

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 2

Anregungen für Unterricht und Lehre

ISBN 3 - 7896 - 0100 - 4

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

GALILEO - AUF SCHLEUDERKURS ZUM JUPITER

Kosmisches Planetenbillard vom Klassenzimmer betrachtet

Sonne, Mond und Planeten haben von jeher eine starke Faszination auf Menschen ausgeübt. Seit Jahrtausenden versuchen sie mit sich ständig erweiternden Möglichkeiten, die Geheimnisse des Universums zu enträtseln. Ein Meilenstein in dieser Entwicklung war die Beobachtung des Himmels mit dem Teleskop und die Entdeckung der Jupitermonde durch Galilei. Einen ähnlichen qualitativen Sprung brachte die Raumfahrt, die eine Beobachtung ohne Störung der Erdatmosphäre, in verschiedenen Spektralbereichen und die Fernerkundung von Planeten aus der Nähe ermöglichte. Die extraterrestrische Forschung mit Satelliten hat der Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten dank moderner Hochtechnologie viele neue Erkenntnisse gebracht und viele detaillierte Aufnahmen von Planeten geliefert (z.B. Voyager-Sonden). Diese Studie will die Faszination, die solche Raumfahrtmissionen auf viele Jugendliche ausübt, nutzen und anhand der Jupitersonde Galileo exemplarisch einige Aspekte von langen und komplexen Raumfahrtprojekten illustrieren. Dabei geht es im wesentlichen um Fragen wie:

- Welche Energie pro kg transportierter Masse ist nötig?
- Welche Bahnen sind günstig?
- Wie gewinnt Galileo im Vorbeiflug an Planeten Energie ?
(Swingby - Manöver)

Das ausgearbeitete Unterrichtsmaterial soll als Anregung für den Physik- oder Astronomieunterricht in der Oberstufe dienen. Es ergeben sich dabei für das Fach Physik (Jahrgangsstufe 11) und den Grundkurs Astronomie anregende und weiterführende Problemstellungen zum Themenbereich Gravitationsgesetz und Satellitenbahnen, die zusätzlich Anwendungen von mathematischen Problemstellungen (Kegelschnitte) aufzeigen. Im ersten Kapitel sind zunächst die wissenschaftlichen Ziele der Jupitersonde GALILEO zusammenfassend dargestellt [1].

1. Kurzdarstellung des wissenschaftlichen Projekts

Die GALILEO-Mission ist Teil des "NASA Lunar and Planetary Exploration Program". Durch vergleichbare Studien an den Planeten unseres Sonnensystems sollen Fragen nach dessen Entstehung und Entwicklung gelöst und unser Verständnis des kosmischen Ursprungs unseres Lebens erweitert werden (Nachfolgeprogramm der Jupiter- und Voyager-Sonden).

Missionsziele

Jupiter, der größte und massenreichste Planet unseres Sonnensystems liegt mit seinem tausendfachen Erdvolumen und der 318-fachen Erdmasse noch unterhalb der kritischen Grenze zur Entstehung eines Sternes. Seine Zusammensetzung ist derjenigen unserer Sonne sehr ähnlich, er besteht hauptsächlich aus Wasserstoff (ca. 90%) und Helium (ca. 10%) und besitzt keine feste Oberfläche.

Mit seinen vier nach ihrem Entdecker benannten Galileischen Monden Io, Europa, Ganymed und Callisto und noch ca. 12 weiteren kleineren Trabanten kann der Jupiter als eine Miniaturausgabe unseres Planetensystems angesehen werden. Das Magnetfeld des Jupiter ist das stärkste von all den Feldern der uns bekannten Planeten; es erstreckt sich weit in den Raum hinaus und lenkt wie ein ausgebreiteter Schirm den Sonnenwind von dem Planeten ab.

Die GALILEO-Sonde ist die erste Sonde, die einen nicht erdähnlichen Planeten umrundet und eine Meßsonde (Entry Probe) in dessen Atmosphäre schickt. Es sollen folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Chemische Zusammensetzung und dynamische Struktur der Jupiter-Atmosphäre
- Aufbau und Dynamik der Magnetosphäre des Jupiters
- Charakterisierung der morphologischen und geologischen Beschaffenheit sowie des Oberflächenzustandes der Galileischen Monde.

Historische Entwicklung und Flugbahnplanung

Die GALILEO-Sonde sollte ursprünglich schon 1982 vom Space-Shuttle aus mit der Raketenstufe Centaur direkt zum Jupiter geschossen werden. Wegen Verzögerungen des Shuttleprogramms wurde der Start zunächst auf 1986 verschoben. Nach der Challenger Katastrophe hielt man den Transport einer mit Flüssigwasserstoff betriebenen Raketenstufe an Bord eines bemannten Raumschiffes als zu risikobehaftet. Bei Computersimulationen im Jet Propulsion Laboratory fand man einen Ausweg, um den ca. 3000kg schweren Galileo dennoch auf die nötige Geschwindigkeit zu bringen: eine Feststoffrakete, die Inertial Upper Stage (IUS) die bis dahin lediglich Nachrichtensatelliten aus der Shuttle-Bahn in die geostationäre Bahn gehoben hatte, sollte Galileo wenigstens in Richtung Venus schießen. Durch drei **Gravity Assists** wird die Sonde auf ihrer ausgeklügelten Bahn beim Vorbeiflug (**Swingby**) an der Venus und zwei erneuten Vorbeiflügen an der Erde Energie abzweigen, um den Jupiter zu erreichen. Als Startfenster ergab sich Oktober/November 1989. Der Start des Space Shuttle Atlantis mit Galileo inklusive IUS erfolgte am 18.10.1989 vom Kennedy Space Center, die Flugdauer erhöhte sich aufgrund des VEEGA-Konzeptes (Venus Earth Gravity Assist) von ursprünglich zwei auf sechs Jahre (Abb.1). Während dieser interplanetarischen Reise werden zusätzliche Beobachtungen des Asteroidengürtels gemacht.

