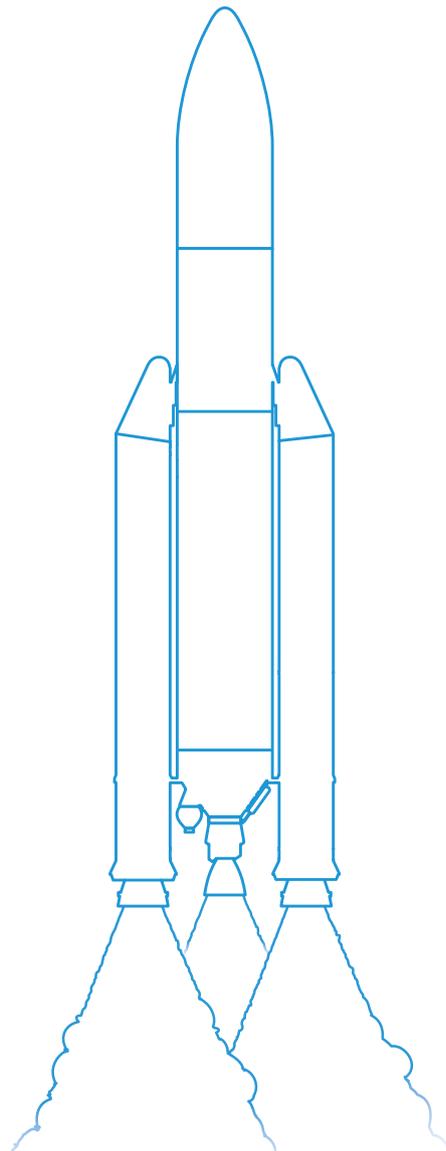


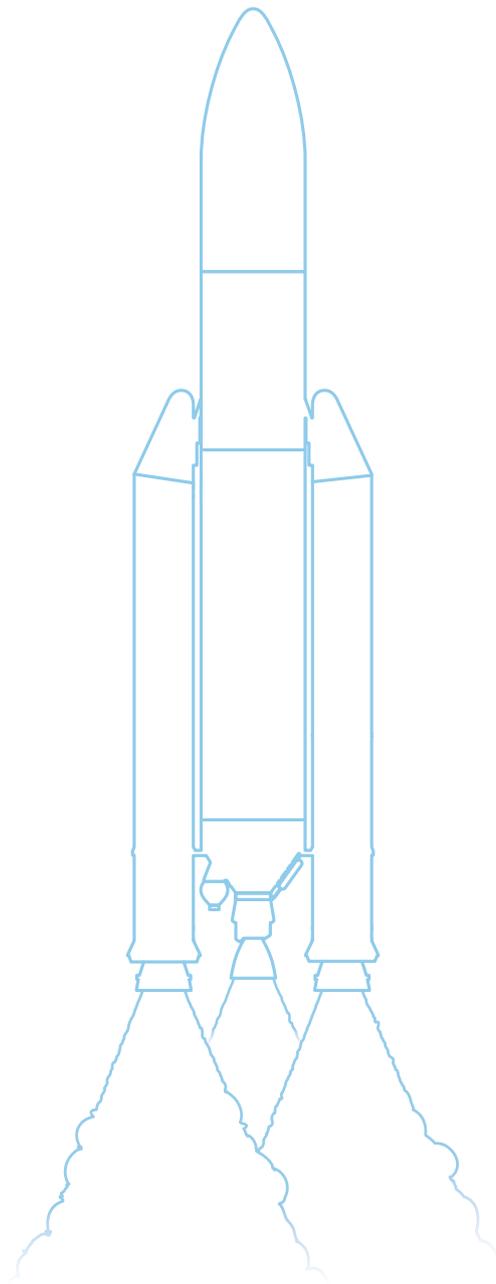
physics | P01a

# teach with space

## → DIE FLASCHE MIT DEM ZISCH

Anwendung Newton'scher Gesetze auf Raketen





Die wichtigsten Fakten

Seite 3

Aufgabe 1: Den Brennstoff zum Brennen bringen!

