

# Swing-by-Manöver – Was steckt dahinter?

Zahlreiche Raumsonden machen zur Erfüllung ihrer Aufgaben von der Gravitationsumlenkung durch nahe Vorbeiflüge an Planeten Gebrauch. Mit dieser Technik können Raumsonden ihre Flugbahn im Sonnensystem ohne eigenen Energieaufwand so verändern, dass nacheinander Himmelskörper angefliegen werden können, die sich auf völlig verschiedenen Bahnen bewegen.

VON DONALD WISS

◀ Abb. 1: Die Flugbahnen der beiden Raumsonden VOYAGER 1 und 2 in den Jahren 1977 bis 1989.

▶ Abb. 2: Eine VOYAGER-Raumsonde in Flugkonfiguration. Gut erkennbar die Parabol-Hauptantenne mit 3,7 m Durchmesser und der 15 m lange Ausleger für die Magnetometer. (Bild: NASA/JPL)

Die Nahbegegnung mit einem Planeten verändert nicht nur die Flugrichtung einer Raumsonde, sondern vor allem auch ihr Energieniveau im solaren Gravitationsfeld.

Der im Volksmund oft salopp als »Weltraum-Billard« bezeichnete Vorgang der Beschleunigung eines Raumfahrzeugs mit Hilfe eines planetaren Schwerfeldes hat in der Fachliteratur viele Namen, wie z. B. »Fly-by«, »Swing-by«, »Slingshot«, »Gravity Assist« usw. Dank dieser Methode des »Energie-Auftankens« ließ sich eine große Anzahl erfolgreicher Weltraummissionen überhaupt erst durchführen. Sie alle aufzulisten würde zu weit führen, aber einige wichtige seien hier kurz erwähnt.

### Missionen mit Fly-by-Anwendungen

Die NASA-Sonde GALILEO zur Erforschung des Jupiters und seiner Monde flog im Oktober 1989 zunächst in Richtung des Planeten Venus. Nach dieser Begegnung im Februar 1990 ergab sich eine Bahn, die im Oktober 1990 zu einem ersten Vorbeiflug an der Erde führte. Dadurch wurde eine größere Ellipsenbahn eingeschlagen, welche im Oktober 1991 eine Begegnung mit dem Asteroiden Gaspra ermöglichte und im Dezember 1992 einen zweiten Vorbeiflug an der Erde zur Folge hatte. Dieser sandte die Sonde in eine Transferbahn zum Jupiter, welche im August 1993 noch am Asteroiden Ida vorbeiführte. Der Jupiter wurde schließlich im Dezember 1995 erreicht. Hier begann dann die Hauptmission, indem die Sonde durch dichte Vorbeiflüge an den Galileischen Monden in eine komplexe Folge von Umlaufbahnen gesteuert wurde, welche erlaubten, Nahbegegnungen mit allen größeren Jupitermonden durchzuführen.

Schon 1977 wurden die beiden Raumsonden vom Typ VOYAGER (Abb. 2) gestartet, von denen eine (VOYAGER 2) innerhalb

von zehn Jahren die Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun besuchte (siehe Abb. 1).