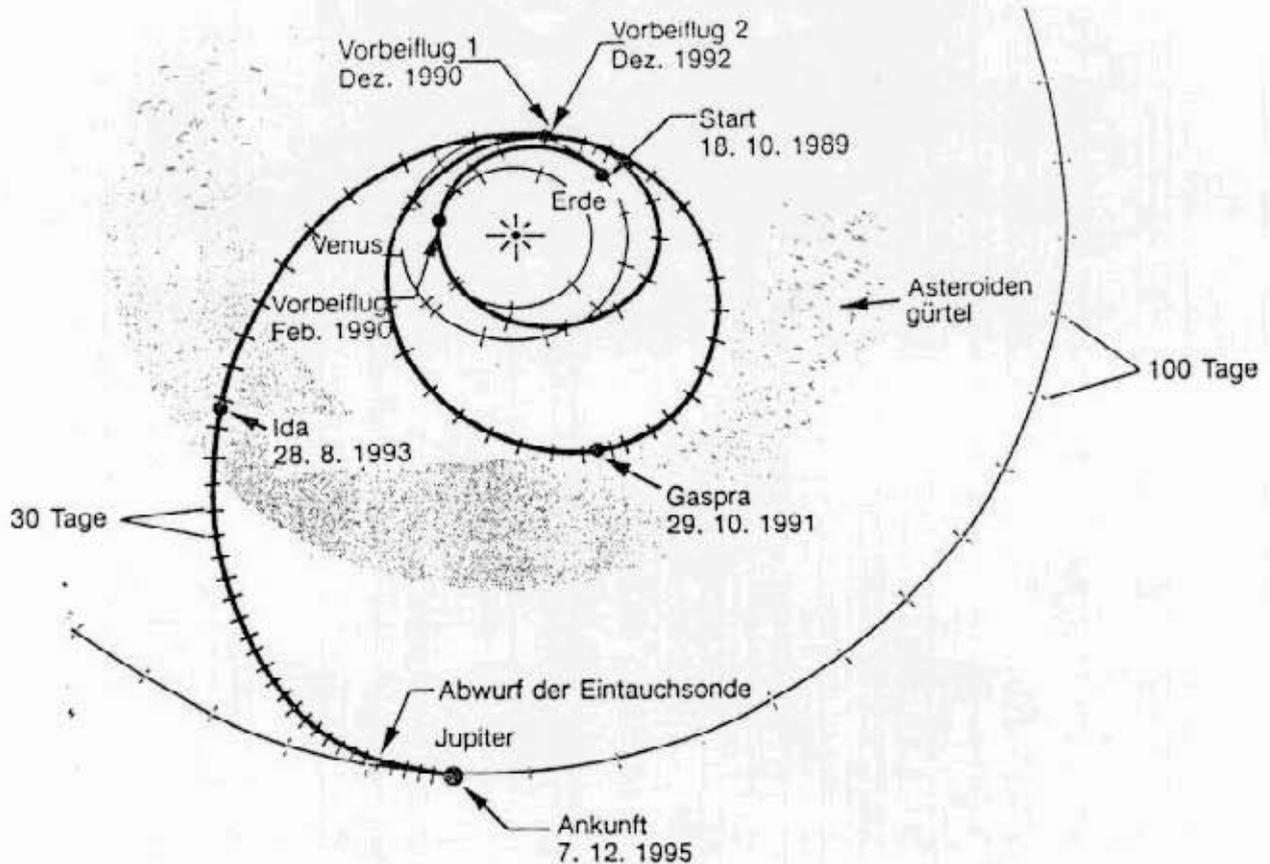


Abb. 1: Die komplizierte Flugbahn von der Erde zur Venus, zur Erde, nochmals zur Erde und endlich zum Jupiter [2].

Das Raumfahrzeug

Die GALILEO-Sonde (Abb.2) besteht aus dem Orbiter und der Atmosphärensonde (Entry Probe), einer Instrumentenkapsel, die fünf Monate vor der Ankunft abgetrennt wird und in die Atmosphäre des Jupiter eintaucht. Der Orbiter dient dabei als Relaisstation für die Funksignale. Er selbst soll in den nächsten zwei Jahren Aufnahmen von den Jupitermonden machen. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die hochempfindliche elektronische CCD-Kamera, die digitale Bilder in verschiedenen Spektralbereichen aufnimmt¹. Das Raumfahrzeug besteht aus einem drallstabilisierten (drehende Instrumentenplattform) und einem nichtrotierendem Teil (raumstabile Plattform für Fernerkundungsexperimente). Die Sonde ist mit 16 wissenschaftlichen Experimenten bestückt, sechs davon sind in der Atmosphärensonde untergebracht. Ein deutscher Beitrag wurde 1977 zwischen der NASA und dem BMFT vereinbart. Er besteht aus zwei Experimenten, der Beteiligung an weiteren fünf und der Entwicklung des Antriebsmoduls (Retro Propulsion Module RPM) für den Orbiter und der Sonde durch MBB. Zusätzlich ist das German Space Operation Center (GSOC) in die Missionsdurchführung eingebunden.

¹ Für den Unterricht ausgearbeitetes Material zur Funktion moderner Satellitenkameras findet sich in [9], zur Fernerkundung der Erde mit Satellitenbildern in [8].

