

Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformation für Lehrer

Thema: Swing-by-Manöver – Ein Thema für die Schule?

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

Planetare Missionen jenseits von Mars und Venus

Akzeptiert man, dass die Erforschung der fernen Planeten mithilfe von Raumsonden zu den größten kulturellen und wissenschaftlichen Leistungen der Menschheit gehört, dann lässt sich nur schwer begründen, weshalb die physikalischen Voraussetzungen planetarer Raumfahrtmissionen nicht auch im Schulunterricht erörtert werden sollten. Eine ganz entscheidende Voraussetzung, um Raumsonden in die entfernten Regionen unseres Sonnensystems zu katapultieren, ist das gravitative Schwungholen beim Vorbeiflug an einem Planeten.

Premiere erlebte dieses heute als fly-by oder swing-by bezeichnete Verfahren übrigens im Februar 1974, als Mariner 10 beim Passieren der Venus auf eine Anflugbahn in Richtung Merkur gebracht wurde. Wir feiern demnach bald ein denkwürdiges Jubiläum: 30 Jahre Swing-by-Manöver in der irdischen Raumfahrt!

Didaktische Stolpersteine beim Verstehen des Swing-by-Manövers

Um die „Ehre“ der Schulphysik zu retten sollte nicht unerwähnt bleiben, dass viele Aspekte der Raumfahrt natürlich längst Teil der Lehrpläne sind – man denke etwa an Themen wie „Schwerelosigkeit“ oder „Impulserhaltung beim Raketenantrieb“. Das Argument, Schüler würden während ihres Unterrichtes nur lernen, dass sich die Bewegungsenergie eines Körpers durch Stoßvorgänge ändert und hätten deshalb wahrscheinlich Probleme damit, die Energieänderung zweier Objekte infolge des Gravitationsfeldes nachzuvollziehen, wäre übrigens auch nicht zutreffend. Felder als Speicherort und Vermittler von Energie sind Schulstoff, die Beschleunigung von Elektronen im elektrischen Feld wird in der gymnasialen Oberstufe berechnet, ebenso wie die Beschleunigung von schweren Körpern im Gravitationsfeld der Erde.

Völlig neu sind für die Schüler beim Swing-by-Manöver allerdings zwei Sachverhalte: Erstens hat man es beim Swing-by-Vorgang nicht mit einem ruhenden, sondern mit einem relativ zur Sonne bewegten Gravitationsfeld eines Planeten zu tun, von dem die Wirkung auf die Raumsonde ausgeht, und zweitens gelangt man nur dann zu einer besonders effektiven Analyse des Swing-by-Prozesses, wenn man ihn aus dem Blickwinkel zweier Koordinatensysteme betrachtet. Koordinatensystemwechsel zur Gewinnung von Erkenntnissen (?) – dieses Thema wird in der Schule, vielleicht abgesehen von einer kurzen Einführung in die Relativitätstheorie, allenfalls gestreift und entsprechend ungeübt ist das Denken auf der Grundlage dieser Methode.

Angesichts dieser Probleme sollte man sich also auf langsames und schrittweises Vorgehen durch kleine Teilüberlegungen einstellen. Nachfolgend werden hierzu Varianten vorgestellt. Außerdem sollten die Schüler ihre Kenntnisse in der Addition und Subtraktion von Vektoren auffrischen, auch der Energieerhaltungssatz der Mechanik müsste vor der Besprechung des Swing-by wiederholt werden.