Seite 4

Aufgabe 2: Anwendung des Zweiten  
Newton'schen Gesetzes auf Raketen

Seite 7

Links

Seite 9

# → DIE FLASCHE MIT DEM ZISCH

## Anwendung Newton'scher Gesetze auf Raketen

### Die wichtigsten Fakten

**Altersgruppe:** 14 - 17 Jahre

**Art:** Praktische Demonstration oder Aufgabe für Schüler

**Schwierigkeitsgrad:** leicht

**Erforderliche Vorbereitungszeit für den Lehrer:** 20 Minuten zum Durchlesen der Aufgabe

**Zeitbedarf für den Unterricht:** 45 Minuten

**Ort:** Labor

**Einschließlich der Verwendung von:** leicht entzündlichen Brennstoffen (Ethanol oder anderer Alkohol)

### Kurzfassung

Bei dieser Aufgabe werden Alkohol und Luft in einer großen Plastik-Wasserflasche gemischt, bevor er entzündet wird, um die physikalischen Prinzipien chemischer Raketentriebwerke zu simulieren. Die Aufgabe kann entweder als eine Demonstration durch den Lehrer oder als eine Aufgabe für Schüler durchgeführt werden, für die es getrennte Protokolle gibt. Die Schüler beobachten eine rasche Reaktion, die von einem dramatischen „Zisch“-Geräusch und Flammen begleitet wird. Sie erörtern die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der Reaktion im Labor und derjenigen bei Raketentriebwerken. Die Schüler beenden die Aufgabe durch die mathematische Anwendung der Newton'schen Gesetze auf das Erlebte.

### Die Schüler lernen

- Wie chemische Raketentriebwerke funktionieren.
- Wie man die drei Newton'schen Gesetze auf Raketentriebwerke anwendet.
- Die Beziehung zwischen Schubkraft und Beschleunigung.
- Kräftebezogene Berechnungen.

### Die Schüler verbessern

- Ihre Fähigkeit, durch experimentelle Beobachtungen erworbenes Wissen zur Lösung theoretischer Probleme anzuwenden.
- Ihre Fähigkeit, sicher in einem Labor zu arbeiten.

### Sie benötigen auch



### Verbindungen zum Lehrplan

- Physik – Raketenstarts, Aktions-/Reaktionskräfte, Newton'sche Gesetze.
- Chemie – Verbrennungsreaktionen.

↑ Die Flasche mit dem Zisch – Video zur Demonstration in der Klasse. Siehe unter Links S.9.

## → AUFGABE 1: DEN BRENNSTOFF ZUM BRENNEN BRINGEN!

Bei dieser Aufgabe wird ein Gemisch aus Luft und Alkohol in einer Plastikflasche gezündet und damit simuliert, was während der Zündung von Treibstoffen bei einem Raketenstart passiert. Die Schüler erleben eine rasch ablaufende Reaktion, die von einem dramatischen „Zisch“-Geräusch und Flammen begleitet wird, wodurch die bei Verbrennungsreaktionen freigesetzte hohe Menge an Energie demonstriert wird. Chemische Raketentriebwerke nutzen hohe Drücke und Verbrennungstemperaturen, um die Abgase zu beschleunigen und die Rakete emporzutreiben.

### Versuchsvorbereitung

Das Video über die Demonstration im Klassenzimmer zu der Flasche mit dem Zisch, das auf der Website von ESA Education (ESA-Bildungsbüro) verfügbar ist, zeigt die vollständige Versuchsanordnung dieser Aufgabe und beschreibt deren Durchführung. Das Protokoll in diesem Leitfaden für Lehrer enthält Informationen zu dem Versuchsmaterial und Anweisungen für Sie zur Durchführung der Aufgabe als Demonstration durch den Lehrer (Abbildung 1). Damit die Schüler diese Aufgabe als Laboraufgabe durchführen können, sollten sie kleine Plastikflaschen wie in dem Aufgabenblatt für Schüler angegeben benutzen.

Diese Demonstration wird am besten in einem dunklen Raum durchgeführt.