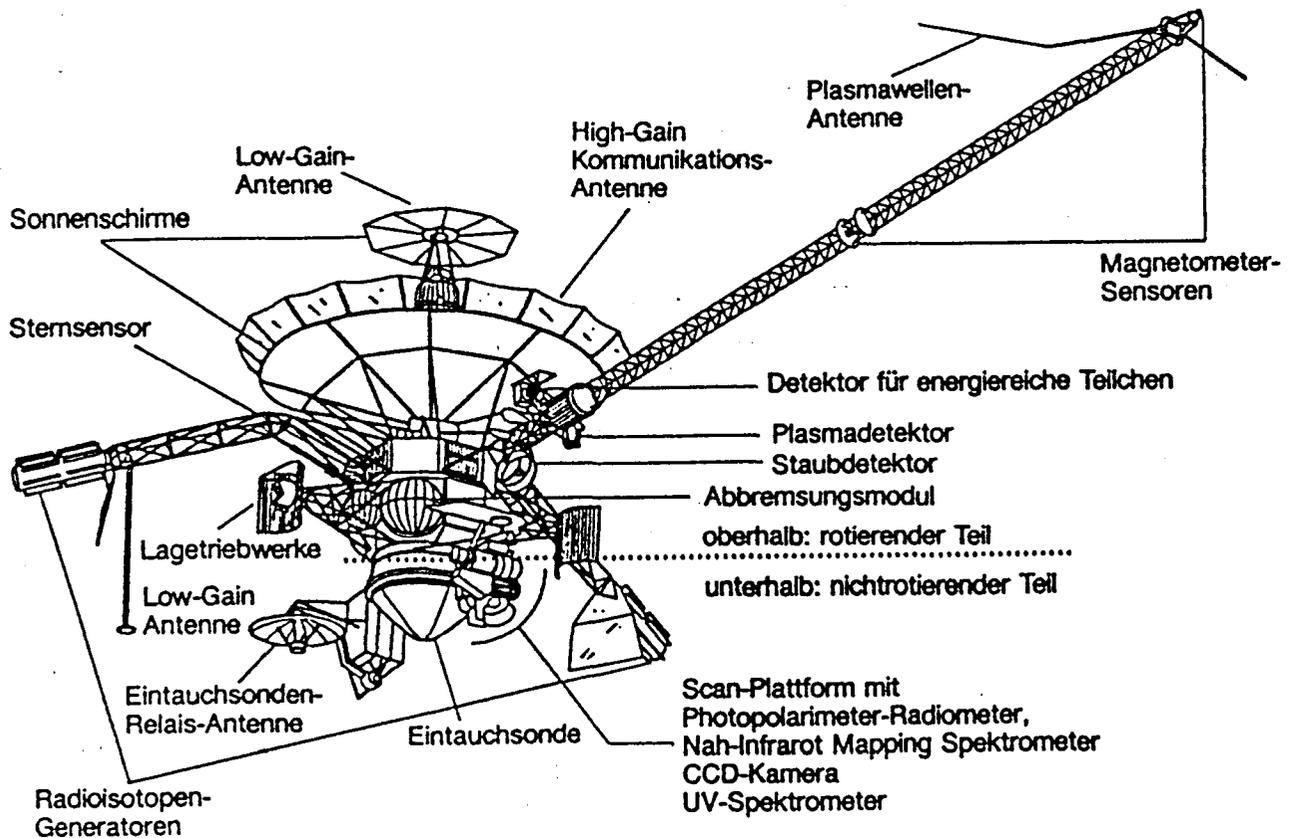


Abb. 2: Die Jupitersonde Galileo. Zum Größenvergleich: Die große Antennenschüssel besitzt einen Durchmesser von 4,8m [2].

2. Entwurf einer Unterrichtseinheit

Für die Umsetzung in den Unterricht ergeben sich in etwa folgende

Problemstellungen:

- Welche Energie (Geschwindigkeit) braucht man, um von der Erde zum Jupiter zu gelangen?
- Wie wählt man energetisch günstige Bahnen, welche Reisezeiten ergeben sich? Warum ist ein Start mit Antriebsmodulen vorgegebener Schubkraft nur innerhalb gewisser Startfenster möglich?
- Wie nutzt man mit der Swingby-Technik die Gravitationswirkung von Planeten, um Energie zu sparen?

Für die Erarbeitung dieser Probleme sind als **fachliche Voraussetzungen** nötig: Gravitationsgesetz, Energiesatz und Kreisbewegung. Vorteilhaft sind mathematische Grundkenntnisse über Kegelschnitte.

Im Rahmen des Physikunterrichts werden üblicherweise kreisförmige Satellitenbahnen (erdnah, geostationär) mit den Bahnbedingungen behandelt. In der Abb.3 sind die Übergänge von der Kreisbahn zur Ellipsen-, Parabel- und Hyperbelbahn mit der Erde als Zentralkörper zusammengestellt.

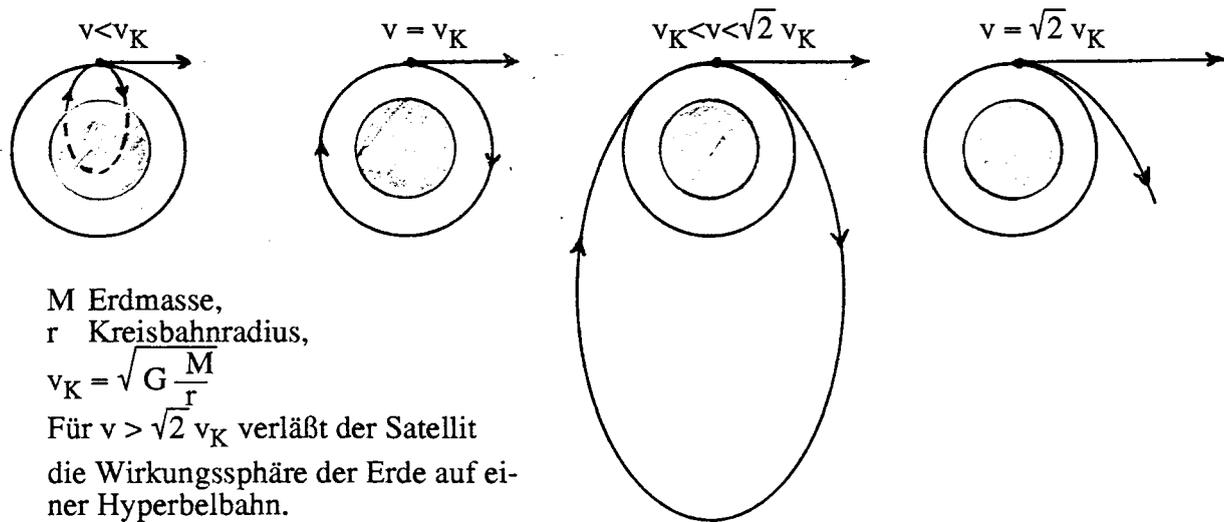


Abb. 3: Bahnen eines Erdsatelliten in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit.