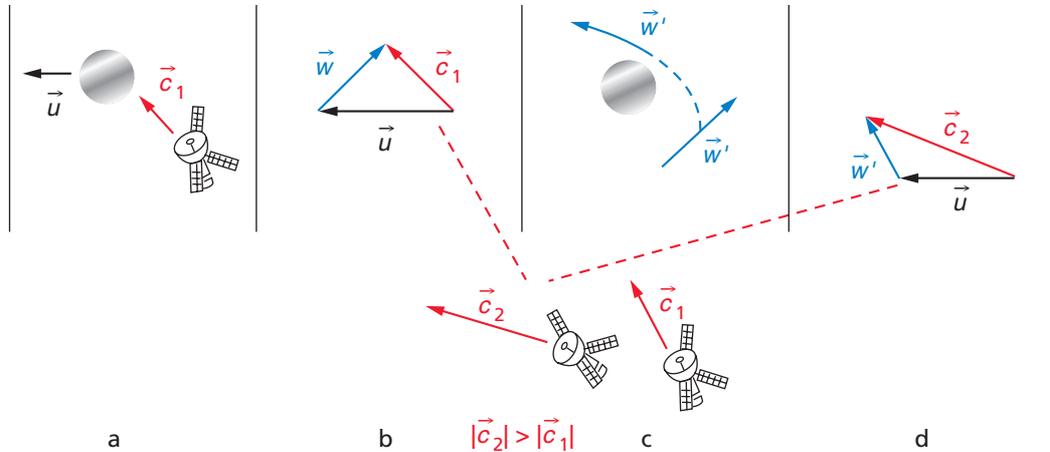
Swing-by in Teilschritten

a) Voranalyse (Der gedachte Beobachter befinde sich im Zentrum des Planetensystems)

Betrachten wir von der Sonne aus eine Raumsonde, die sich einem Planeten mit dem Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_1 annähert (Abb. 1a). Das Swing-by-Manöver geht recht schnell vonstatten, sodass sich der Planet dabei auf seiner Bahn um die Sonne kaum weiter bewegt. Der Geschwindigkeitsvektor \vec{u} des Planeten zeigt daher während des Swing-by-Vorgangs immer in die gleiche Raumrichtung, sein Betrag ist konstant – kurzum, wir können \vec{u} für alle nachfolgenden Überlegungen als festen Vektor ansehen.

Vergleichen wir modellhaft die Raumsonde mit einem Eisenbahnschaffner, den Planeten mit dem Zug, dann sind \vec{u} die Geschwindigkeit des Zuges und \vec{c}_1 die Geschwindigkeit des Schaffners relativ zum Bahndamm.

Abbildung 1



b) Geschwindigkeit der Raumsonde vom Planeten aus gesehen (Wechsel des Koordinatensystems)

Um die Geschwindigkeit \vec{w} des Schaffners relativ zum Zug zu bestimmen, hätte man von \vec{c}_1 die Zuggeschwindigkeit \vec{u} zu subtrahieren. Die Geschwindigkeit der Raumsonde in Bezug auf den Planeten ist also ebenfalls zu ermitteln, indem man vektoriell die Differenz aus Sondengeschwindigkeit und Planetengeschwindigkeit bestimmt (Abb.1b).

c) Flugmanöver der Sonde vom Planeten aus gesehen

Vom Planeten betrachtet dringt die Sonde mit der Geschwindigkeit \vec{w} in seinen Schwerkraftbereich ein. Für alle Bewegungen der Sonde im Gravitationsfeld gilt der Energieerhaltungssatz der Mechanik: Die kinetische Energie des Flugkörpers kann demnach nicht verloren gehen, sondern allenfalls in Form von potenzieller Energie zwischengespeichert werden. Dies bedeutet: Die Raumsonde muss den Anziehungsbereich des Planeten wieder verlassen (sofern sie nicht unglücklicherweise auf die Oberfläche geprallt ist und ihre Bewegungsenergie in Wärme umwandelt wurde) und zwar mit exakt dem gleichen Geschwindigkeitsbetrag w , mit dem sie in dessen Anziehungsbereich eingetreten ist. Allerdings fordert der Energieerhaltungssatz nur, dass die Geschwindigkeitsbeträge beim Ein- und Austritt der Sonne gleich sind, die Richtung der Sondengeschwindigkeit darf (und muss) sich ändern. Das planetare Gravitationsfeld bewirkt somit lediglich eine Drehung des Vektors \vec{w} , als Resultat ergibt sich der neue Vektor \vec{w}' , wobei für die Beträge dieser Vektoren gilt: $w = w'$ (Abb. 1c)

d) Die Sonde verlässt den Anziehungsbereich des Planeten (Wechsel des Koordinatensystems)