### Versuchsmaterial

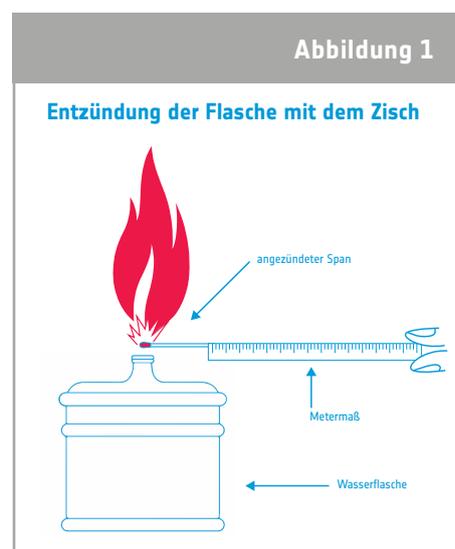
- 1 oder mehrere große Plastik-Wasserflasche(n), wie sie in Trinkwasserkühlern verwendet werden (ungefähr 20 l)
- 15 ml denaturierten Industrialkohol (Brennspiritus) (billiger) oder reines Ethanol (teurer)
- Streichhölzer und Holzspan
- Metermaß (der Holzspan sollte am Metermaß befestigt werden, um einen sicheren Abstand beim Anzünden der großen Flasche einzuhalten)
- Schutzbrillen
- 1 Paar Schutzhandschuhe

### Sicherheit und Gesundheitsschutz

- Ethanol (und gegebenenfalls anderer Alkohol) ist leicht entzündlich. Benutzen Sie ihn nicht in der Nähe von offenem Feuer.
- Achten Sie darauf, dass entzündliche Chemikalien einschließlich aller Alkohole in Behältern mit Verschlussstopfen aufbewahrt werden, wenn sie nicht gebraucht werden.
- Die Schutzbrille muss jederzeit getragen werden.
- Prüfen Sie, dass die Flaschen nicht beschädigt sind. Bei Vorhandensein von Rissen benutzen Sie eine andere Flasche.
- Tragen Sie stets Handschuhe beim Anzünden der Flasche. Beugen Sie sich nicht über den oberen Teil der Flasche.
- Weisen Sie alle Schüler und Beobachter auf den möglichen Lärmpegel hin und bitten Sie diejenigen mit einem empfindlichen Gehör, ihre Ohren abzudecken.
- Führen Sie die Demonstration nicht umgekehrt durch, um die Flasche mit dem Zisch starten zu lassen.
- Halten Sie die allgemeinen Maßnahmen zur Sicherheitskontrolle in dem Labor ein.

## Übung

1. Setzen Sie die Schutzbrille auf.
2. Schrauben Sie den Verschluss von der Wasserflasche ab und achten Sie darauf, dass die Flasche völlig trocken ist.
3. Gießen Sie etwa 15 ml Brennstoff in die Flasche. Geeignete Brennstoffe sind Spiritus, Methanol, Ethanol, Propan-1-ol und Propan-2-ol.
4. Befestigen Sie den Verschluss wieder und schütteln Sie die Flasche mindestens eine Minute lang. Durch das Schütteln verdunstet der Alkohol.
5. Bleibt am Boden der Flasche Brennstoff zurück, gießen Sie ihn aus und befestigen Sie den Verschluss wieder. Achten Sie darauf, dass die Schüler diesen Vorgang sehen.
6. Befestigen Sie einen Holzspan am Ende des Metermaßes und halten Sie ihn leicht nach unten gerichtet. Entzünden Sie den Holzspan, schrauben Sie den Flaschenverschluss ab, und halten Sie das Ende des Meterstabes so, dass sich der brennende Holzspan über dem Flaschenhals befindet (Abbildung 1).
7. Die Reaktion erfolgt schnell und laut! Sobald die Reaktion abgeschlossen ist, kehren Sie die Flasche um, um den Schülern die herausfließenden Tropfen farbloser Flüssigkeit zu zeigen. Die Flasche kann unter den Schülern herumgegeben werden, damit sie spüren, wie warm sie ist – insbesondere am oberen Teil.
8. Wenn mehr Flaschen zur Verfügung stehen, kann es interessant sein, den Versuch mit anderen Brennstoffen zu wiederholen. Alternativ lässt sich dieselbe Flasche wiederverwenden, nachdem die Luft mit einer umgekehrt laufenden Vakuumpumpe abgesaugt wurde, oder nachdem mit einer Fahrradpumpe frische Luft in die Flasche gepumpt wurde.