Hat die Sonde die Fluchtgeschwindigkeit von der Erde von 11,2km/s erreicht, bewegt sie sich zunächst mit der Erde auf einer "Parkbahn" mit $v = 29,7\text{km/s}$ um die Sonne, erst durch eine Zusatzgeschwindigkeit gelangt sie auf eine interplanetare Bahn. Zur Beschreibung von interplanetaren Bahnen im Unterricht müssen zunächst Vereinfachungen gemacht werden:

- kreisförmige koplanare Planetenbahnen
- Sonne mit Masse M im Mittelpunkt
- keine Störungen durch andere Planeten
- Wirkung der Erdatmosphäre bleibt unberücksichtigt
- Beschränkung auf Zweikörperprobleme

Die Beschränkung auf Zweikörperprobleme bedeutet, daß man beim Start auf dem Ausgangsplaneten, beim Vorbeiflug an Planeten und der Landung auf dem Zielplaneten die Gravitation nur innerhalb einer "Wirkungssphäre" betrachtet (die Anziehungskraft des Planeten ist innerhalb der Wirkungssphäre größer als die Anziehungskraft der Sonne). Während der interplanetaren Reise wird nur die Wechselwirkung von Galileo mit der Sonne berücksichtigt. Dieses vereinfachte Vorgehen zeigt trotzdem die Grundzüge der komplexen Planung von Raummissionen und gleichzeitig, wie in Raumfahrtzentren durch aufwendige Störungsrechnungen mit Computern die exakten Bahndaten ermittelt werden müssen. Ein Hinweis auf verheerende Einflüsse kleiner Störungen auf die Zielgenauigkeit sollte hier erfolgen. Bereits die Mariner-10 Sonde zur Erkundung von Venus und Merkur erreichte Mitte der 70-er Jahre eine minimale Bahnabweichung von 20km auf ihrer

250 Mio. km Strecke (bei gleicher Zielgenauigkeit müßte man ein Zehnpfennigstück auf 250km Entfernung treffen). Während des Fluges wird deshalb die Bahn mehrmals korrigiert und ständig durch aktuelle Bahnbestimmungen überwacht.

Für die Berechnung der potentiellen Energie im Gravitationsfeld bieten sich an dieser Stelle als Beitrag des Mathematikunterrichts Summationsverfahren über kleine Wegabschnitte an, falls Integrationsverfahren noch nicht verfügbar sind. Damit ergibt sich:

$$(1) \quad W_{\text{pot}} = -G \frac{mM}{r}$$

M Masse des Zentralkörpers
G Gravitationskonstante
r Bahnradius
m Masse der Raumsonde.

Damit ist die Gesamtenergie W_{ges} für die Kreisbahn:

$$(2) \quad W_{\text{Ges}} = \frac{1}{2} mv_K^2 - G \frac{mM}{r} = -\frac{1}{2} G \frac{mM}{r}$$

Für Ellipsenbahnen ergibt sich die Gesamtenergie, indem man r durch die große Halbachse a ersetzt. Eine Herleitung findet man z.B. in der Handreichung zum Astronomieunterricht des ISB [3]. Mit größerem Aufwand läßt sich daraus auch das sog. "vis-viva" Integral herleiten, aus der man im beliebigen Abstand r von der Zentralmasse M die momentane Geschwindigkeit v der Sonde in der Ellipsenbahn mit der großen Halbachse a berechnen kann:

$$(3) \quad v = \sqrt{GM\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}$$

Für $a=r$ ergibt sich daraus speziell die Kreisbahngeschwindigkeit und für a gegen ∞ die Fluchtgeschwindigkeit v_F .

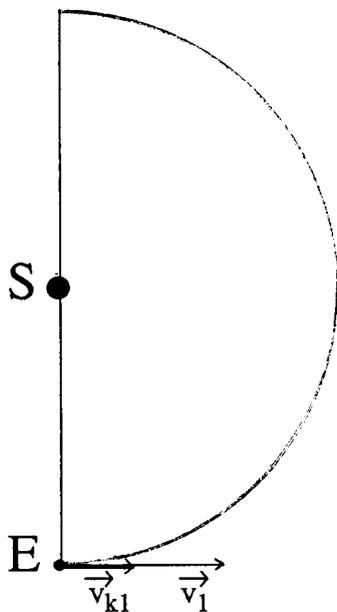
Es sind verschiedenste Bahnen mit unterschiedlichem Energiebedarf denkbar, um von der Erde ($r=1\text{A.E.}$) zum Jupiter ($r=5,2\text{A.E.}$) zu gelangen. Aufschlußreich ist die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs pro kg transportierter Masse für eine quasizirkuläre Bahn. Die Sonde müßte sich dazu auf einer nahezu kreisförmigen Bahn, deren Radius beständig, aber sehr langsam, wächst, zum Jupiter bewegen. Der spezifische Energiebedarf ergibt sich dann aus der Differenz der Gesamtenergien von Erde und Jupiter nach (2) zu $3,6 \cdot 10^8 \text{J/kg}$.

Die Reisezeit wäre freilich sehr lang. Günstige Bahnen sind solche, bei denen das Raumfahrzeug zwar auch tangential zur Bahn des Startplaneten Erde beschleunigt wird aber sich anschließend mit der erhöhten Geschwindigkeit auf einer Ellipsenbahn zum Zielplaneten Jupiter bewegt. Diese sogenannten Hohmann-Bahnen sollen im folgenden untersucht werden.

