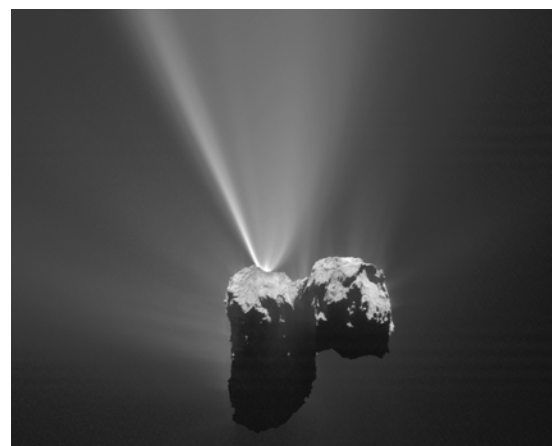
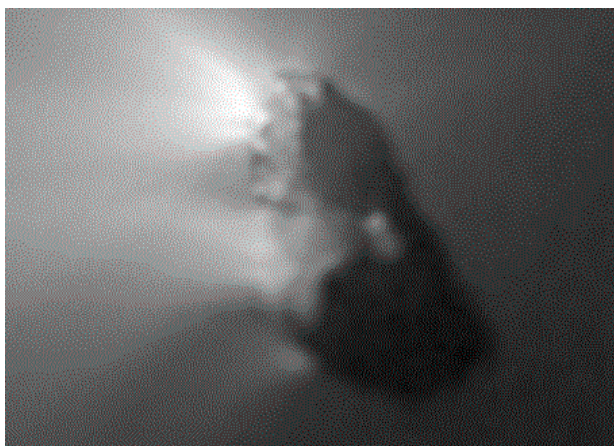


## Kometen in der Schule

Angst haben wir nicht mehr, wenn ein Kometenschweif am Himmel prangt, doch wir staunen. Die ewig menschliche Neugier lässt uns danach fragen wie die Schweife entstehen und warum sind es derer zwei sein können. Die vom Kometenkern frei gesetzten Teilchen bilden in den von ihnen gebildeten Schweifen ideale Anschauungsobjekte für die Wirkung des Strahlungsdrucks („Photonenwind“) und des Sonnenwinds. Warum sind die Kometen so schnell wieder verschwunden, d. h. warum sind sie nur relativ kurz in Sonnennähe? Die Antwort liefert das auf der Drehimpulserhaltung beruhende zweite keplersche Gesetz. Die „Erosion“ der Kometen beruht auf der Sublimation, einem wenig alltäglichen Phasenübergang. Man denke an die Kometen, wenn die bretthart gefrorene Wäsche in der trockenen Frostluft langsam weicher (wasserärmer) wird. Haben die Kometen in grauer Vorzeit das Wasser Weltmeere geliefert? Die Vermutung liegt nahe.

Es wird ersichtlich – Kometen bieten eine Reihe von interessanten Anknüpfungspunkten zu schulischen Themen. Einige Möglichkeiten werden im Folgenden in Form von Modellvorstellungen, verschiedenen Aufgaben, einem Freihandexperiment, einer Medienseite mit Filmen und Illustrationen u. a. m. vorgestellt.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Mechanik, Quantenphysik, Thermodynamik	2. keplersches Gesetz, Drehimpulserhaltung, Strahlungsdruck, Energiedichte, Sublimation, Dissoziation, Plasma
Astronomie	Kleinkörper, diffuses Medium	Kometen, Sonnenwind, Meteore, Staubteilchen
Fächer- verknüpfung	Astro-Geo, Astro-Ma	Weltmeere, Ellipsen