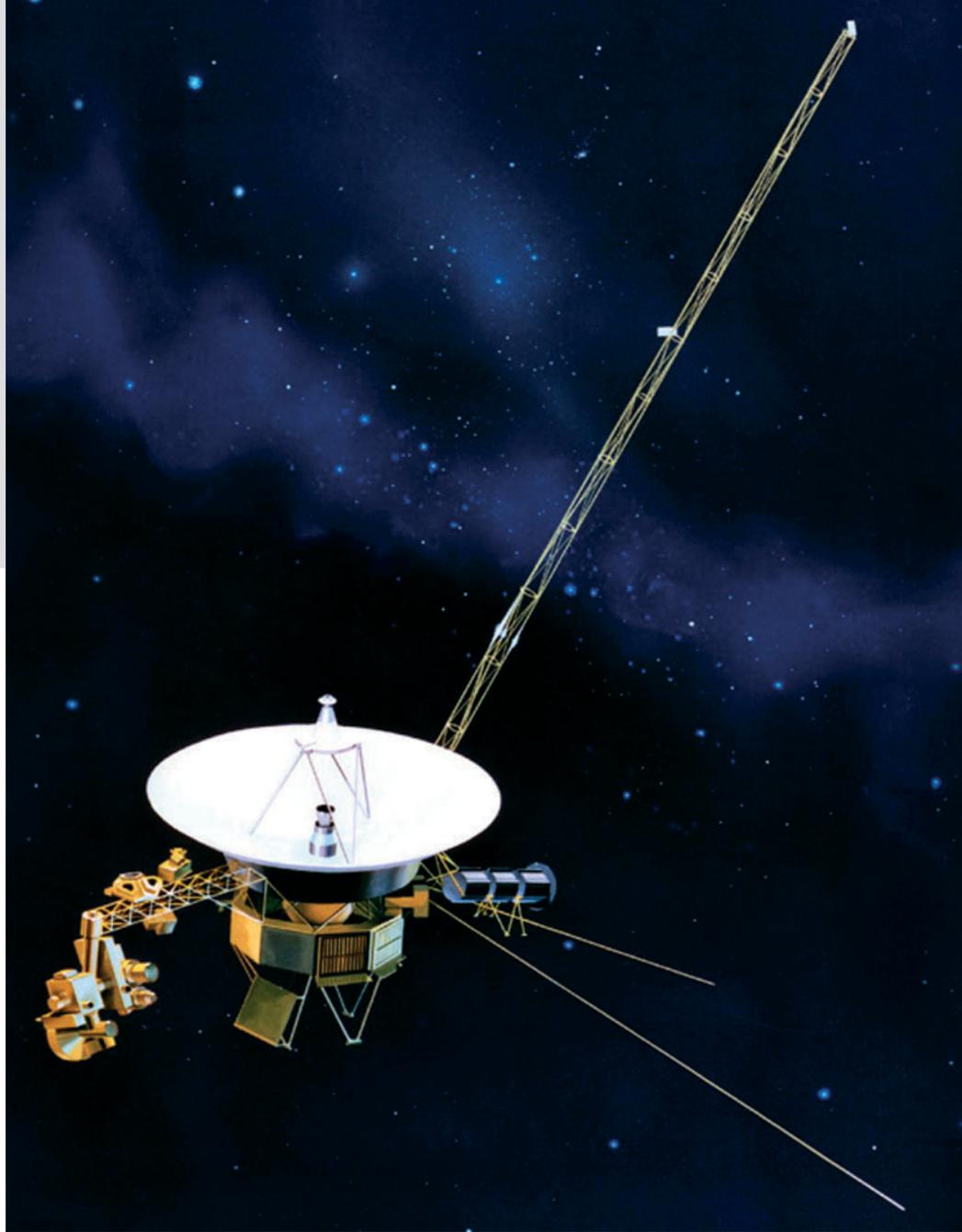
Die Forschungsmission CASSINI-HUYGENS der ESA und NASA zum Ringplaneten Saturn begann im Oktober 1997 mit dem Start in Richtung Venus. Sie wurde zweimal, im April 1998 und im Juni 1999, passiert, gefolgt von einem Vorbeiflug an der Erde im August 1999 (Abb. 3). Zu guter Letzt wurde Jupiter im Dezember 2000 passiert (siehe SuW 12/2001, S. 1048). Die Ankunft beim Saturn ist für den 1. Juli 2004 geplant. Der CASSINI-Orbiter soll den Planeten für mindestens vier Jahre in unterschiedlichen Bahnen umkreisen und dabei seine Monde und das Ringsystem erforschen (Abb. 4). Die mitgeführte Landesonde HUYGENS soll Anfang 2005 sogar auf dem Saturnmond Titan landen.

Neben der Planetenforschung machen insbesondere auch die Sonden für die Kometenforschung regen Gebrauch von der Swing-by-Technik:

Die Sonde STARDUST der NASA wurde im Februar 1999 gestartet und in eine etwa zwei Jahre dauernde elliptische Umlaufbahn um die Sonne geschickt. Im Januar 2001 erfolgte eine erneute Annäherung an die Erde mit einem Vorüberflug im Abstand von 3700 km. Dadurch wurde die Bahn der Sonde so verändert, dass nach einem zweiten Umlauf um die Sonne im Januar 2004 ein Vorbeiflug in etwa 100 km Entfernung vom Kern des Kometen Wild-2 stattfinden kann. Im Januar 2006 schließlich kommt das Raumfahrzeug der Erde wiederum so nahe, dass die Möglichkeit besteht, eine Kapsel mit dem während der Mission eingesammelten kosmischen Staub über den USA abzuwerfen und per Fallschirm zu bergen.