2.1 Start von der Erde, Einschwenken auf eine Hohmann-Bahn

Soll eine Raumsonde von der Erde (Planet 1) auf eine solche elliptische interplanetare Bahn gebracht werden (Abb.4), braucht man von der Erde aus zunächst die parabolische Startgeschwindigkeit von 11,2km/s, damit sie im Unendlichen die planetozentrische Geschwindigkeit $v_{1\infty}' = 0$ erhält (Verlassen der Wirkungssphäre). Heliozentrisch bewegt sich die Sonde dann zusammen mit der Erde mit der Geschwindigkeit $v_1 = v_{K1} + 0$ auf der Ausgangsbahn ($r=r_1$). Um eine kinetische Überschussenergie beim Eintritt in die interplanetare Phase zu erhalten, benötigt man von der Erde aus eine Geschwindigkeit $v_{1\infty}' > 0$, die zu einer hyperbolischen Bahn führt ($v_{1\infty}'$ ist die hyperbolische Exzeßgeschwindigkeit). Heliozentrisch bedeutet das eine Zusatzgeschwindigkeit Δv_1 zur Kreisbahngeschwindigkeit $v_{K1} = 29,7 \text{ km/s}$ der Erde

$$(4) \quad \vec{v}_1 = \vec{v}_{K1} + \Delta\vec{v}_1;$$



- S Sonne
- E Erde
- \vec{v}_{K1} Kreisbahngeschwindigkeit der Erde (29,7km/s)
- \vec{v}_1 heliozentrische Geschwindigkeit für eine interplanetare Mission
- $\Delta\vec{v}_1$ heliozentrische Zusatzgeschwindigkeit zu \vec{v}_{K1}

Abb. 4: Interplanetare Bahnen

Ein Vergleich mit der Geschwindigkeit, die nötig ist, um von der Erde aus das Planetensystem ganz zu verlassen, bietet sich an:

$$v_F = 42,0 \text{ km/s} \quad \Delta v_1 = 12,3 \text{ km/s}$$

(In den Start/Ankunftsdiagrammen der Abb.6 wird später anstatt der Zusatzgeschwindigkeit der energiebezogene Parameter $C_3^2 = \Delta v_1^2$ verwendet.)

2.2. Reisezeiten und Geschwindigkeitsbetrachtungen für Hohmann-Bahnen

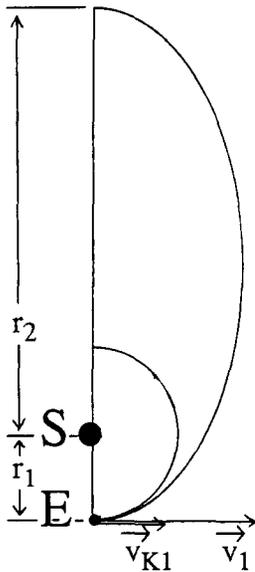
Für die elliptische Hohmann-Bahnen mit dem sonnennächsten Punkt an der Erdbahn und dem sonnenfernsten an der Jupiterbahn (Abb.5) lassen sich die heliozentrische Zusatzgeschwindigkeit Δv_1 und die Reisezeit z.B. aus (3) und dem 3.Keplerschen Gesetz errechnen [4,5]:

$$\text{Reisezeit zum Jupiter} \quad T_H = \frac{1}{2} T_0 \left(\frac{a}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} = 2,7 \text{ a}$$

$$\text{Geschwindigkeit } v_1 \text{ am Perihel} \quad v_1 = \sqrt{GM\left(\frac{2}{r} - \frac{2}{r_1+r_2}\right)}$$

$$\text{Nötige Zusatzgeschwindigkeit} \quad \Delta v_1 = v_1 - v_{K1}$$

In den bisherigen Betrachtungen blieb unberücksichtigt, daß die Sonde im Aphel, wenn sie die Jupiterbahn erreicht, zu langsam ist, um mit der Kreisbahngeschwindigkeit $v_{K2} = 13,0\text{km/s}$ des Jupiter aufzuschließen. Es bedarf also einer nochmaligen Geschwindigkeitserhöhung, diesmal um ca. $5,6\text{km/s}$, da sich für die Sondengeschwindigkeit im Aphel etwa $7,4\text{km/s}$ ergibt.



<u>Bahnradius</u>	<u>Kreisbahngeschwindigkeit</u>
Erde $r_1 = 1 \text{ A.E.}$	$v_{K1} = \sqrt{\frac{GM}{r_1}}$
Jupiter $r_2 = 5,2 \text{ A.E.}$	$v_{K2} = \sqrt{\frac{GM}{r_2}}$