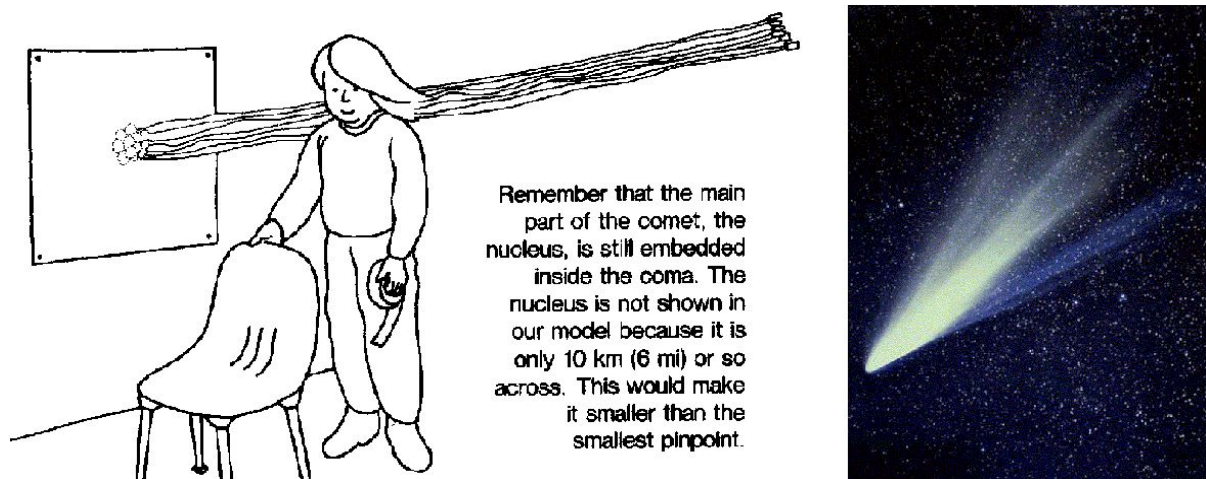
**Abbildung 1:** Links: Kern des Kometen Halley (Größe ca. 15 km x 7 km x 7 km), aufgenommen am 10. 12. 1986 durch die Kometensonde Giotto. ©: Halley Multicolour Camera Team, Giotto, ESA, Copyright: MPAE, <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap961210.html>, [https://apod.nasa.gov/apod/image/9612/halley\\_hmc\\_big.gif](https://apod.nasa.gov/apod/image/9612/halley_hmc_big.gif). Auf der sonnenzugewandten Seite des Kerns sublimiert die Kometenmaterie, was zum Teil eruptiv erfolgt. Rechts: Im August 2015 beobachtete die Raumsonde Rosetta Jets aus Gas und Staub, die vom Kern des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko bei dessen Perihel ausgestoßen wurden. ©: D. Romeuf (University Claude Bernard Lyon 1, France; images: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS / UPD / LAM / IAA / SSO / INTA / UPM / DASP / IDA, <http://blogs.esa.int/rosetta/2015/10/09/comet-jet-in-3d/>.

## Kometen – richtige und falsche Vorstellungen

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Kometen gehörten in der Vergangenheit zu den Furcht einflößenden Erscheinungen des Sternenhimmels. Die zum Teil riesigen Kometenschweife ließen ein Gefühl bedrohlicher Nähe aufkommen. Heute wissen wir, dass die Kometenschweife so riesige Ausmaße annehmen können (bis zu einigen 100 Mio km Länge), dass sie auch aus beruhigend großer Entfernung noch eine gewaltige scheinbare Größe einnehmen können. In Abb. 2 wird ein **räumliches Modell** gezeigt, welches die Ausmaße der Strukturelemente eines Kometen maßstäblich zueinander ins Verhältnis setzt.

Während der Kometenkern nur einige km groß ist, bilden sich erst in Sonnennähe (ab etwa 2-3 AE) die einige  $10^5$  km große Koma und dann der bis zu  $10^8$  km lange Schweif aus. Im Modell entspräche einem 10 m langen Schweif eine Koma mit einem Durchmesser im cm-Bereich und einem Kern mit den nicht mehr darstellbaren Ausmaßen aller kleinster Staubteilchen (Mikrometerbruchteile).



**Abbildung 2:** Links: Räumliches Kometenmodell (aus [1]). Rechts: Zum Vergleich eine Aufnahme des Kometen West (1976). Der Gasschweif erscheint bläulich, der Staubschweif weißlich [3].

### Aufgabe für Schüler:

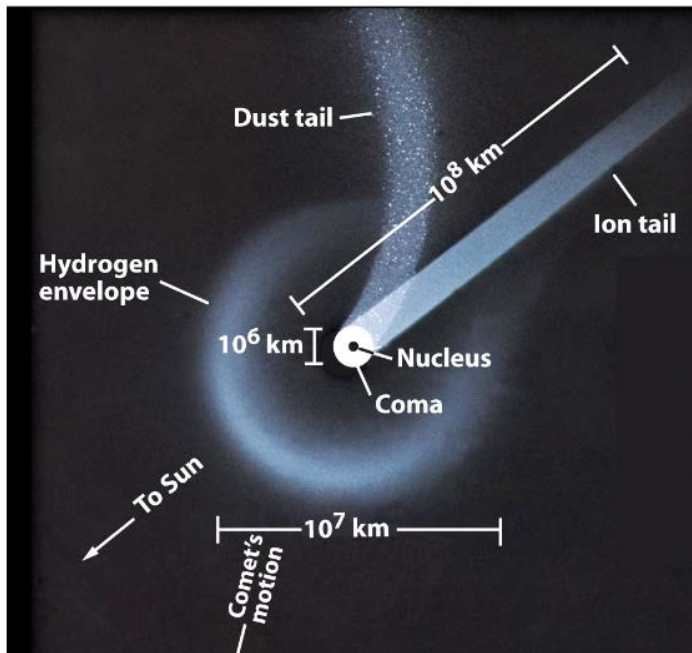
Ein für das Auge nicht sichtbarer Bestandteil der Koma ist die Wasserstoff-Wolke.

Im SuW-Beitrag (S. 22 rechte Spalte) heißt es: „Die Lebensdauer der Moleküle beträgt für beide Reaktionen bei einem Sonnenabstand von einer Astronomischen Einheit etwa einen Tag. Bei der Dissoziation wird Überschussenergie frei, die vor allem in kinetische Energie der Wasserstoffatome umgewandelt wird. Der Wasserstoff wird dadurch von einer typischen Gaseschwindigkeit in der Koma von etwa 1 km/s auf 10 bis 20 km/s beschleunigt....“.