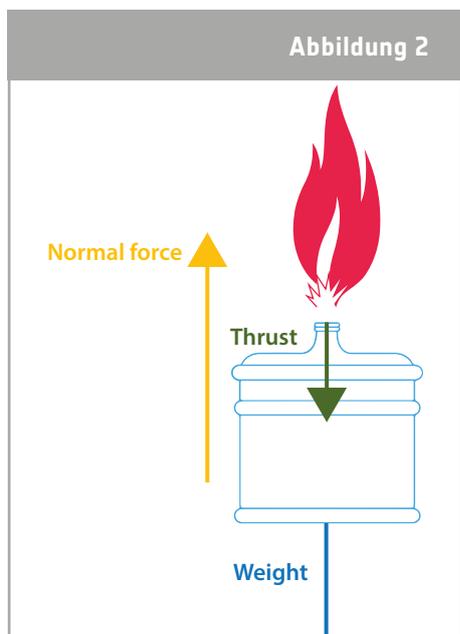
↑ Versuchsanordnung für die Flasche mit dem Zisch (für Demonstration durch den Lehrer).

## Antworten auf die Diskussionsfragen

1. Erläutern Sie, weshalb die Flasche nach dem Hinzufügen des Alkohols geschüttelt werden sollte.  
Um den Alkohol verdunsten zu lassen.
2. Die Reaktion wurde von einem Zisch-Geräusch begleitet. Erläutern Sie, woher dieses Geräusch stammte.  
Das Zisch-Geräusch entsteht dadurch, dass die Abgase rasch durch die enge Flaschenöffnung hinausgedrängt wurden. Dies ist eine Folge der Ausdehnung von heißem Gas in der Flasche.
3. Ermitteln Sie unter Berücksichtigung des Dritten Newton'schen Gesetzes die Kräfte, die während der Verbrennungsreaktion auf die Flasche einwirken.  
Die drei Kräfte sind:
  - Das Gewicht der Flasche;
  - Die Normalkraft (vom Boden aus);
  - Die durch die Abgase erzeugte Schubkraft (Kohlendioxid und Wasserdampf). Diese Gase werden nach oben aus der Flasche herausgetrieben, somit besagt das dritte Newton'sche Gesetz, dass die gleich große und entgegen gerichtete Reaktionskraft auf die Flasche nach unten zum Boden gerichtet ist.

4. Zeichnen Sie ein Kräfte diagramm mit den Kräften, die während der Verbrennungsreaktion auf die Flasche einwirken.

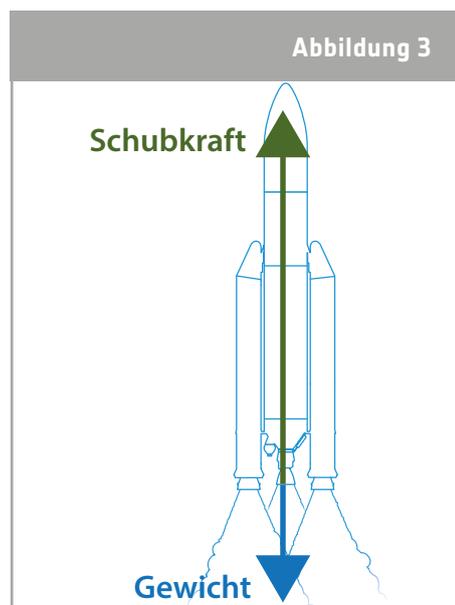
Beachten Sie, dass der Pfeil für die Normalkraft ungefähr dem zusammengenommenen Betrag der Pfeile für Gewicht und Schubkraft entsprechen sollte (Abbildung 2).



↑ Während der Verbrennungsreaktion auf die Flasche mit dem Zisch einwirkende Kräfte

5. Zeichnen Sie ein Kräfte diagramm mit den Kräften, die während des Starts auf eine Rakete einwirken, unmittelbar nachdem sie den Boden verlassen hat. Lassen Sie dabei den Luftwiderstand unberücksichtigt.

Beachten Sie, dass der Pfeil für die Schubkraft größer als der Pfeil für das Gewicht sein sollte (Abbildung 3).



↑ Während des Starts auf eine Rakete einwirkende Kräfte

6. Beschreiben Sie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Diagramme, die Sie gezeichnet haben.

Auf beiden Diagrammen haben wir die Kräfte Gewicht und Schubkraft. Allerdings ist bei der Flasche die durch die Abgase erzeugte Schubkraft nach unten auf den Boden gerichtet, während bei der Rakete die Schubkraft nach oben gerichtet ist.

