

Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformation für Lehrer

Thema: Ionenantrieb – Moderne Raumfahrt in Schüleraufgaben

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

Der Ionenantrieb, eine schon seit langer Zeit diskutierte und in zahlreichen Laborversuchen erprobte Schubquelle für Raumflugkörper, hat in den zurückliegenden Monaten und Jahren bemerkenswerte Erfolge erzielt. Der nachfolgend gegebene kurze Überblick verdeutlicht diese Tatsache eindrucksvoll.

ARTEMIS – Missionsrettung durch Ionenantrieb

Der am 12. Juli 2001gestartete ESA-Nachrichtensatellit ARTEMIS wurde infolge eines Funktionsfehlers der Ariane-5 Oberstufe in einer viel zu niedrigen Umlaufbahn ausgesetzt. Die eigentlich nur für Bahnkorrekturen im Orbit gedachten Ionentriebwerke wurden in Betrieb genommen und der Satellit innerhalb von 18 Monaten auf die geostationäre Umlaufbahn gehoben. Dazu mussten die Triebwerke mehrere Tausend Stunden im Dauerbetrieb arbeiten.

DEEP SPACE 1 - mit Ionen zu Kometen

Die am 24. Oktober 1998 gestartete Raumsonde DEEP SPACE 1, ausgestattet mit einem neuartigen, stufenlos drosselbaren Ionenantrieb, passierte am 29. Juli 1999 den Asteroiden Braille, am 22. September 2001 kam es zu einem engen Rendezvous mit dem Kometen Borrelly.

Smart-1 – Auf dem Weg zum Mond

Seit dem 27. September 2003 ist die Raumsonde smart-1 auf dem Weg zum Mond. Smart-1 ist die erste Sonde überhaupt, die aus dem Erdorbit heraus lediglich mithilfe eines Ionenantriebes zum Mond gelangen soll.

Neben den Sachinformationen für die Hand des Lehrers werden nachfolgend hauptsächlich Aufgaben zum Ionenantrieb inklusive der Lösungen besprochen – und zwar aus guten Gründen:

Während nämlich die spezielle Technik der Triebwerke recht kompliziert ist, stellt ihr Wirkprinzip einen sehr interessanten Spezialfall für die Verknüpfung der Themengebiete Mechanik (Weg-Zeit-Gesetz, Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz, Impulserhaltung, Raketengrundgleichung) und Elektrostatik (elektrisches Feld, Teilchen in elektrischen Feldern, Ladungstrennung, elektrische Energie) dar.

Trotz der sehr kleinen Schubkraft von nur rund 50 mN und der damit verbundenen äußerst geringen Beschleunigung können mit Ionenantrieben Geschwindigkeiten im Bereich von einigen km/s erzielt werden! Damit dürfte der Ionenantrieb wohl eines der extremsten und trotzdem anwendungsnahen Beispiele für das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz der geradlinig gleichförmig beschleunigten Bewegung liefern.