Zur Ergänzung der Wasserstoffwolke ins Dimensionsmodell eines Kometen soll deren Größe (in Realität und im Modell), basierend auf im SuW-Beitrag gemachten Angaben, ermittelt werden. Wodurch wird die Lebensdauer der H-Moleküle bestimmt? Zeigen Sie rechnerisch, wie es zur Beschleunigung auf 20 km/s kommt!

Ergebnis:

$$s = v \cdot t = 20 \text{ km/s} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} \approx \underline{\underline{2 \cdot 10^6 \text{ km}}}$$



Bestandteile des Kometen in Bezug auf Kometenbahn und Bestrahlungsrichtung. ©: Figure 15-20, Universe, Eighth Edition, 2008 W. H. Freeman and Company, [http://www.lpl.arizona.edu/~shane/PTYS\\_206/lectures/PTYS\\_206\\_comets.pdf](http://www.lpl.arizona.edu/~shane/PTYS_206/lectures/PTYS_206_comets.pdf)

Die Wasserstoffwolke ist also um ein Vielfaches größer als die sichtbare Koma des Kometen. Im oben genannten Modell hätte die Wasserstoffwolke einen Durchmesser von 40 cm. Die Wasserstoffwolke kann sogar noch größer werden, wenn man eine andere Lebensdauer der H-Atome voraussetzt. Das „Leben“ der H-Atome wird beendet, wenn sie durch einfallende hochenergetische Photonen (UV) „zerstückelt“ werden, sprich bei Ionisation. Je weiter ein H-Atom von der Sonne entfernt ist, desto seltener wird es von einem UV-Photon getroffen.

Trifft ein UV-Photon ( $\lambda=200 \text{ nm}$ ) auf ein  $\text{H}_2\text{O}$ -Molekül, so wird die Dissoziationsenergie „abgezwickelt“ (die Dissoziationsenergie für  $\text{H}_2\text{O}$  beträgt ca. 0,6 eV,  $1 \text{ eV}=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Nm}$ ). Die verbleibende Energie  $W_{\text{UV,Rest}}$

dient der Beschleunigung der Dissoziationsprodukte (H und OH) von 1 km/s ausgehend. Es wird davon ausgegangen, dass die H-Atome und die OH-Moleküle jeweils die halbe Restenergie erhalten.

$$W_{\text{kin}} = \frac{\mu_{\text{H}}}{2} \cdot v^2 = W_{\text{kin,1km/s}} + W_{\text{UV,Resr}} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\left( W_{\text{kin,1km/s}} + W_{\text{UV,Resr}} \right) \cdot \frac{2}{\mu_{\text{H}}}}$$

mit  $\mu_{\text{H}} = M_{\text{r,H}} \cdot m_{\text{u}} = 1,00794 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$\begin{aligned} \text{und } W_{\text{UV,Rest}} &= W_{\text{UV}} - W_{\text{Dissoziation}} = \frac{h \cdot c}{\lambda} - W_{\text{Dissoziation}} \\ &= \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Nm s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{200 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Nm} \approx 9 \cdot 10^{-19} \text{ Nm.} \end{aligned}$$

erhält man für die H - Atome eine "Restenergie" von ca.  $4,5 \cdot 10^{-19} \text{ Nm}$ .

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\left( \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{2} \cdot (1000 \text{ m/s})^2 + 4,5 \cdot 10^{-19} \text{ Nm} \right) \cdot \frac{2}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} \\ &\approx \sqrt{\left( 8 \cdot 10^{-22} \text{ Nm} + 4,5 \cdot 10^{-19} \text{ Nm} \right) \cdot \frac{2}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} \approx \underline{\underline{23.000 \text{ m/s.}}} \end{aligned}$$

Aus dem Vergleich der Aufnahme einer beeindruckenden Kometenerscheinung mit dem räumlichen Kometenmodell wird klar, dass eine lichtstarke Quelle am Sternenhimmel nicht zwangsläufig auf eine große Masse zurückgeführt werden muss. Je größer die Wechselwirkungsfläche eines kosmischen Objekts bei gleicher Masse ist, desto mehr Licht kann von dem Objekt in Richtung zum Beobachter gestreut/emittiert werden. Kometen eröffnen so den Blick auf die Gruppe der kosmischen Objekte, deren Licht auf diffuse Materieverteilungen zurückgeht.

**Aufgabe für Schüler:**

Man berechne das Verhältnis der Oberflächen eines Kometenkerns (5 km Durchmesser) zu dem aller Staubteilchen, die aus diesem im Prinzip frei werden können. Es wird angenommen, dass der Kometenkern zu 5% (Volumenprozent) aus Staubteilchen besteht, die einen mittleren Radius von 1 Mikrometer haben sollen.