### Durch Bahnveränderungen zum Ziel

Die Planeten, die periodisch wiederkehrenden Kometen und die meisten Asteroiden umkreisen auf ellipsenförmigen Um-



laufbahnen die Sonne. Das sind so genannte Kepler-Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Mit Ausnahme von Merkur und Pluto sind die Bahnen der Planeten recht kreisförmig. Die Flugbahnen der Kometen sind dagegen oft sehr langgezogene Ellipsen mit hoher Exzentrizität. Jede dieser Bahnen besitzt gegenüber der Sonne ein Energieniveau, das vom mittleren Abstand des umlaufenden Körpers zur Sonne abhängt. Der Energieinhalt ist um so höher, je größer die Distanz zwischen sonnenfernstem und sonnennächstem Punkt der Bahn ist (bei Kreisbahnen der Durchmesser).

Soll nun eine Forschungssonde zu einem Planeten, Asteroiden oder Kometen geschickt werden, so muss sie zuerst mit einer Rakete aus dem Schwerkraftfeld der Erde geschossen und dann ebenfalls in eine Ellipsenbahn um die Sonne mit einem bestimmten Energieniveau gelenkt werden. Die Bahnform des anzufliegenden Objekts und sein Aufenthaltsort in Abhängigkeit von der Zeit sind durch astronomische Beobachtungen vorgegeben. Für die Sondenbahn sind deshalb Ort, Zeitpunkt und Richtung zu Beginn so zu wählen, dass sich die Bahnen von Sonde und Zielobjekt an einer Stelle kreuzen, wo beide Himmelskörper fast zeitgleich eintreffen, so dass sie sehr nahe aneinander vorbeifliegen können. Das muss mit hoher Genauigkeit geschehen, denn die Sonde durchläuft ihre durch den Abschuss festgelegte Bahn im Prinzip antriebslos. Während des Fluges zum Treffpunkt können zwar noch geringfügige Ungenauigkeiten mit kleinen, bord-eigenen Hilfstriebwerken ausgeglichen werden, größere Bahnveränderungen sind hingegen nicht mehr möglich.

Sollen mit derselben Raumsonde nacheinander sogar mehrere Himmelskörper besucht werden, so ist zu beachten, dass sich diese ja auf ganz unterschiedlichen Bahnen mit verschiedenen Energieniveaus bewegen. Deshalb muss die Sonde nach jeder erfolgten Begegnung ihre Umlaufbahn immer wieder so verändern, dass die neue Richtung und Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Flugzeit das nächste Rendezvous ermöglichen. Das verlangt im Allgemeinen erheblichen Energieaufwand, da der Unterschied in den Bahnenergien überbrückt und oftmals auch die Bahnebene gewechselt werden muss. Dazu würde der Treibstoffvorrat der bordeigenen Korrekturtriebwerke aber niemals ausreichen. Deshalb muss die Gravitationsumlenkung als natürliche Energiequelle angezapft werden.

Diese ermöglicht, durch einen nahen Vorbeiflug an einem massereichen Objekt, d. h. einem Planeten oder einem großen Mond, ein Raumfahrzeug nicht nur in eine andere Richtung zu lenken, sondern auch mit Energie aus dem Schwerkraftfeld zu versorgen, damit es in eine energetisch höhere Umlaufbahn gelangen kann. Dieser Energieaustausch ist gratis, benötigt aber bei Mehrfachanwendung am selben Planeten viel Zeit, da jeweils zwischen zwei Fly-by-Manövern mindestens ein ganzer Sonnenumlauf abgewartet werden muss.