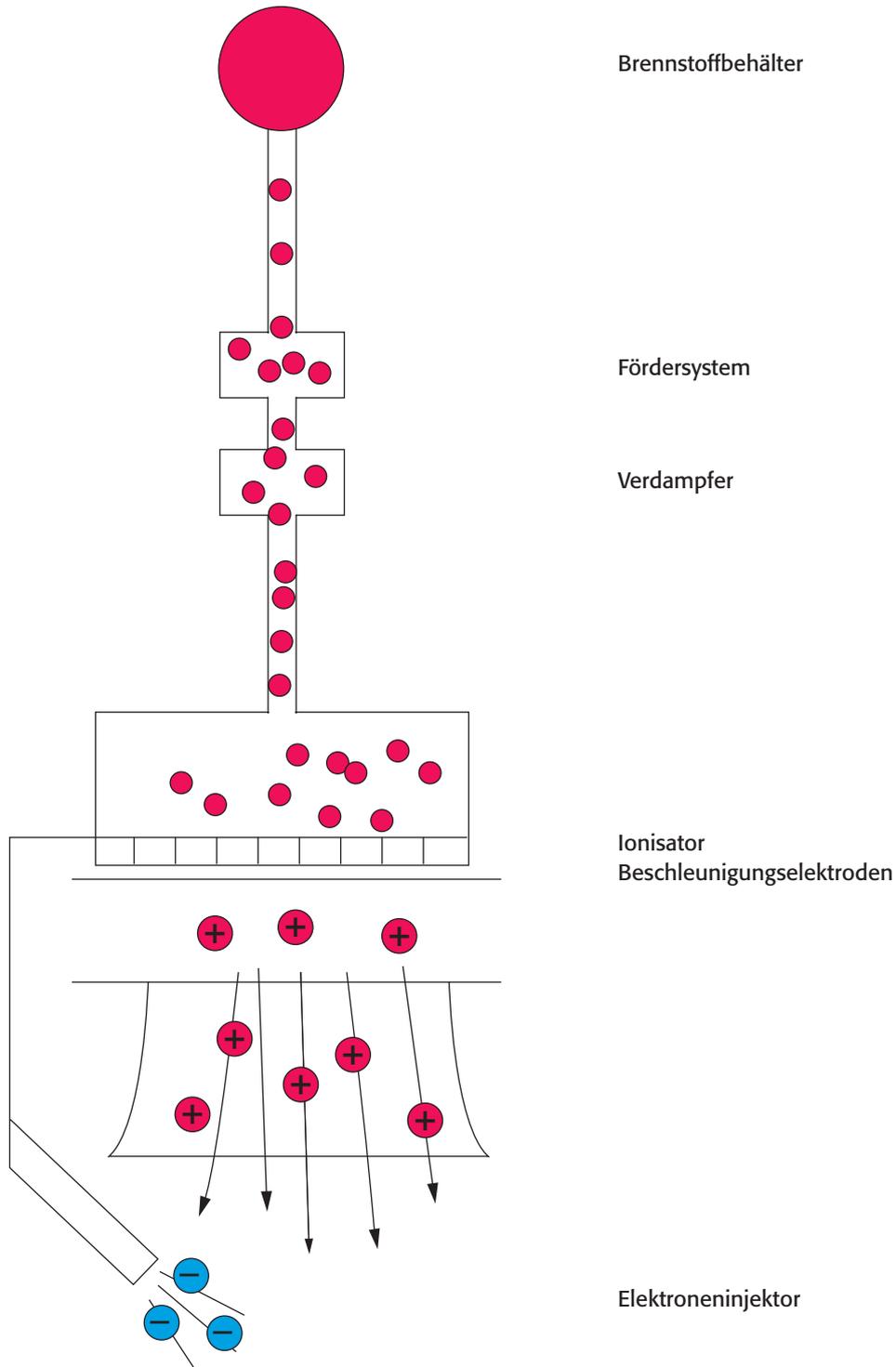
Verschiedentlich hat man aus dem didaktischen Potenzial, das die Physik des Ionenantriebs bietet, schon geschöpft. So findet sich beispielsweise in den Physik-Abituraufgaben Bayerns vom Jahr 2002 auch ein komplexes Thema „Ionenantrieb“.

Der Ionenantrieb schematisch

Die grundlegenden Bauelemente eines Ionentriebwerkes sind in der Abb.1 als Kopiervorlage dargestellt: Aus einem Vorratsbehälter wird der Brennstoff über ein Fördersystem der zentralen Triebwerkseinheit zugeleitet. Da man neben Gasen auch flüssige Stoffe einsetzen kann (z. B. Quecksilber), muss eventuell noch ein Verdampfer vorgeschaltet werden. Sodann wird das Gas erhitzt und durch Elektronenbeschuss ionisiert. Die Ionen werden elektrostatisch beschleunigt und durch eine oder mehrere Düsen mit hoher Geschwindigkeit freigesetzt.

Um die elektrostatische Aufladung des Triebwerkes zu verhindern, müssen die angefallenen Elektronen in den Ionenstrahl eingeschossen werden. Dies geschieht durch den Neutralisator, der nichts anderes darstellt als eine speziell gebaute Katode.

Ionentriebwerk (schematisch)



Inhaltliches Schließen, qualitatives Denken und Interpretieren

Aufgabe 1

Die Beschleunigung der Ladungsträger im Ionenantrieb erfolgt zwischen zwei relativ eng gegenüberstehenden Gitterelektroden. Als scheinbar naheliegende Idee zur Erhöhung der Endgeschwindigkeit der Teilchen könnte man versuchen, den Abstand zwischen den Elektroden zu erhöhen. Schließlich würde man damit ja auch die Beschleunigungsstrecke vergrößern. Erläutere, weshalb diese Idee zur Geschwindigkeitsvergrößerung der Ionen nicht richtig ist!

Lösung:

Für die zwischen den Elektroden verrichtete elektrische Beschleunigungsarbeit gilt der Zusammenhang $W = q \cdot U$ (q : Ladung des Teilchens, U : Spannung zwischen den Elektroden). Diese Arbeit muss gleich der kinetischen Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ sein, welche jedes Teilchen zwischen den Elektroden erlangt.

$$\text{Aus } q \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$\text{folgt } v = \sqrt{\frac{2q \cdot U}{m}}$$

Der Abstand der Elektroden kommt in der Gleichung für die Endgeschwindigkeit der Teilchen gar nicht vor, spielt also auch keine Rolle für die Geschwindigkeit.