**Ergebnis:**

Der Komet, der der Einfachheit halber als Kugel angenommen werden kann, wird in  $N$  Staubkügelchen zerlegt.

$$N = \frac{V_{\text{Kern}}}{V_{\text{Staub}}} = \frac{0,05 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot 2500^3 \text{ m}^3}{\frac{4}{3} \pi \cdot (10^{-6})^3 \text{ m}^3} \approx 5 \cdot 10^{26}.$$

Das Verhältnis der Oberflächen ergibt sich dann aus

$$\frac{A_{\text{O,Staub}}}{A_{\text{O,Kern}}} = \frac{5 \cdot 10^{26} \cdot 4\pi \cdot (10^{-6})^2 \text{ m}^2}{4\pi \cdot 2500^2 \cdot \text{m}^2} = \underline{\underline{8 \cdot 10^7}}.$$

Hinsichtlich des Sprachgebrauchs besteht die **Möglichkeit einer Fehlvorstellung** (siehe [\[1\]](#)). Das Wort 'Schweif' kann nach dem alltäglichen Sprachgebrauch mit einem Objekt assoziiert werden, welches einem anderen sich bewegenden Objekt (oder Subjekt) anhängt (Feuerschweif, Haarschweif, ...). Für den Kometenschweif gilt jedoch generell, dass dieser immer von der Sonne wegzeigt und so nach Umrundung der Sonne dem Kometenkopf (Kern+Koma) sogar vorausseilen kann.

## Strahlungsdruck in Aktion: Kometenschweife

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Auch wenn uns die Wirkung des Strahlungsdrucks im täglichen Leben im Allgemeinen entgeht, im Kosmos ist sie in Form der Kometenschweife (Typ I: Staub- und Gasschweife) unübersehbar.

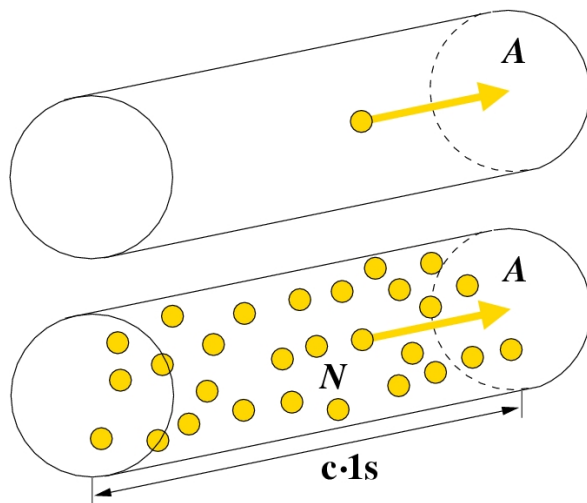
Strahlungsdruck entsteht, wenn ein Photon auf eine Fläche auftrifft und dabei seinen Impuls ändert (entweder zu Null bei völliger Absorption oder mit doppelter Wirkung bei totaler Reflexion).

Während sich der Impuls für ein klassisches Teilchen aus  $i=m \cdot v$  berechnet, bestimmt er sich für ein Photon („Strahlungsteilchen“ mit  $v=c$ ) über dessen Energie  $E=h \cdot \nu$  und mit Hilfe der Beziehung  $E=m \cdot c^2$  aus

$$i = \frac{h \cdot \nu}{c}.$$

Ein Photon übt deshalb einen Strahlungsdruck  $p_{St}$  von

$$p_{St} = \frac{h \cdot \nu}{c \cdot A} \text{ (völlige Absorption) bis } 2 \cdot \frac{h \cdot \nu}{c \cdot A} \text{ (totale Reflexion) aus.}$$



Nun trifft auf die gegebene Fläche  $A$  pro Sekunde aber nicht nur ein Photon, sondern es treffen  $N$  Photonen auf, mit  $N = n \cdot c \cdot 1s \cdot A$ , wobei  $n$  die räumliche Photonendichte darstellen soll. (Pro Sekunde fallen alle Photonen aus dem Volumen  $c \cdot 1s \cdot A$  auf die Fläche  $A$ .)

Für den Strahlungsdruck ergibt sich

$$p_{St} = n \cdot c \cdot A \cdot \frac{h \cdot \nu}{c \cdot A} = n \cdot h \cdot \nu \text{ bis } 2 \cdot n \cdot h \cdot \nu.$$

Ersetzt man die Photonendichte  $n$  durch die Energiedichte  $u$  mit  $u=n \cdot E=n \cdot h \cdot \nu$  so erhält man

$$p_{St} = u \text{ bis } 2u.$$

Der Strahlungsdruck  $p_{St}$  (Kraft pro Fläche) kann also durch die Energiedichte  $u$  (Energie pro Volumen) ausgedrückt werden.

### Anwendung

Beim Erdbestand beträgt die Strahlungsleistung ca.  $P=1,4 \text{ kW/m}^2$  (Solarkonstante), so dass man auf einen Strahlungsdruck von

$$u = \frac{P}{c \cdot A} = \frac{1400 \text{ W} \cdot \text{s}}{1 \text{ m}^2 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m}} \approx 4,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3}$$

kommt.



