet.

Literaturhinweise

Donald Wiss: Die Lagrange-Punkte, einzigartige Beobachtungsstandorte im Weltraum. SuW 7/2003, S. 30–33

Donald Wiss: Swing-by-Manöver, was steckt dahinter? SuW 12/2003, S. 22–26 (mit WiS!-Material)

Donald Wiss: SMART-1 – Mit alternativer Flugtechnik zum Mond. SuW 1/2004, S. 24–28 (mit WiS!-Material)

Donald Wiss: Bahnen niedriger Energie. Wie kommen die Raumsonden am besten ans Ziel?, SuW 9/2007, S. 30–33 (mit WiS!-Material)