### Ein Tennisball als Raumsonde

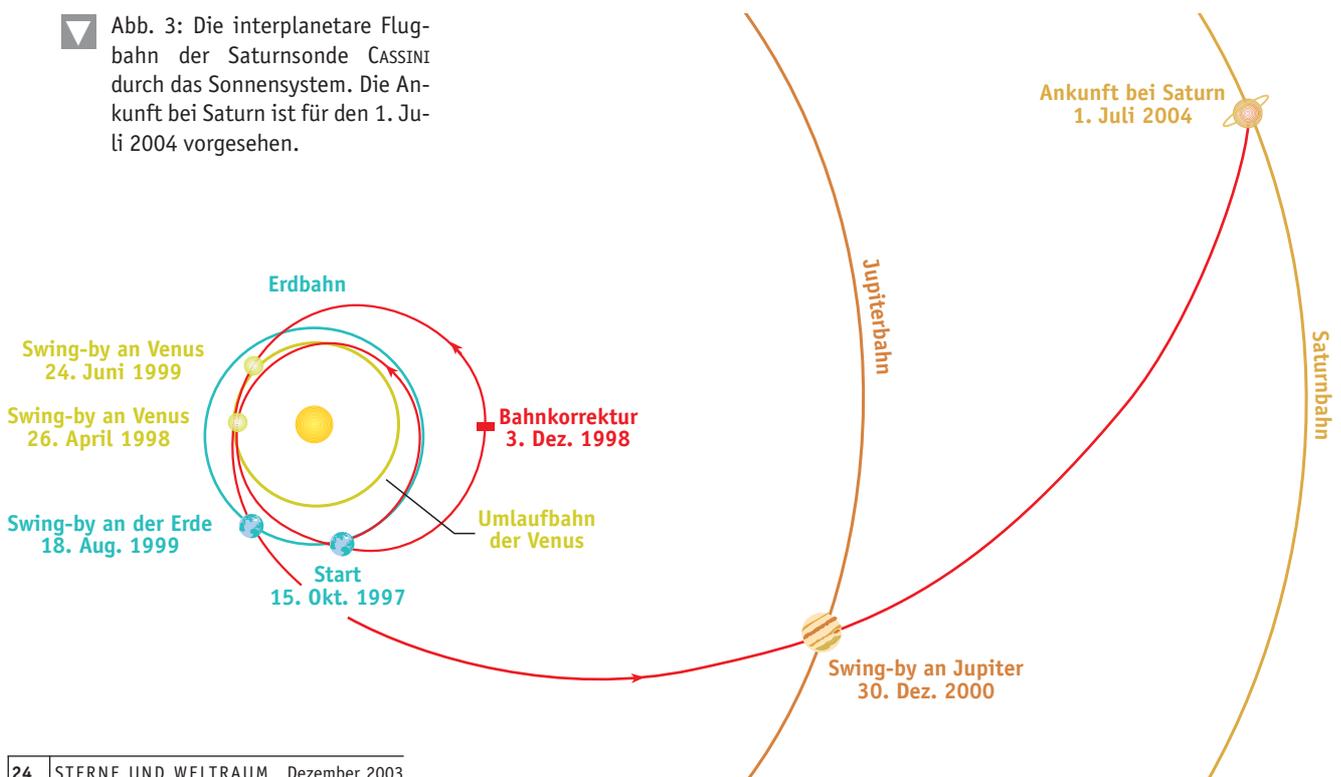
Es ist nicht ohne weiteres verständlich, weshalb eine Raumsonde ohne Zusatzantrieb durch den bloßen Vorbeiflug an einem Himmelskörper auf eine höhere, d. h. energiereichere Umlaufbahn gelangen kann. Schließlich ist allgemein bekannt, dass Energie nicht aus dem Nichts geschöpft werden kann. Die Erklärung findet sich, wenn man das Raumfahrzeug von zwei verschiedenen Standpunkten aus betrachtet, einmal vom bewegten Planeten und einmal von der stillstehenden Sonne aus.

Der Vorgang kann anschaulich mit dem Schlagen eines Tennisballs, insbesondere beim Anspielen, verglichen werden: Eine Spielerin wirft den Ball zunächst leicht in die Höhe und trifft ihn anschließend beim Herunterfallen mit dem kraftvoll geschwungenen Schläger, so dass der Ball mit hoher Geschwindigkeit in Richtung des gegnerischen Feldes fliegt.