Sonnenmasse M, Gravitationskonstante G

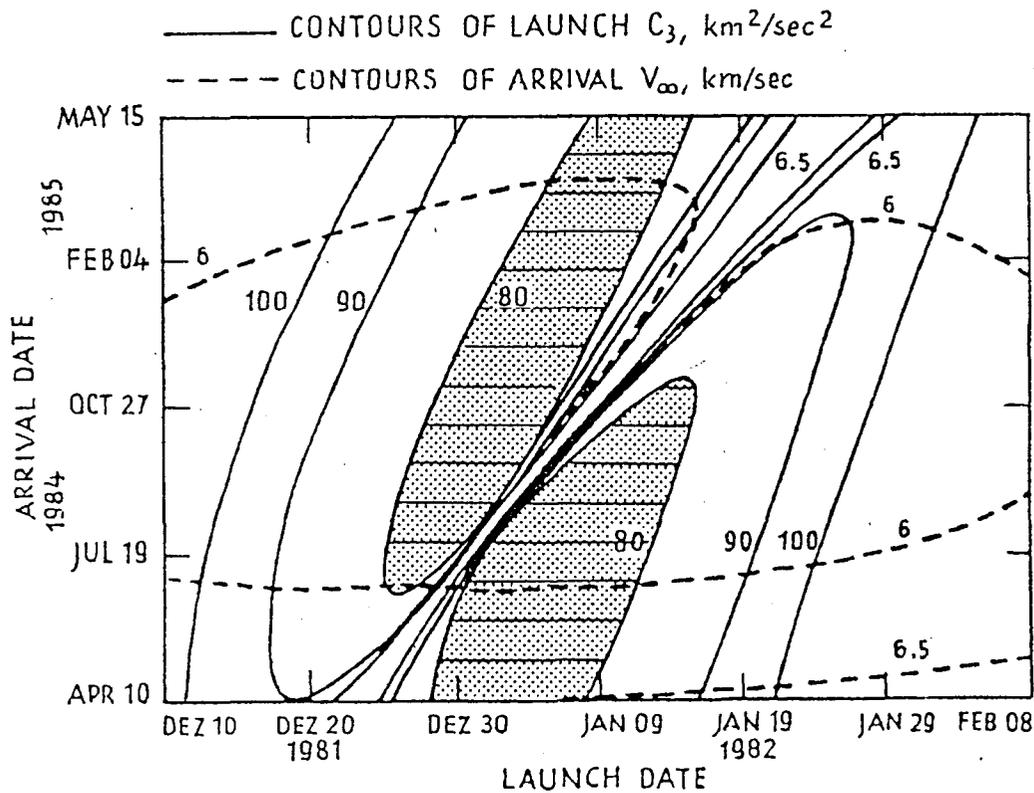
Große Halbachse der Hohmannbahn

$$a = \frac{r_1 + r_2}{2} = 3,1 \text{ A.E.}$$

Abb. 5: Hohmann-Bahn

In dem Start/Ankunftsdiagramm für beliebige Bahnen (Abb.6) wird deutlich, was die Zusatzgeschwindigkeit Δv_1 bedeutet. Solche Diagramme zur Planung von Raumflugmissionen veranschaulichen den nötigen Energieaufwand, der durch den Parameter $C_3 = \Delta v_1^2$ charakterisiert wird. Aus Abb.6 kann man z.B. ablesen, welche Energie pro Masse aufgewendet werden muß, um bei dem geplanten Startdatum den Jupiter zu einem bestimmten Ankunftsdatum zu erreichen. Für die Erstellung eines solchen Diagramms müssen alle Planetenpositionen zu diesen Daten bestimmt sein und die entsprechenden Geschwindigkeiten berechnet werden. Der schraffierte Bereich enthält

z.B. alle möglichen Start- und Ankunftszeiten, die bei einer Technik in Frage kommen, die maximal $C_3^2 = 80 \text{ km}^2/\text{s}^2$ erreicht.



Start/Ankunftsdiagramm aus einer Untersuchung über Jupiter-Raumflüge (C. Uphoff u. a.).

- Linien mit gleichem Energieparameter C_3
- - - - Linien mit gleicher relativer Ankunftszeit v_∞
- Abszisse: Abschlußdatum; Ordinate: Ankunftsdatum

Abb. 6: Raumflugplanung
Energieaufwand und Startfenster [4]

2.3 Gravitationsschleuder für GALILEO (Swingby-Technik)

Durch geschickte Bahnwahl gelingt es, im Vorbeiflug an einem Planeten der Raumsonde Energie zuzuführen. Bei diesem Swingby-Manöver kommt Galileo dem Planeten bis auf einige hundert Kilometer nahe. Wie eine Sonde im Vorbeiflug an einem Planeten Energie gewinnen kann, ist zunächst dem Schüler nicht einsichtig, da vom Planeten aus betrachtet die Sonde auf ihrer hyperbolischen Bahn nur die Geschwindigkeitsrichtung, nicht aber ihren Betrag ändert. Für die folgenden Überlegungen ist eine klare Trennung zwischen **heliozentrischem** und **planetozentrischem Bezugssystem** wesentlich. Heliozentrisch wird bei jedem Planetenvorbeiflug die große Halbachse

der Sondenbahn gedreht und zusätzlich vergrößert (Abb.1). In der Abb.7 wird die Swingby-Technik anhand des ersten Vorbeiflugs an der Erde (Earth Gravity Assist 1) am 8.12.90 erläutert.