Aufgabe 2

Alle Ionenantriebe müssen eine gesonderte Katode besitzen, die Elektronen in das Weltall emittiert. Erkläre, weshalb man nicht auf diese Katode verzichten kann.

Lösung:

Der Schub des Ionenantriebs wird durch die massereichen positiv geladenen Teilchen erzeugt, die man im Triebwerk durch Ionisation aus neutralen Atomen gewinnt. Diese verlassen den Antrieb und gelangen in das All. Würde man die bei der Ionisation ebenfalls frei gesetzten Elektronen im Triebwerk belassen, dann müsste sich die Raumsonde elektrisch aufladen. Ausfälle in der Bordelektronik wären beispielsweise die Folge.

Aufgabe 3

Die Ionenantriebe der Raumsonden DEEP SPACE 1 und SMART-1 arbeiten mit Xenon. Erläutere, weshalb man dieses relativ seltene Edelgas verwendet und nicht wesentlich einfacher zu beschaffende Gase wie etwa Wasserstoff?

Lösung:

Xenon-Ionen haben eine wesentlich größere Masse als Wasserstoff-Ionen. Aufgrund der Impulserhaltung können sie deshalb eine höhere Schubkraft pro emittiertem Ion erzeugen. (Anmerkung: Die Masse der Ionen ist nicht das einzige Kriterium für die Eignung als Treibmittel des Ionenantriebs. Leichte Ionisierbarkeit, einfache Speicherfähigkeit und chemische Aggressivität des Stoffes sind weitere Auswahlmerkmale!)

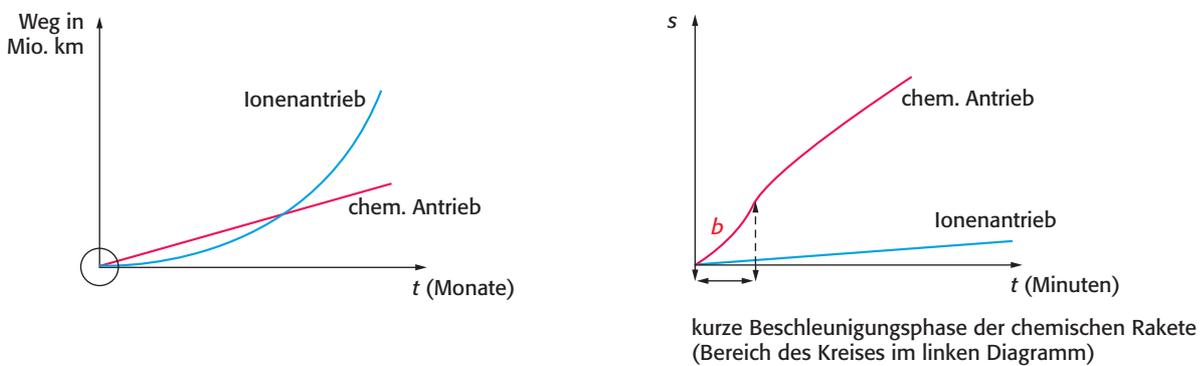
Aufgabe 4

Wie zahlreiche Erprobungen und Tests bewiesen haben, können Ionenantriebe problemlos einige 1000 Stunden im Dauerbetrieb arbeiten. Sie liefern dabei jedoch nur eine sehr geringe Schubkraft von durchschnittlich 50 mN. Eine chemische Rakete hingegen feuert nur wenige Minuten, dafür aber mit einer Schubkraft von 130 kN (3. Stufe einer Titan IIIE/Centaur). Trotz der geringen Schubkraft halten Wissenschaftler aber gerade den Ionenantrieb für das geeignete Mittel, um ferne Ziele im Planetensystem anzusteuern.

Erkläre diesen Sachverhalt! Zeichne dazu den prinzipiellen Bewegungsverlauf für beide Antriebsarten in ein Weg-Zeit-Diagramm ein. Gehe dazu vereinfachend davon aus, dass die Beschleunigung während der aktiven Flugphasen konstant ist.

Lösung:

Das nachfolgend abgebildete Diagramm (Abb.2) zeigt lediglich den prinzipiellen Verlauf der geschilderten Bewegungsvorgänge. Die Raumsonde mit chemischem Antrieb (rote Kurve) erreicht nach kurzer Zeit eine große Geschwindigkeit, diese bleibt aber während des weiteren Fluges konstant. Für einen Flug, der eine lange Zeit in Anspruch nimmt, darf die kurze Beschleunigungsphase vernachlässigt werden, sodass man entsprechend des Weg-Zeit-Gesetzes der geradlinig gleichförmigen Bewegung vom Zusammenhang $s \sim t$ ausgehen kann. Die durch Ionen angetriebene Sonde wird zwar nur gering beschleunigt, dafür aber über einen sehr langen Zeitraum. Wegen des Weg-Zeit-Gesetzes der geradlinig gleichförmig beschleunigten Bewegung gilt $s \sim t^2$. Steht genügend Zeit zur Verfügung, dann kann die Sonde mit Ionenantrieb die Raketensonde ein- und überholen. Dies ist bei Flügen in die äußeren Regionen des Planetensystems der Fall.