7. Erläutern Sie die Effekte der Kräfte bei den beiden Beispielen (Flasche mit dem Zisch und Rakete).

Die Flasche mit dem Zisch ist tatsächlich eine Umkehrung eines Raketenstarts. In diesem Fall erzeugen die Abgase aufgrund des Dritten Newton'schen Gesetzes eine nach unten gerichtete Kraft (Schubkraft). Da die Flasche auf dem Boden oder auf einem Tisch steht, wirkt diese Schubkraft tatsächlich auf die gesamte Masse der Erde ein, so dass sie keine weitere Auswirkung hat.

Bei einer Rakete ist die Schubkraft nach oben gerichtet und wirkt nur auf die Masse der Rakete ein, die sie deshalb relativ schnell beschleunigt (Erstes und Zweites Newton'sches Gesetz). Da die Rakete durch die untere Atmosphäre beschleunigt, gibt es einen erheblichen aerodynamischen Widerstand, insbesondere in den ersten zwei oder drei Minuten nach dem Start, wenn die Geschwindigkeiten hoch sind und die Atmosphäre noch relativ dicht ist. Oberhalb von Höhen von 120 km wird der atmosphärische Widerstand minimal. Auch wenn die Schwerkraft mit der Entfernung abnimmt, verschwindet sie nie völlig.

# → AUFGABE 2: ANWENDUNG DES ZWEITEN NEWTON'SCHEN GESETZES AUF RAKETEN

Zum Starten einer Rakete in den Weltraum bedarf es einer ausreichenden Schubkraft, um der Schwerkraft entgegenzuwirken. Bei dieser Aufgabe wenden die Schüler das Zweite Newton'sche Gesetz auf Raketen an, um die Treibstoffmenge zu berechnen, die eine Rakete benötigt, um die erforderliche Schubkraft an den Start zu bringen.

## Antworten auf die Übung

1. Eine Ariane 5-ECA-Rakete befindet sich auf der Startplattform in Kourou, Französisch-Guyana. Der untere Abschnitt der Ariane 5 ECA besteht aus der Haupt-Tieftemperaturkern-Stufe (EPC) und den beiden Feststoff-Hilfsraketen (EAP) (siehe Abbildung 4). Die von deren Triebwerken erzeugte Schubkraft beträgt 960 kN von der Haupt-Tieftemperaturstufe EPC und 6450 kN von jeder der beiden daran befestigten Feststoff-Hilfsraketen. Die Gesamtmasse der Rakete auf der Startplattform beträgt 777 t.

Nehmen Sie für die Beschleunigung aufgrund der Schwerkraft ( $g$ )  $9,8 \text{ N/kg}$  bzw.  $9,8 \text{ m/s}^2$  an.