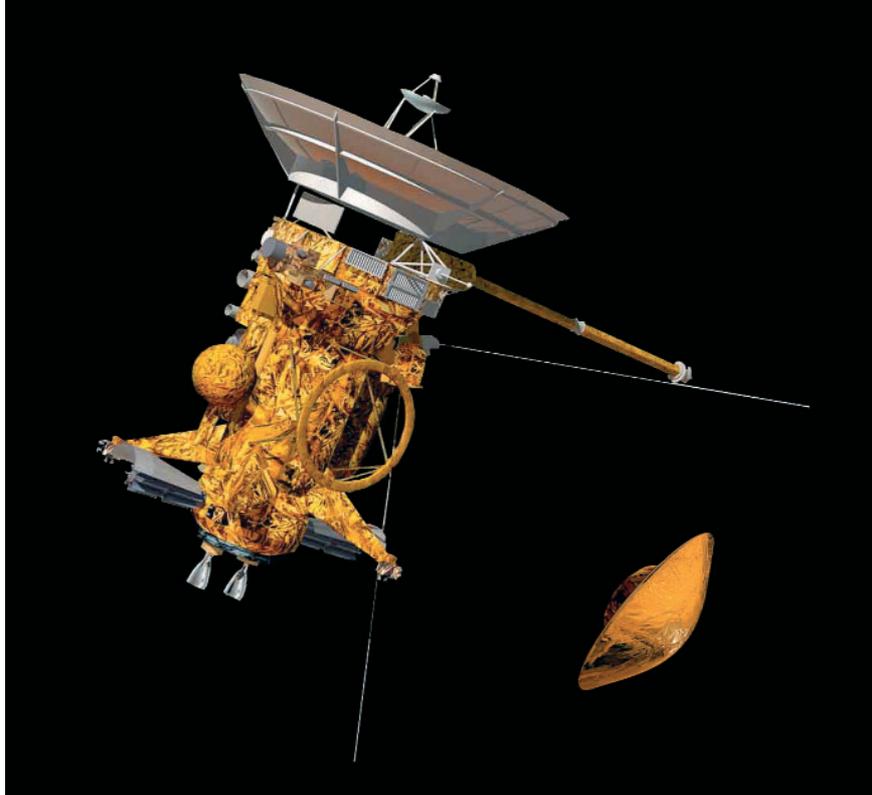
Von den Zuschauern aus gesehen, erfährt der Tennisball dabei nicht nur eine Richtungsänderung vom vertikalen Fall in eine beinahe horizontale Flugbahn, sondern auch eine erhebliche Vergrößerung seiner Bewegungsenergie infolge beträchtlicher Geschwindigkeitszunahme. Aus der Zuschauerperspektive überträgt der Tennisschläger also eindeutig Energie auf den Ball.

Ganz anders sähe die Sache jedoch aus, beobachtete man das Schlagen des Balls mit einer auf dem Schläger montierten, mitbewegten Minikamera. Aus dieser Perspektive nähert sich der Ball dem Schläger nicht senkrecht von oben, sondern hauptsächlich von vorne (nur leicht schräg von oben). Hier überlagern sich nämlich Richtung und Geschwindigkeit des fallenden Balls mit der Schlägerbewegung. Aus diesem Grund erscheint vom Schläger aus gesehen die Geschwindigkeit des herannahenden Balls wesentlich größer als seine reine Fallgeschwindigkeit.

▼ Abb. 3: Die interplanetare Flugbahn der Saturnsonde CASSINI durch das Sonnensystem. Die Ankunft bei Saturn ist für den 1. Juli 2004 vorgesehen.



▶ Abb. 4: Die Raumsonde CASSINI nach Abwurf der HUYGENS-Landersonde. Die oben sichtbare Hauptantenne ist vier Meter groß. (Bild: NASA/JPL)



keit. Unter der Annahme, dass das Zurückprallen des Balls am Schläger ideal elastisch erfolgt, fliegt der Ball – immer vom bewegten Schläger aus betrachtet – gleich schnell wieder weg, wie er angekommen ist. Damit bleibt aber auch die Bewegungsenergie des Balls gegenüber dem Schläger unverändert, lediglich die Flugrichtung ändert sich. Vom bewegten Schläger aus betrachtet, wird der Ball also bloß reflektiert, ohne dass eine Energieveränderung stattfindet.

### Der Fly-by-Vorgang

Etwas ganz Analoges geschieht im Welt- raum, wenn ein Raumfahrzeug in die Nähe eines Planeten gelangt, nahe vor oder hinter diesem durchfliegt und durch sein Schwerfeld abgelenkt wird. Wie beim Tennisspiel manifestiert sich der Umlenk- vorgang je nach Standpunkt verschieden, also je nachdem, ob er von der Sonne oder vom Planeten aus beobachtet wird. Vom letzteren aus gesehen, nähert sich die Raumsonde nämlich wie ein Meteoroid auf einer Hyperbelbahn mit einer gewissen Übergeschwindigkeit aus dem »unendlichen« All. Mit zunehmender An- näherung erhöht sich ihre Schnelligkeit relativ zum Planeten und ihre Bahn wird immer mehr in Richtung des Planeten- mittelpunktes gekrümmt. Schließlich wird, meist auf der Rückseite des Plane- ten, der Punkt des minimalen Abstands horizontal durchflogen, wo das Raum- fahrzeug momentan seine höchste Ge- schwindigkeit erreicht. Ab da entfernt es sich sogleich wieder unter stetiger Ab- nahme seiner Geschwindigkeit und Bahnkrümmung. Schließlich verschwin- det es abermals in der »Unendlichkeit«, zwar in eine andere Richtung, aber mit der gleichen Übergeschwindigkeit, mit der es ursprünglich in Erscheinung trat. Obwohl natürlich kein Stoßvorgang zwi- schen Raumsonde und Planet stattfindet, hat so das planetare Gravitationsfeld die gleiche Wirkung wie das elastische Netz beim Tennisschläger. Es lenkt die Sonde in eine andere Richtung, wobei vom Pla- neten aus gesehen, Geschwindigkeitsbe- trag und Energie des Flugkörpers im End- effekt unverändert bleiben. Hingegen sind von der Sonne aus betrachtet wegen des Überlagerungseffektes mit der Eigen- bewegung des Planeten sowohl die Flug- richtungen als auch die Geschwindigkei- ten vor und nach dem Fly-by völlig ver- schieden. Insbesondere erfährt das Raumfahrzeug von diesem Standpunkt