Die Kraft, die der Strahlungsdruck auf ein Teilchen ausübt, berechnet sich aus

$$F = u \cdot A.$$

In der Koma des Kometen befinden sich Staubteilchen verschiedener Größe.

Nun steht die Frage, wie groß die durch den Strahlungsdruck verursachte „Abstoßungskraft“ im Vergleich zur Anziehungskraft der Sonne im Erdabstand ist.

$$F = \frac{\gamma \cdot M}{r^2} \cdot m = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{(150 \cdot 10^9 \text{ m})^2} \cdot m = 0,00593 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot m.$$

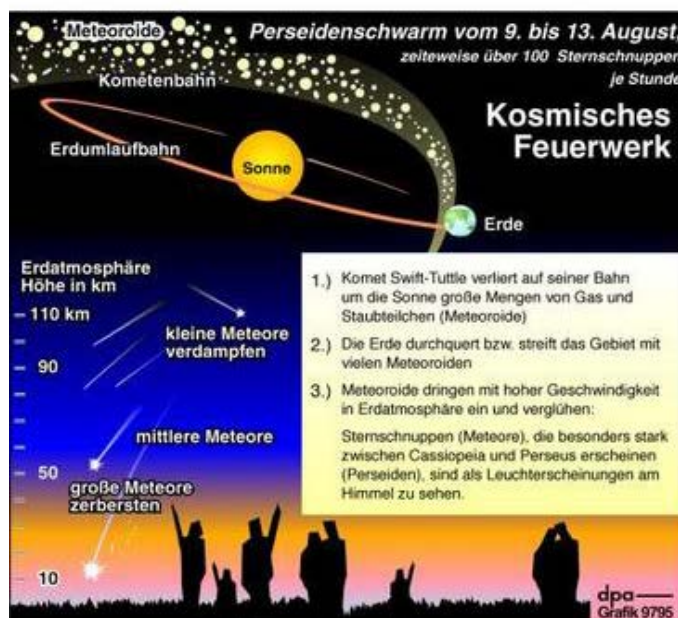
	„Abstoßungskraft“ (Erdabstand) $F = u \cdot A = 4,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} \cdot A$		Anziehungskraft (Erdabstand) $F = \frac{\gamma \cdot M}{r^2} \cdot m = 0,00593 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot m$
kleine Staubteilchen ( $\varnothing$ ca. 1 $\mu\text{m}$ , $A \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ , $m$ ca. $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ kg}$ )	$\approx 1,4 \cdot 10^{-17} \text{ N}$	>	$\approx 8,9 \cdot 10^{-18} \text{ N}$
große Staubteilchen ( $\varnothing$ z. B. ca. 10 $\mu\text{m}$ , $A \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ , $m$ ca. $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$ )	$\approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ N}$	<	$\approx 8,9 \cdot 10^{-15} \text{ N}$

Die Staubschweife werden also durch die **kleinen Staubteilchen** gebildet. Diese haben im Vergleich zu den großen Teilchen das günstigste Verhältnis von „strahlungsdruckempfindlicher“ Oberfläche zu „gravitationsempfindlicher“ Masse (Volumen).

Die **großen Staubteilchen** bleiben zunächst im Bereich der Bahn des Kometenkerns und verteilen sich nach und nach entlang dieser. Kreuzt die Erde einen dieser „Staubschläuche“, so kommt es zu Sternschnuppenschauern, wie z. B. den im August sichtbaren Perseiden (siehe

Abb. 3).

Der Strahlungsdruck auf Gasteilchen kann nicht in der dargestellten klassischen Art und Weise berechnet werden.



**Abbildung 3:** Die größeren Staubteilchen verteilen sich mit der Zeit entlang der Kometenbahn. So gehen verschiedene Sternschnuppenströme auf verschiedene Kometen zurück. Für die Perseiden sind Staubkörner aus dem Kometen Swift-Tuttle verantwortlich ©: DPA,