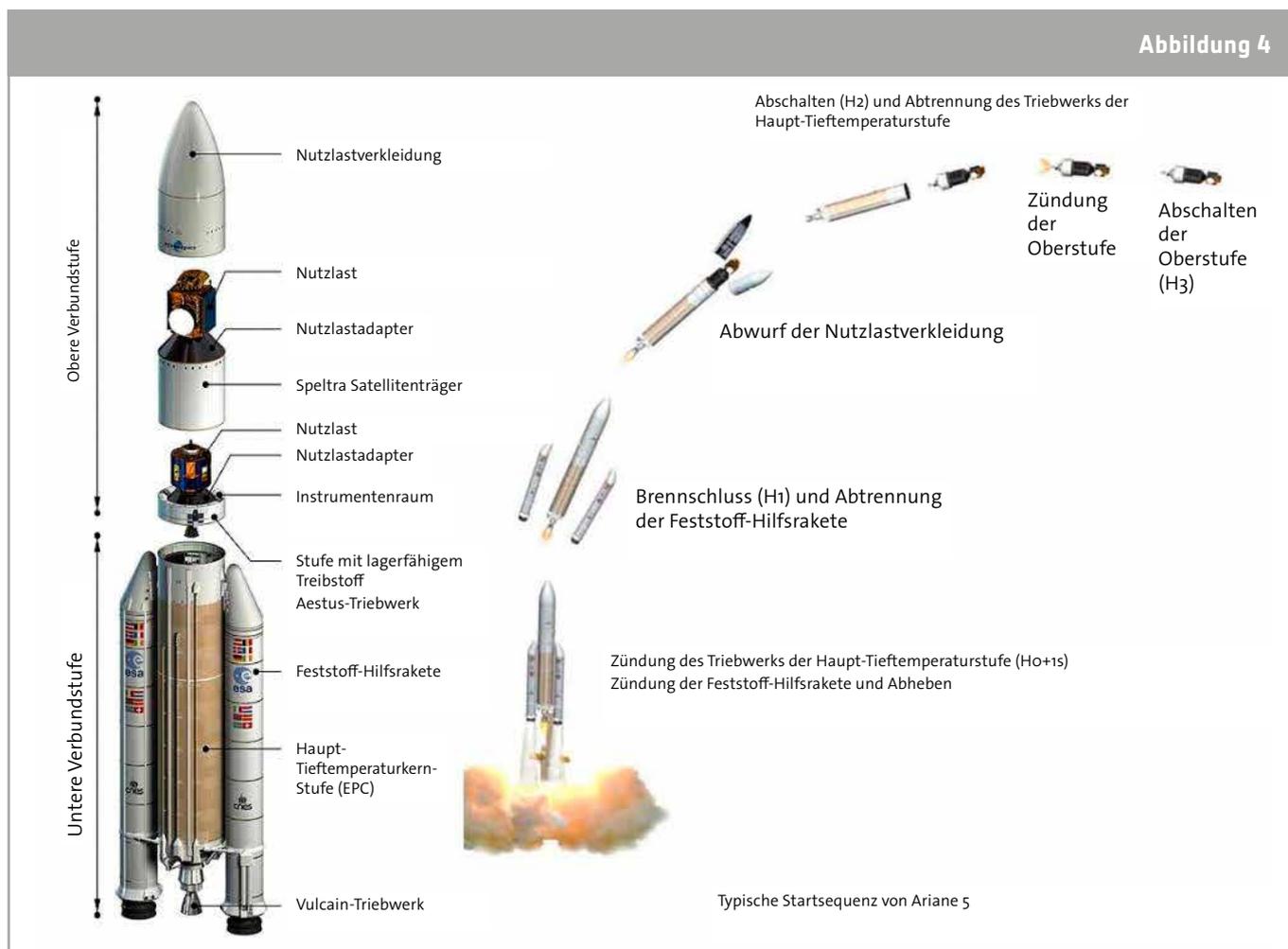
- a. Berechnen Sie die Gesamtkraft auf die Rakete. Es kann hilfreich sein, ein Kräfte diagramm zu zeichnen. Lassen Sie dabei den Luftwiderstand unberücksichtigt.

Gesamtkraft auf die Rakete = 6,25 MN

- b. Berechnen Sie die Beschleunigung der Rakete beim Start.

Beschleunigung = 8,04  $\text{m/s}^2$

Abbildung 4



↑ Typische Startsequenz einer Ariane-5-Rakete.

2. Nehmen Sie an, dass die Rakete in den ersten zwanzig Sekunden senkrecht aufsteigt. Jede EAP-Hilfsrakete verbraucht 1,8 t Treibstoff je Sekunde, und die EPC-Hauptstufe verbraucht 0,3 t Treibstoff je Sekunde.
- a. Berechnen Sie die Masse der Rakete nach 20 Sekunden und berechnen Sie somit deren Beschleunigung zu diesem Zeitpunkt.

**Masse der Rakete nach 20 Sekunden:**

$$777.000 \text{ kg} - (2 \times 1,8 \text{ t} \times 1000 \text{ kg} \times 20 \text{ s}) - (0,3 \text{ t} \times 1000 \text{ kg} \times 20 \text{ s}) = 699.000 \text{ kg}$$

**Momentanbeschleunigung:**

$$\text{Schubkraft} = 13.860.000 \text{ kg m/s}^2$$

$$\text{Gewicht} = 699.000 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 6.850.200 \text{ kg m/s}^2$$

$$\text{Gesamtkraft} = 13.860.000 \text{ kg m/s}^2 - 6.850.200 \text{ kg m/s}^2 = 7.009.800 \text{ kg m/s}^2$$

$$\text{Beschleunigung} = \text{Kraft/Masse} = 10,03 \text{ m/s}^2$$

- b. In Wirklichkeit wäre die Beschleunigung der Rakete zu diesem Zeitpunkt anders als die Beschleunigung, die Sie berechnet haben. Ist der tatsächliche Wert Ihrer Meinung nach höher oder niedriger? Erläutern Sie Ihre Antwort. Ein neues Kräfte-diagramm kann Ihnen dabei helfen.