aus eine erhebliche Energiezunahme, weil der Planet – analog zum Tennisschläger – einen Teil seiner Bewegungs- energie an den Flugkörper überträgt. Eine Rückwirkung auf den Planeten ist, we- gen seiner gigantischen Masse im Ver- gleich zu derjenigen der Raumsonde, natürlich nicht wahrnehmbar.

### Gravissphären

Was die Größenverhältnisse angeht, bei denen sich eine Gravitationsumlenkung abspielt, muss beachtet werden, dass theoretisch sowohl das Gravitationsfeld der Sonne als auch dasjenige jedes einzelnen Planeten unendlich weit in den Weltraum hinaus reichen. Da aber ein planetares Schwerfeld sehr viel schwächer ist als dasjenige der Sonne, kann es seine Wir- kung nur in der unmittelbaren Umgebung des Planeten ausüben. Dieser Bereich in der Umgebung eines Planeten, wird Ein- fluss- oder Gravissphäre genannt. Bei der Erde reicht diese Sphäre bis etwa 1.5 Mil- lionen km in den Weltraum hinaus, etwa ein Prozent der Distanz zur Sonne. Jen- seits dieser Region dominiert die Anzie- hungskraft der Sonne. Die größte Gravi- sphäre besitzt Jupiter mit einem Radius von sieben Prozent seines Sonnenabstan- des (55 Millionen km). Diese Zahlen zeig- en, dass die Gravissphären der Planeten im Vergleich zur Ausdehnung ihrer Son- nenumlaufbahnen doch relativ kleine ku- gelförmige Bereiche darstellen, die im riesigen Gravitationsfeld der Sonne verteilt sind und diese umkreisen.

Vereinfachend lässt sich nun sagen, dass die Flugbahnen von Satelliten oder Raumsonden, die sich innerhalb der Ein- flussphäre eines Planeten aufhalten, praktisch nur von dessen Gravitations-

feld bestimmt werden, während die An- ziehung durch die Sonne vernachlässig- bar ist. Befindet sich eine Raumsonde je- doch außerhalb einer solchen planetaren Gravissphäre, so wird ihre Bewegung al- lein von der Sonne diktiert. Das Raum- fahrzeug vollführt also eine meist ellipti- sche Umlaufbahn um die Sonne, unab- hängig von dem in der Nähe befindlichen Planeten oder anderen Himmelskörpern.

### Vereinfachte Bahn Betrachtung

Wie bereits erwähnt, fliegt die Raumson- de vom Planeten aus gesehen auf einer Hyperbelbahn. Diese ist in dessen unmit- telbarer Umgebung noch stark ge- krümmt, nähert sich aber mit zunehmen- der Entfernung vom Planeten immer mehr einer Geraden an, der so genannten Asymptote. Im Rahmen einer vereinfach- ten Betrachtungsweise darf also ange- nommen werden, dass bezüglich Flug- richtung und Geschwindigkeit bereits am Rande der Einflussphäre des Planeten praktisch die gleichen Zustände wie »im Unendlichen« herrschen. Das heißt, die Richtung wird gleich derjenigen der Hyperbel-Asymptoten gesetzt. Der Ge- schwindigkeitsbetrag entspricht der rest- lichen Bewegungsenergie des Flugkör- pers im Unendlichen.