Aufgabe 5

Ionenantriebe können nicht beim Start von der Erdoberfläche eingesetzt werden.
Nenne zwei Gründe für diese Behauptung und erläutere deren physikalische Ursachen!

Lösung:

Die Ionen müssen im Vakuum beschleunigt werden und das Triebwerk ungehindert verlassen können. Ein Ionentriebwerk funktioniert deshalb nur außerhalb der Erdatmosphäre.
Damit eine Ionenrakete von Erdboden abheben könnte, müsste ihre Schubkraft mindestens so groß wie ihre Gewichtskraft sein. Die äußerst geringen Schubkräfte eines Ionenantriebs erfüllen diese Bedingung aber nicht.

Textaufgaben zum Rechnen

Schwierigkeitsgrad hoch (Sekundarstufe II, Leistungskurs)

Die Raumsonde DEEP SPACE 1 besitzt eine Masse von 490 kg, inklusive eines Vorrates an Arbeitsgas von 81,5 kg. Die Schubeinheit arbeitet mit einem Ionenantrieb, welches eine Beschleunigungsspannung von 1280 V erzeugt. Als Betriebsgas wird einfach ionisiertes Xenon verwendet. Die Schubkraft der Sonde ist stufenlos von 20 mN auf höchstens 92 mN regulierbar.

- a) Welche Geschwindigkeit hat ein Xenon-Ion, das im Ionenantrieb beschleunigt wurde?
- b) Wie viele Teilchen müssen das Triebwerk je Sekunde verlassen, um die maximale Schubkraft zu erzeugen?
- c) Wie lange könnte das Triebwerk mit Maximalschub arbeiten?
- d) Welche Zeit vergeht, bis die voll betankte Sonde ihre Geschwindigkeit bei maximaler Schubkraft um 50 km/h erhöht?

Lösungen:

- a) Aus einer Formelsammlung muss die Masse eines Xenon-Ions entnommen werden (oder über die molare Masse ausgerechnet werden): $m = 2,18 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$.

$$\text{Aus } e \cdot U = \frac{m_{\text{Xe}}}{2} \cdot v^2$$

$$\text{folgt } v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_{\text{Xe}}}} \text{ und damit } \underline{v_{\text{Xe}} = 43,4 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

- b) Die Kraft ist gleich der Impulsänderung je Zeiteinheit.

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}; F \cdot \Delta t = m_{\text{Xe}} \cdot v_{\text{Xe}} \cdot N$$

$$N = \frac{F \cdot \Delta t}{m_{\text{Xe}} \cdot v_{\text{Xe}}} = \underline{9,72 \cdot 10^{18} \text{ (Teilchen)}}$$

- c) $\text{Zeit} = \frac{\text{Massenvorrat}}{\text{Massenverlust je Sekunde}}$

$$\text{Massenverlust je Sekunde} = m_{\text{Xe}} \cdot N$$

$$\underline{t = 10680 \text{ h}}$$

- d) Für die Beschleunigung gilt einerseits $a = \frac{F}{m}$, andererseits $a = \frac{v}{t}$. Gleichsetzung und Umstellen nach t ergibt:

$$t = \frac{m \cdot v}{F}$$

$$\underline{t = 20,5 \text{ h}}$$

Schwierigkeitsgrad gering (Sekundarstufe I)

Die Raumsonde DEEP SPACE 1 besitzt eine Masse von 490 kg und wird durch einen Ionenantrieb beschleunigt. Die minimale Schubkraft der Sonde beträgt 20 mN, die maximale Schubkraft 92 mN. Für die Lösung darf man die Masse der Raumsonde als konstant ansehen, ihr Massenverlust werde ignoriert.

- a) Welche Beschleunigung wirkt auf die Raumsonde bei maximaler und bei minimaler Schubkraft?
 b) Welche Zeit ist jeweils notwendig, um die Geschwindigkeit der Raumsonde bei maximaler und bei minimaler Schubkraft um 50 km/h zu ändern?

Lösungen:

a) $F = m \cdot a$ $a = \frac{F}{m}$ $\underline{a_{\text{min}} = 4,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$ $\underline{a_{\text{max}} = 1,9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$

b) $t = \frac{m \cdot v}{F}$ $\underline{t_{\text{min}} = 94,5 \text{ h}}$ $\underline{t_{\text{max}} = 20,5 \text{ h}}$

Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen

Abbildung 1: Eigene Zeichnung

Abbildung 2: Eigene Zeichnung