Da die Rakete durch die Atmosphäre beschleunigt, nimmt ihre Geschwindigkeit, und infolgedessen auch der atmosphärische Widerstand zu. Dies erfolgt deshalb, weil der die Kraft des atmosphärischen Widerstandes proportional zur Luftdichte und auch zum Quadrat der Geschwindigkeit ist. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Geschwindigkeit auf dem Weg durch die Atmosphäre der atmosphärische Widerstand eine immer größere Rolle spielt. Infolgedessen bewirkt die Widerstandskraft nach 20 Sekunden Flug, dass die Gesamtkraft (Schubkraft – Widerstand - Gewicht) geringer ausfällt als die Gesamtkraft ohne den Widerstand (Schubkraft - Gewicht) betragen würde und deshalb die Beschleunigung geringer als zuvor berechnet ausfällt. Bei ihrem Flug durch die Atmosphäre verringert sich die Luftdichte zunehmend, und gleichzeitig nimmt die Geschwindigkeit (und die Beschleunigung) der Rakete zu, da sich das Gewicht der Rakete wegen des Treibstoffverbrauchs in dem (den) Triebwerk(en) verringert.

3. Im Ariane-5-Benutzerhandbuch sind zwei Zahlen für die Schubkraft der EPC-Hauptstufe (die neun Minuten dauert) angegeben:
- 960 kN auf Meereshöhe
  - 1390 kN im Vakuum

Erläutern Sie, weshalb diese Zahlen unterschiedlich ausfallen.

Die von einem Raketentriebwerk erzeugte Schubkraft hängt von der Geschwindigkeit der ausgestoßenen Gase aus der Brennkammer ab. Der Druckunterschied zwischen den Gasen in der Brennkammer und der externen Umgebungsatmosphäre treibt die Abgase aus der Brennkammer und erzeugt Schubkraft. Dieser Unterschied ist in einem Vakuum am höchsten. Deshalb ist die Schubkraft im Vakuum stets größer als auf Meereshöhe.

## → LINKS

### ESA-Ressourcen

Die Flasche mit dem Zisch – Video zur Demonstration in der Klasse (VP01):

[http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Whoosh\\_bottle - classroom demonstration video VP01](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Whoosh_bottle_-_classroom_demonstration_video_VP01)

ESA-Ressourcen für die Schulklasse:

[www.esa.int/Education/Classroom resources](http://www.esa.int/Education/Classroom_resources)

Fest- und Flüssigtreibstoffraketen:

[www.esa.int/Education/Solid and liquid fuel rockets](http://www.esa.int/Education/Solid_and_liquid_fuel_rockets)

Einführung zu Raketen bei ESA Kids:

[www.esa.int/esaKIDSen/SEMYWIXJD1E Technology o.html](http://www.esa.int/esaKIDSen/SEMYWIXJD1E_Technology_o.html)

Einführung zu der Ariane-5-Rakete:

[www.esa.int/Our Activities/Launchers/Launch vehicles/Ariane 5](http://www.esa.int/Our_Activities/Launchers/Launch_vehicles/Ariane_5)

### Ariane-5-Ressourcen

Informationen zur Ariane-5-Rakete:

[www.arianespace.com/vehicle/ariane-5/](http://www.arianespace.com/vehicle/ariane-5/)

Wikipedia-Eintrag zu Ariane 5:

[en.wikipedia.org/wiki/Ariane 5](http://en.wikipedia.org/wiki/Ariane_5)

teach with space – Die Flasche mit dem Zisch | P01a  
[www.esa.int/education](http://www.esa.int/education)

Das ESA Education Office (ESA-Bildungsbüro) freut sich über Rückmeldungen und  
Kommentare  
[astropi@esa.int](mailto:astropi@esa.int)

Entwicklung des Konzepts für die ESA durch die National Space Academy (NSA,  
Vereinigtes Königreich)

Eine Produktion von ESA Education (ESA-Bildungsbüro)  
Copyright 2017 © European Space Agency