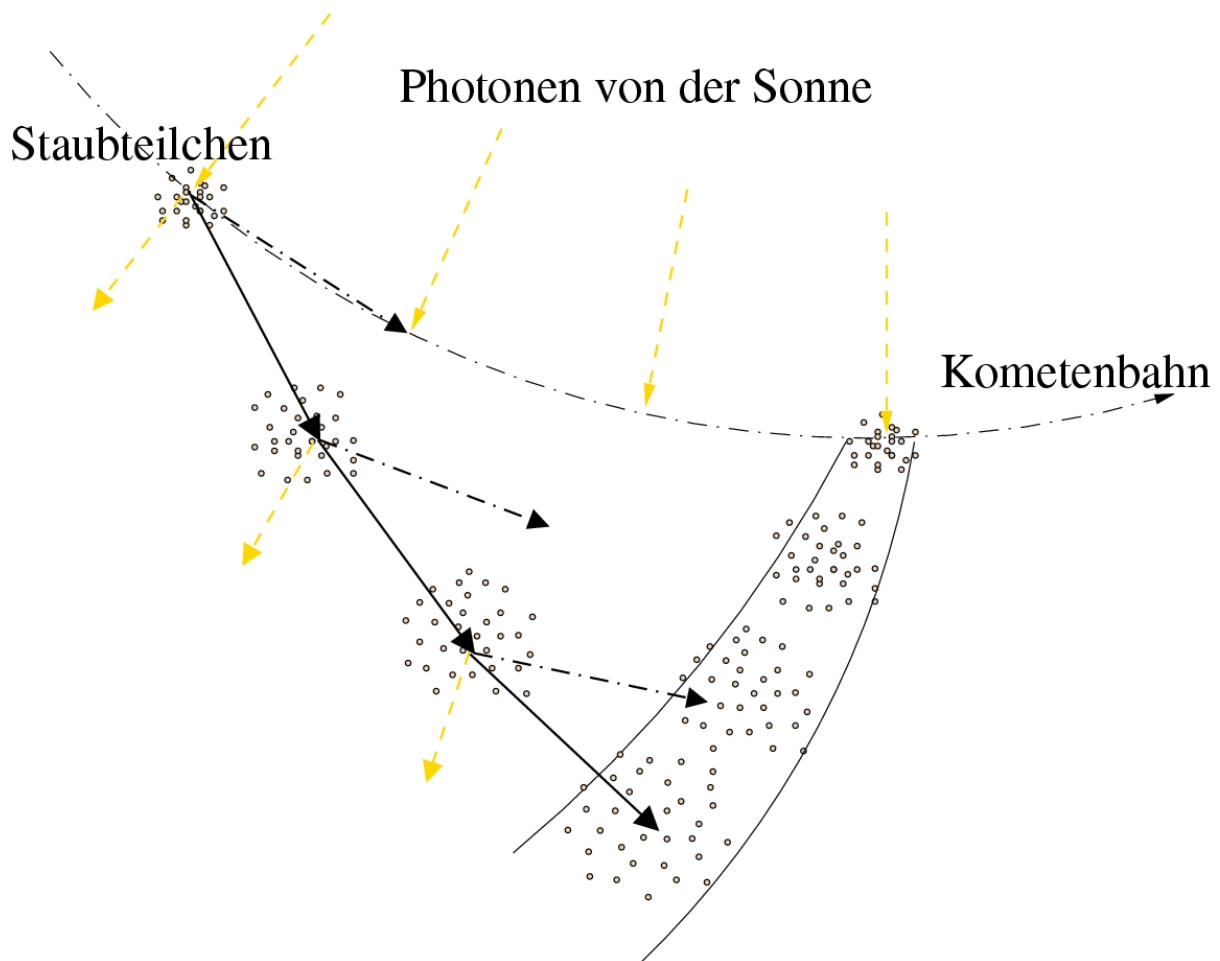
[https://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/astronomie-kosmisches-freilicht-spektakel-173935/grafik-kosmisches-feuerwerk-1127355.html#fotobox\\_1\\_73935](https://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/astronomie-kosmisches-freilicht-spektakel-173935/grafik-kosmisches-feuerwerk-1127355.html#fotobox_1_73935).

## Warum sind die Staubschweife gekrümmt?

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Der Staubschweif entsteht, wenn die Teilchen aus der Koma durch den Strahlungsdruck der solaren Photonen von der Sonne weggetrieben werden. Doch der Staubschweif zeigt rückwärtig nicht direkt zur Sonne und ist dazu noch gekrümmt. Die Ursache für diese Abweichung liegt in der „Kurvenfahrt“ des Kometen.

Je länger ein Staubteilchen dem Strahlungsdruck ausgesetzt ist, desto weiter wird es vom Kometenkopf weggetrieben. Gleichzeitig bewegt es sich mit der Bahngeschwindigkeit des Kometenkerns weiter. Diese ist jedoch zu gering, um den gleichen Bahnwinkel zu überstreichen, wie es der Kern tut, so dass die Staubteilchen mehr und mehr hinter der Verbindungslinie Sonne-Komet zurückbleiben und einen gekrümmten Staubschweif bilden (siehe Abb. 4).



**Abbildung 4:** Entwicklung der Krümmung eines Staubschweifs (Datei [staubschweif.jpg](#)). Gezeigt wird, wie sich die Staubteilchen aus der Koma nach und nach von dieser entfernen. Ihre Bewegung setzt sich zusammen aus einer radial von der Sonne weg gerichteten beschleunigten Komponente (bedingt durch den Strahlungsdruck, gelbe gestrichelte Pfeile) und einer Komponente der Trägheitsbewegung im Gravitationsfeld der Sonne (schwarze Strich-Punkt-Pfeile). Ein zusammenhängender Schweif entsteht, weil ständig Teilchen abgegeben werden, was im Bild nur in der letzten gezeigten Position zum Tragen kommt. ©: Olaf Fischer.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