Vom Zentrum des Sonnensystems aus betrachtet schrumpft jedoch eine pla- netare Gravissphäre, innerhalb derer die Sondenumlenkung stattfindet, zu einem recht kleinen Bereich, den man stark ver- einfacht sogar als Punkt annähern kann. Obwohl jede Gravissphäre in ihrem Innern einen ganzen Planeten mit den darum kreisenden Monden enthält, voll- zieht sich ein Fly-by von der »höheren Warte« aus gesehen, auf kleinstem Raum

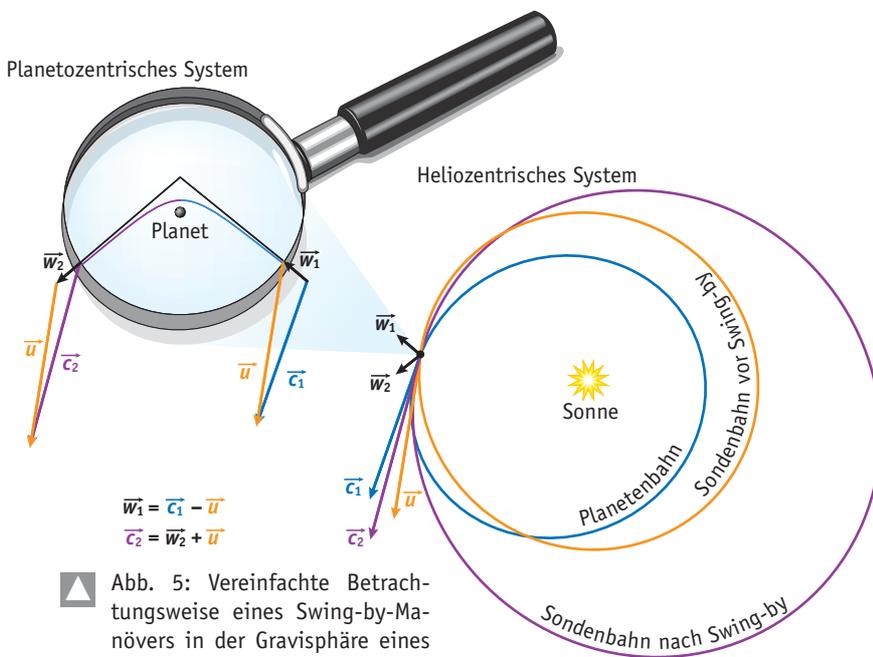


Abb. 5: Vereinfachte Betrachtungsweise eines Swing-by-Manövers in der Gravisphäre eines Planeten.

und sehr kurzzeitig. Denn Vorbeiflug und Umlenkung am Planeten dauern bloß Stunden, während ein Umlauf um die Sonne viele Monate oder gar Jahre beansprucht. Der Wechsel von einer energetisch niedrigeren in eine höhere Sonnenumlaufbahn, d. h. der Übergang von der ursprünglichen, kleineren auf die größere Ellipse, erfolgt also praktisch augenblicklich und wird vom Standpunkt der Sonne aus lediglich als Knick im Bahnverlauf wahrgenommen.

Dieser vereinfachten Betrachtungsweise liegt die Abb. 5 zu Grunde. Am Punkt, wo sich die drei Sonnenumlaufbahnen schneiden, befindet sich die »punktförmige« Gravisphäre. Wie die Geschwindigkeitsvektoren zeigen, werden die Bahnen im Gegenuhrzeigersinn durchlaufen. Die Raumsonde nähert sich dem Planeten mit der Geschwindigkeit  $c_1$  auf der kleinen Ellipsenbahn und dringt mit der Relativgeschwindigkeit  $w_1$  in seine Gravisphäre ein, welche sich selbst mit der Geschwindigkeit  $u$  fortbewegt. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt, wie die Sonde innerhalb der planetaren Einflussphäre auf einer Hyperbelbahn um den Planeten zieht. Nach dem Verlassen dieser Sphäre befindet sich die Sonde mit der Geschwindigkeit  $c_2$  auf der großen Ellipsenbahn um die Sonne. Die mit den verschiedenen Vektoren am Rand der Gravisphäre gebildeten Geschwindigkeitsdreiecke stellen die geometrische Überlagerung der aus den unterschiedlichen Standpunkten beobachteten Bewegungen dar.

### Eine einfache Berechnungsmöglichkeit

Die anschauliche, aber nicht exakt richtige Modellierung der Gravitationsumlenkung als kombiniertes Keplersches Zweikörperproblem mit Hilfe unterschiedlicher Bezugssysteme (Sonne und Planet)

gestattet eine besonders einfache mathematische Behandlung. Als Grundlage für approximative Abschätzungen und Bahnskizzen lassen sich wichtige Bahnparameter allein mit Hilfe der Erhaltungssätze für Energie und Drehimpuls sowie elementarer geometrischer Zusammenhänge ermitteln. Die Berechnungen können von Hand oder mit einem einfachen Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt werden.