Von der Sonne aus gesehen, hat der Planet die Raumsonde ein kleines Stück seines Weges mit sich geführt. Trotz der vergleichsweise kurzen Dauer dieses Vorganges genügte die Zeit, um dem Raumflugkörper die Planetengeschwindigkeit \vec{u} aufzuprägen. Die Sonde verlässt das planetare Gravitationsfeld mit einer Geschwindigkeit \vec{c}_2 , die sich additiv aus den Vektorkomponenten \vec{u} und \vec{w}' zusammensetzt (Abb. 1d).

Kehren wir zu unserem Eisenbahnschaffner zurück. Kann er auch jetzt noch als „Modell“ der Raumsonde dienen? Ja – allerdings mit außergewöhnlich dramatischen Konsequenzen: Dem unglücklichen Mann lauert ein Schwarzfahrer auf, der ihn beim Laufen von hinten am Kragen packt, heftig anstößt und aus dem fahrenden Zug wirft. Von Bahndamm aus gesehen, prallt der Schaffner dann mit noch größerer Geschwindigkeit, als der Zug und er selbst ursprünglich besaßen, am Boden auf.

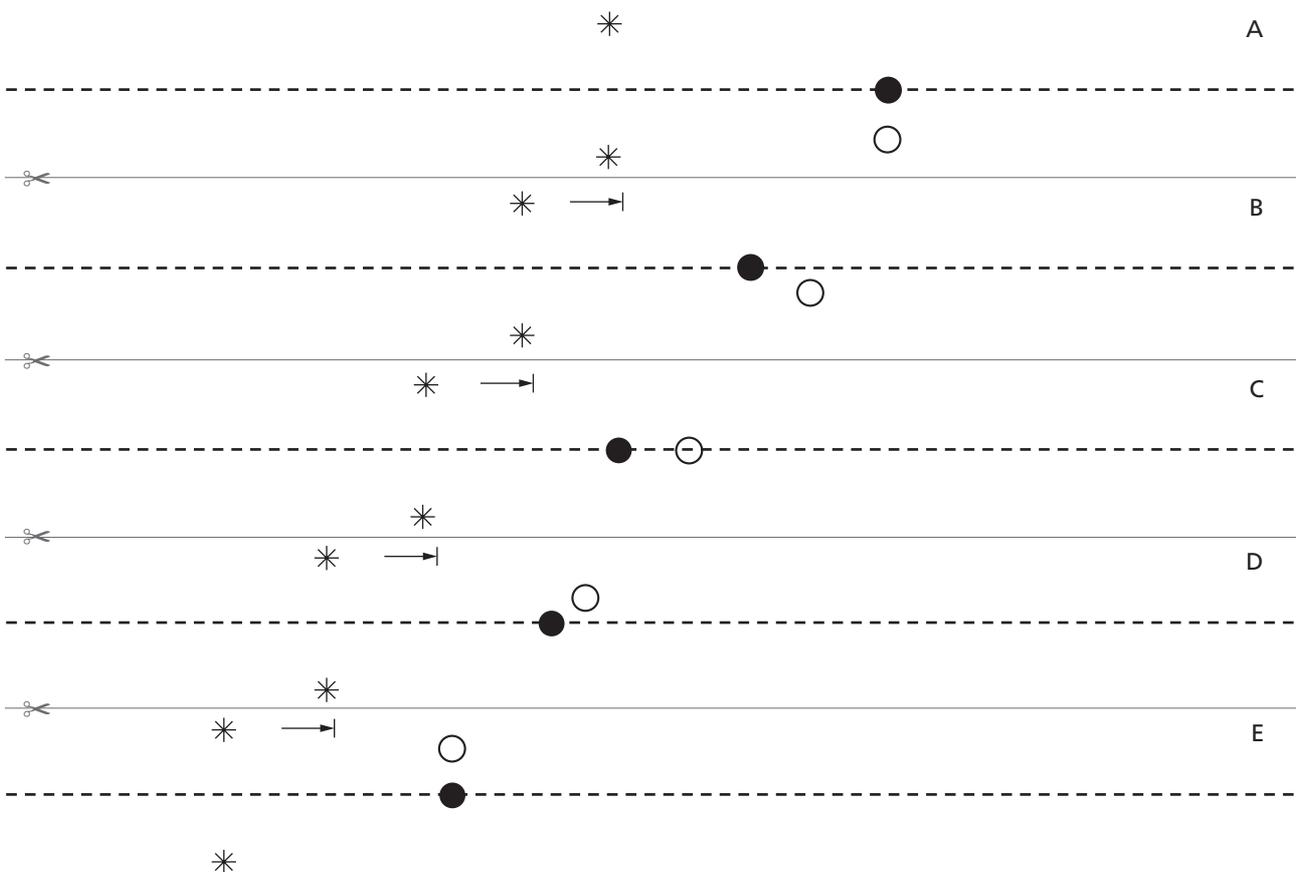
Anhand der Abbildungsfolge 1a–1d erkennt man, dass zur Geschwindigkeitszunahme beim swing-by-Manöver zwei Elemente beitragen:

- 1 Der Geschwindigkeitsvektor \vec{w} der Raumsonde wird in Richtung der Planetenbewegung gedreht.
- 2 Dem Flugkörper wird durch das Gravitationsfeld die Geschwindigkeit \vec{u} des Planeten aufgeprägt.

Folienbilder und ein Analogieexperiment

Den gedanklichen Wechsel zwischen den soeben beschriebenen Koordinatensystemen kann man durch den Einsatz spezieller Overhead-Folien unterstützen, die man als Kopiervorlage in der Abb. 2 findet.

Abbildung 3



Werden die Folien so übereinander gelegt, dass sich die Folie A oben, die Folie E unten befindet und alle Folien jeweils um die markierte Pfeillänge versetzt sind, dann erkennt man die Bahn der Raumsonde um den Planeten (schwarzer Kreis), so wie man sie von der Sonne aus wahrnimmt. Diese Bahn hat einen „Knick“ in Richtung der Bewegung des Planeten. Legt man jedoch alle Folien so übereinander, dass sich die Planetenscheibchen genau übereinander befinden, dann ergibt sich die Bahn der Raumsonde relativ zum Planeten. Schließlich kann man die Übertragung von kinetischer Energie zwischen Körpern durch Einwirkung eines Feldes auch anhand eines Demonstrationsexperimentes veranschaulichen (Abb. 3).

Abbildung 3



Man baut zwei Magnetpendel, indem man Keramikmagnete auf Holzlatten klebt, die als Pendelkörper fungieren. Die beiden Pendel werden möglichst nahe beieinander aufgestellt. Sie sollen aufeinander zu schwingen – zu einer gegenseitigen Berührung darf es jedoch nicht kommen. Dann lenkt man eines der Pendel aus, lässt es los und beobachtet, dass auch das ruhende Pendel in Bewegung versetzt wird. In diesem Fall hat ein Magnetfeld die Energieübertragung bewirkt. Übrigens führt eine Aufhängung der Magnete an Fäden nicht zu einem gut beobachtbaren Effekt. Die Magnete tendieren dann dazu, unkontrollierte Dreh- und Zitterbewegungen auszuführen.

Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen

Abbildung 1: Eigene Zeichnung

Abbildung 2: Eigene Zeichnung

Abbildung 3: Eigenes Bild