## Was man aus dem Plasmaschweif über den Sonnenwind lernen kann

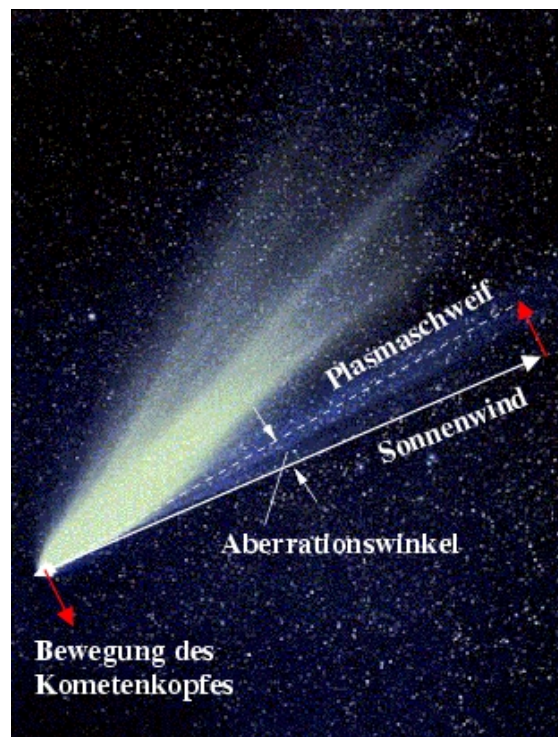
Der Plasmaschweif wird durch den Sonnenwind verursacht. Die von der Sonne wegfliegenden geladenen Teilchen (vor allem die Protonen) nehmen infolge elektromagnetischer Kopplung die Ionen aus der Koma des Kometen mit. Dabei kommt es zu einem Aberrationseffekt, d. h. der Plasmaschweif zeigt in rückwärtiger Verlängerung nicht genau zur Sonne. Die Aberration kommt dadurch zustande, dass sich der Komet auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Sonnenwinds bewegt, so dass die Plasmateilchen leicht schräg (und nicht direkt in radial von der Sonne wegweisender Richtung) von den Sonnenwindteilchen getroffen werden. Diesen Effekt hat der Sonneberger Astronom Cuno Hoffmeister auf Himmelsaufnahmen festgestellt und vermessen.

### Aufgabe für Schüler:

Die Auswertung von Kometenbildern erlaubt u. a. die Bestimmung der Geschwindigkeit des Sonnenwinds.

Für einen Kometen wurde eine Abweichung zwischen der Richtung des Plasmaschweifs und der Richtung zur Sonne von ca.  $5^\circ$  (Aberrationswinkel  $\alpha$ ) festgestellt. Man bestimme aus diesen Angaben und der Kenntnis der Bahngeschwindigkeit des Kometen zum Aufnahmezeitpunkt (35 km/s) die Geschwindigkeit des Sonnenwinds.

Man beachte, dass der Aberrationswinkel nicht direkt aus der Aufnahme, sondern erst nach einigen räumlich-geometrischen „Richtigstellungen“ möglich ist.

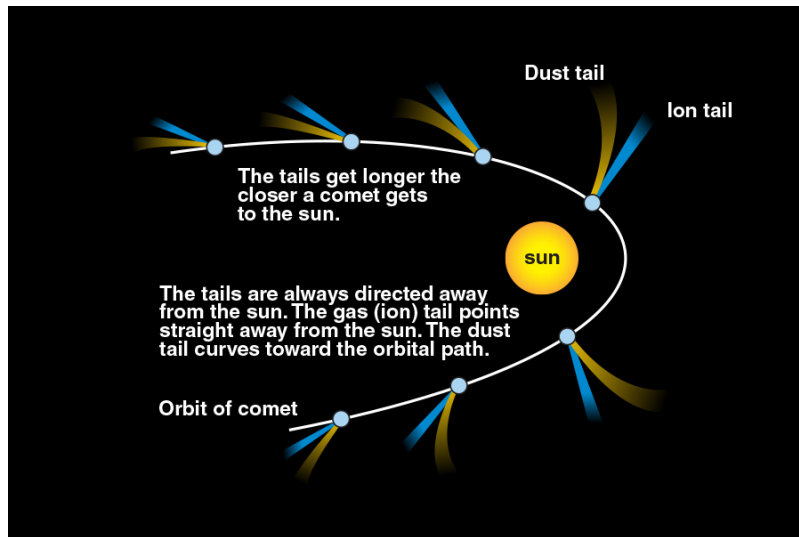


### Ergebnis:

$$\tan \alpha = \frac{v_{\text{Kern}}}{v_{\text{Sonnenwind}}} \quad \rightarrow \quad v_{\text{Sonnenwind}} = v_{\text{Kern}} \cdot \frac{1}{\tan \alpha}$$