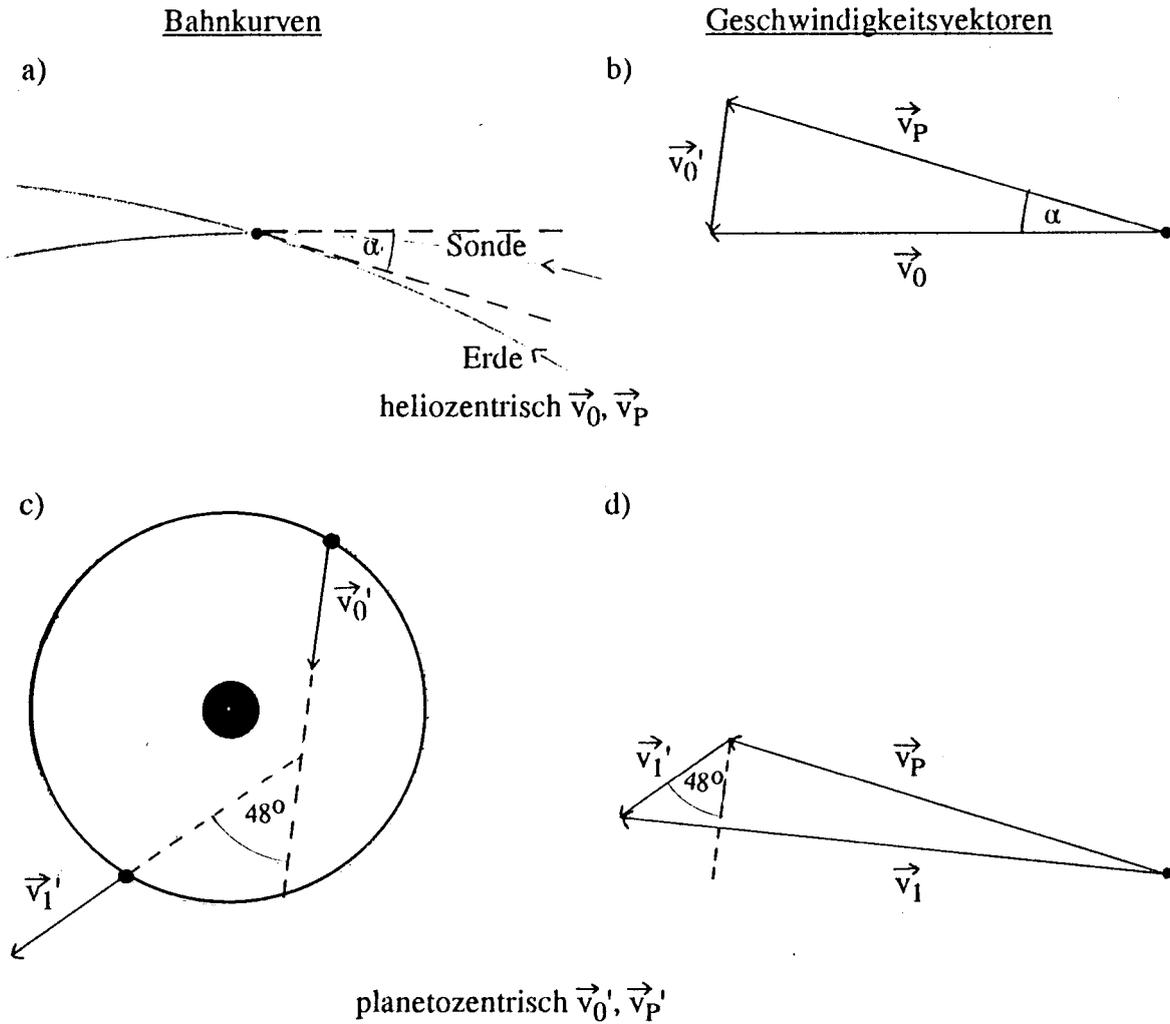


Abb. 7: Swingby-Technik

Für die Erklärung muß wie in Abb.7 zwischen heliozentrischem und planetozentrischem Bezugssystem unterschieden werden. Zunächst holt der Planet (in diesem Fall die Erde) mit seiner heliozentrischen Geschwindigkeit \vec{v}_P Galileo ein, der sich mit der Geschwindigkeit \vec{v}_0 bewegt. Erd- und Sondenbahn kreuzen sich am Begegnungspunkt unter dem Winkel α (hier ungefähr 17°). Wegen der großen Sonnenentfernung kann heliozentrisch der Wirkungsbereich der Erde punktförmig angenommen werden. Für einen Beobachter auf dem Planeten fällt Galileo mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_0' = \vec{v}_0 - \vec{v}_P$ aus dem Unendlichen auf ihn zu (Abb.7b liefert etwa 9km/s). Danach bewegt sich Galileo auf einem Hyperbelast um den Planeten herum und verläßt dessen Wirkungsbereich wieder mit der Geschwindigkeit \vec{v}_1' , wobei sich der Geschwindigkeitsvektor gedreht hat (hier um 48°). Zwar hat sich der Betrag der Geschwindigkeit **planetozentrisch** nicht geändert, aber die

76

Richtungsänderung führt nach dem Swingby zu einer **heliozentrischen Geschwindigkeit** $\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_p$, die **betragsmäßig höher** ist. Nach dem ersten Erdvorbeiflug (EGA 1) hat sich die die Geschwindigkeit von Galileo nach Abb.7 um ca. 6km/s von 29km/s auf 35km/s erhöht, was einen Energiegewinn von $1,9 \cdot 10^8 \text{ J/kg}$ bedeutet. Neben der zwangsläufigen Drehung der großen Halbachse führt der Geschwindigkeitszuwachs zu einer Vergrößerung derselben von 1 A.E. auf 1,6A.E.; letzteres läßt sich aus (3) berechnen. Die Abb.8 zeigt den Vorgang nochmals aus platenozentrischer Sicht mit der zugehörigen Trajektorienprojektion auf die Erde.