Die theoretischen Grundlagen finden sich im Internet unter [www.suw-online.de](http://www.suw-online.de) unter »Astronomie in der Schule« zusammen mit einem Beispiel einer programmierten Tabellenrechnung.

An Hand von veröffentlichten Bahnelementen im Internet kann der Berechnungsgang für folgende Missionen leicht verifiziert werden:

VOYAGER 1 und 2: [voyager.jpl.nasa.gov/science/hyperbolic.html](http://voyager.jpl.nasa.gov/science/hyperbolic.html)

GALILEO: [www2.jpl.nasa.gov/files/misc/gllele.txt](http://www2.jpl.nasa.gov/files/misc/gllele.txt)

ULYSSES: [www2.jpl.nasa.gov/files/misc/ulyele.txt](http://www2.jpl.nasa.gov/files/misc/ulyele.txt)

und: [helio.estec.esa.nl/ulysses/orbelem.html](http://helio.estec.esa.nl/ulysses/orbelem.html)

Werden die aus diesen Quellen stammenden Daten in einer Tabellenrechnung ausgewertet, so zeigen sich Übereinstimmungen nur für die planetenbezogenen Hyperbelbahnen und die jeweiligen Sonnenumlaufbahnen nach dem Swing-by. Die sonnenbezogenen Flugbahnen vor den Planeten hätten andere Hyperbelbahndaten zur Folge gehabt. Diese bloß einseitige Übereinstimmung ist damit zu erklären, dass jeweils in der Anflugphase Kurskorrekturen vorgenommen wurden.

Von der Sonne aus betrachtet, muss nämlich der theoretische Schnittpunkt

der Sondenbahn (Ellipse 1) mit der Planetenbahn um eine genau festgelegte Distanz vom Planetenzentrum entfernt sein (meistens dahinter), wenn die Sonde bei ihm eintrifft. Diese Entfernung ist aber extrem klein im Vergleich zu den Bahndimensionen. Es ist deshalb nicht möglich, bereits beim Abschuss der Sonde so genau zu »zielen«, dass die erwähnte Bedingung eingehalten wird. Man wird also beim Start und während des größten Teils der Reise zum Planetentreffpunkt die Sondenbahn mehr oder weniger direkt auf Kollisionskurs mit dem Planeten halten. Erst bei der Ankunft in unmittelbarer Nähe des Planeten werden mit kleinen Schubimpulsen der Steuerröhrchen die notwendigen Bahnkorrekturen vorgenommen, damit der Anflug so weit seitlich verschoben zur Kollisionsachse verläuft, dass zwischen Planetenzentrum und Hyperbel-Asymptoten der richtige Abstand eingehalten wird. Nur dann ist sicher gestellt, dass sich der gewünschte Umlenkwinkel und damit der richtige Bahnverlauf nach dem Fly-by einstellt.

Die Einfachheit in der mathematischen Behandlung eines komplexen Problems hat natürlich auch ihre Nachteile. So können beim hier dargelegten Verfahren keine Angaben über den zeitlichen Ablauf der Bahnbewegungen von Planet und Raumsonde gemacht werden. Ein korrektes Timing muss also a priori vorausgesetzt werden. Eine weitere Schwäche des Rechenmodells besteht vor allem im plötzlichen Wechsel von einem Schwerefeld ins andere an der Grenze zweier fiktiver, ausschließlicher Einflussgebiete. Die real vorhandene Übergangsregion, wo die Gravitationswirkungen von Sonne und Planet von gleicher Größenordnung sind, wird unterdrückt. Die korrekte mathematische Behandlung würde aber eine wesentlich aufwändigere numerische Lösung des kosmischen Dreikörperproblems mit dem Computer erfordern. □



Dipl.-Ing. Donald Wiss studierte Maschinenbau an der ETH Zürich und arbeitete anschließend einige Jahre für die Firmen Boeing und Rohr Industries in den

USA. Nach seiner Rückkehr in die Schweiz war er bis zur Pensionierung im Jahre 2001 im Forschungszentrum der Firma Sulzer als Experte für numerische Strömungssimulationen in Turbomaschinen tätig. Heute beschäftigt er sich freischaffend mit Bahnberechnungen von Raumflugkörpern.