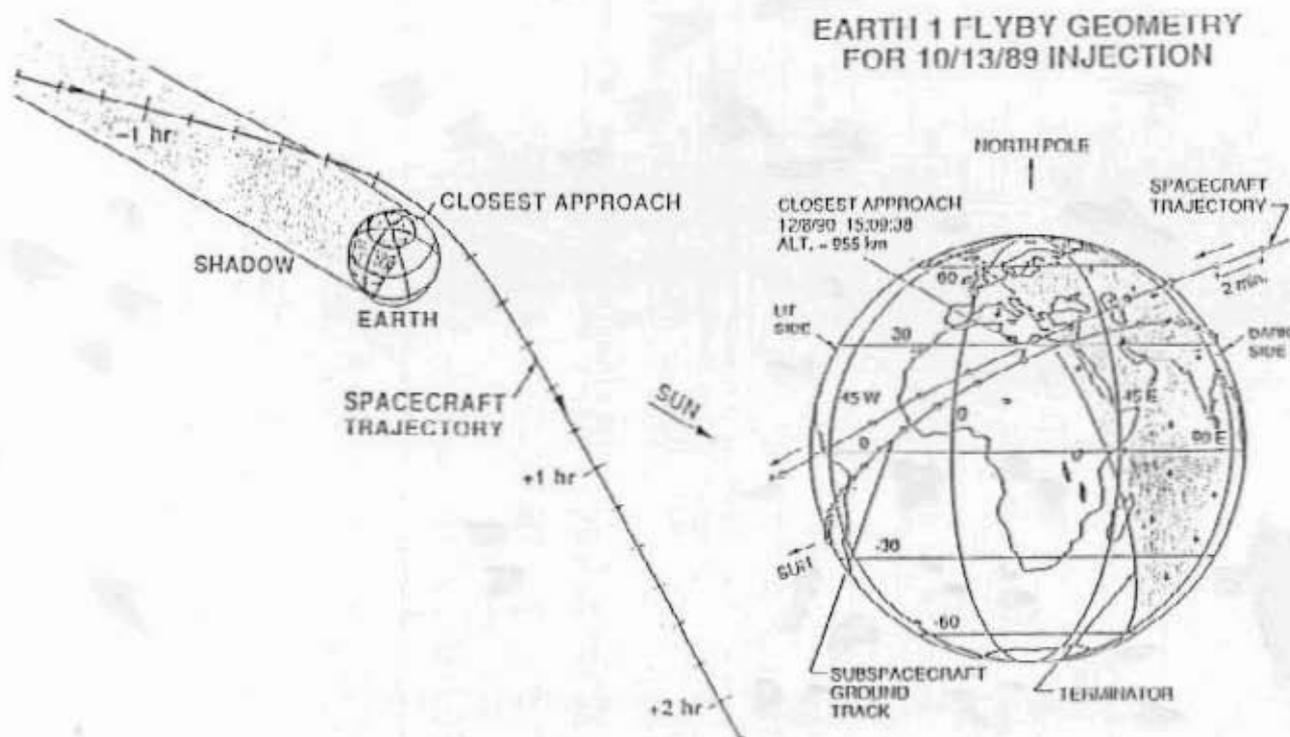


Abb. 8: Flugbahn von Galileo beim ersten Erdvorbeiflug am 8.12.1990 [10].

Die mathematische Behandlung des Vorgangs als elastische Streuung führt sicher zu weit, aber qualitative Aspekte lassen sich erläutern. Für eine starke Ablenkung muß die Sonde sehr nahe und langsam am Planeten vorbeifliegen. Je massereicher der Planet ist, umso stärker ist die Ablenkung, die jedoch immer kleiner als 180° bleibt. Der Stoßparameter charakterisiert den Zielpunkt, den der Raumflugdynamiker für die gewünschte Ablenkung anpeilen muß.

Wesentliche Aspekte von interplanetaren Bahnen können auch mit vereinfachten Computersimulationen im Rahmen der Informationstechnischen Grundbildung (ITG) und in Facharbeiten untersucht werden [6,7].

Die hier vorgelegte Studie ist ein überarbeiteter Bestandteil einer fächerübergreifenden Handreichung zum Thema "Luft- und Raumfahrt"[8]. Diese wurde im Rahmen eines vom AGW e.V. ange-

regten Modellversuchs ("Herausforderung der modernen Technik an die gymnasiale Bildung") der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung, unter Betreuung des ISB München und mit finanzieller Unterstützung der Firma MBB erarbeitet. Neben didaktischen und methodischen Erläuterungen enthält die Handreichung ausführliche Versuchsbeschreibungen, praxisorientierte Unterrichtsbeispiele und ausgearbeitete Anregungen zum fächerübergreifenden Unterricht.

An dieser Stelle sei Herrn Dipl.-Phys. O.Montenbruck von der DLR Oberpfaffenhofen für wertvolle Hilfen und Anregungen gedankt.

3. Literatur

- [1] o.V., Projekt Galileo, Projektbeschreibung der DLR, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.v., Linder Höhe, 5 Köln 90.
- [2] Fischer, D., Die lange Reise zum Jupiter in: Sterne und Weltraum, Heft 12/89, S.714-717
- [3] o.V., Handreichung für den Physikunterricht im Gymnasium, Kollegstufe, Grundkurs Astronomie, Hrsg. Staatsinstitut für Schulpädagogik und Bildungsforschung, München 1988
- [4] Giese, R-H., Einführung in die Astronomie, Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt 1981.
Das Buch enthält Grundlegendes zur sphärischen Astronomie und Himmelsmechanik, sowie Beispiele zur Raumflugmechanik, zu antriebslosen Raumflugbahnen und zur Swingby-Technik.
- [5] Fahr, H.J., Materialien für den Physikunterricht, Commerzbank ZVK, Frankfurt 1986.
- [6] o.V., Bahnen in Gravitationsfeldern, Begleitheft zum Programmsystem GRAV, Hrsg. Zentralstelle für Computer im Unterricht, Augsburg 1987.
Das Begleitheft erläutert die zugehörige umfangreiche Sammlung von PC-Programmen von P. Kraemer, Celtis-Gymnasium Schweinfurt, zu Planetenbahnen und Raumflügen. Sie enthält u.a. auch Simulationen zum Jupitervorbeiflug, zu Hohmann-Bahnen und zu verschiedenen Satellitenbahnen.
- [7] Buchheit, D., Ausgewählte Beispiele zur computerunterstützten Berechnung der Bewegung eines Körpers im Gravitationsfeld mehrerer Himmelskörper, Facharbeit Physik, Gymnasium Starnberg 1990.

Der Autor liefert das Programmpaket IKARUS (ca. 70.--DM) für "experimentelle" Astrophysik zum Nachstellen interplanetarer Raumflüge. Für die Programme, die unter WINDOWS 2.X laufen, benötigt man einen PC mit mindestens 512kB RAM. Der Galileoflug ist u.a. als Beispiel enthalten. Kontaktadresse: D.Buchheit, Söckinger Str.11, 8130 Starnberg).

- [8] Luft- und Raumfahrt, Handreichung für den fächerübergreifenden Unterricht, Hrsg. Arbeitskreis Gymnasium und Wirtschaft e.V., Implerstr.25a, 8 München 70, 1991.
- [9] Schmidt, W., Physikaufgaben, Beispiele aus der modernen Arbeitswelt, Klett Verlag Stuttgart 1987.
- [10] Clarke Th.C., Fanale F.P., Galileo: The Earth and Moon Encounters, Jet Propulsion Laboratory CIT Pasadena, California, 1989.