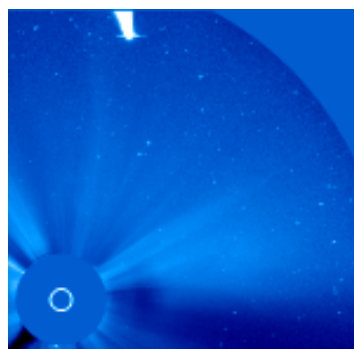
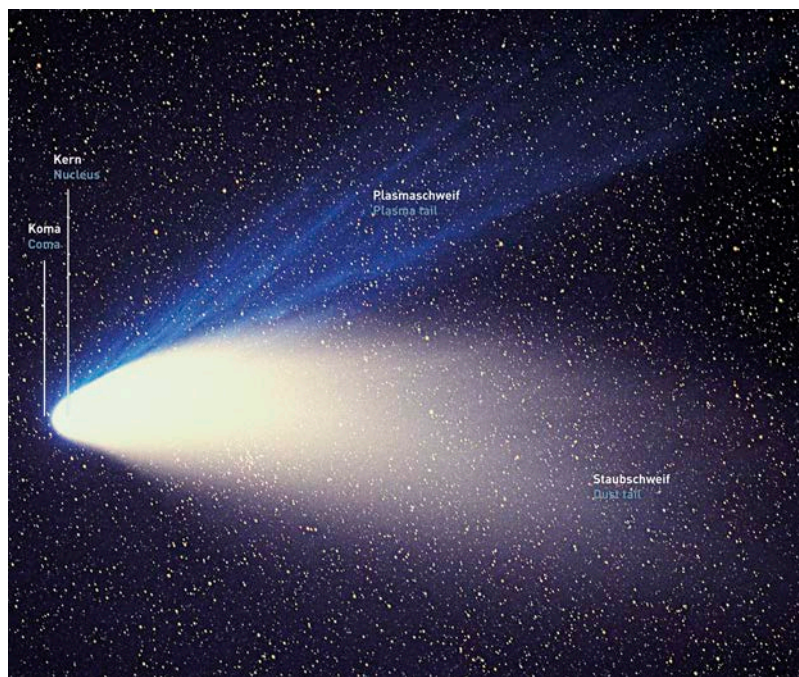
$$v_{\text{Sonnenwind}} = 35 \text{ km/s} \cdot \frac{1}{\tan 5^\circ} \approx \underline{\underline{400 \text{ km/s}}}$$





**Abbildung 5:**

Oben: Kometenbahn mit Schweifphänomenen. ©: NASA Space Place - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54176004>.  
 Unten: Wesentliche Elemente eines Kometen. ©: DLR, [https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/portal\\_bilder/2016/2016\\_3/Faszination-Hale-Bopp.jpg](https://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/portal_bilder/2016/2016_3/Faszination-Hale-Bopp.jpg).



**Abbildung 6:** Einmalige Zeitrafferfilme, aufgenommen von Bord des Sonnenbeobachtungssatelliten SOHO aus [4]. Von links nach rechts: Komet NEAT im Februar 2003. Staub- und Plasmaschweif sind markant. Der Sonnenwind ist nahe der Sonne sichtbar (Bildquelle: die Filmdatei [comet\\_neat\\_anim\\_feb2003.gif](#) kann z. B. mit dem Windows-Media Player abgespielt werden). Das Movie [2swind.mov](#) zeigt deutlich das Abströmen des Sonnenwinds. Der Komet Hyakutake ist im Movie [Hyak3df.mov](#) zu sehen. Etliche Kometen stürzen auch in die Sonne, wie es im Movie [C2xmas1.mov](#) verfolgt werden kann.



**Abbildung 7:** Komet West (1976)  
[3], Datei: [West.gif](#).

Das gezeigte Bild bietet eine Reihe von Anknüpfungspunkten, um Physik anzuwenden. Ausgehend von bestimmten Merkmalen lassen sich Gedankenketten knüpfen. Die Schüler erhalten die Möglichkeit, physikalisches Denken zu üben und die entsprechenden Zusammenhänge sprachlich darzustellen. Außerdem lässt sich kontrollieren, wie gut der zuvor zur Verfügung gestellte Zeitschriftenbeitrag von SuW gelesen und verstanden wurde.

- Wo im Sonnensystems befindet sich der gezeigte Komet etwa im Moment der Aufnahme?
- Wie lang ist der Staubschweif, wenn man annimmt, dass die Aufnahme ein Feld von  $10^\circ$  mal  $15^\circ$  zeigt und der Komet etwa 1 AE von der Erde entfernt ist?
- Staub- und Plasmaschweif sind zu zeigen. Wie und warum sind die Schweife sichtbar?
- Woher stammen die Teilchen im Plasmaschweif? Erklären Sie dazu die Begriffe Dissoziation, Sublimation, Ionisation und bringen Sie diese in die richtige zeitliche Abfolge!
- Was bewirkt die Dissoziation und Ionisation der Gasteilchen?
- In welcher Richtung befindet sich in etwa die Sonne?
- Woher stammen die Staubteilchen im Staubschweif und wie gelangen sie dorthin?
- In welcher Richtung bewegt sich der Komet?

## Ergebnisse:

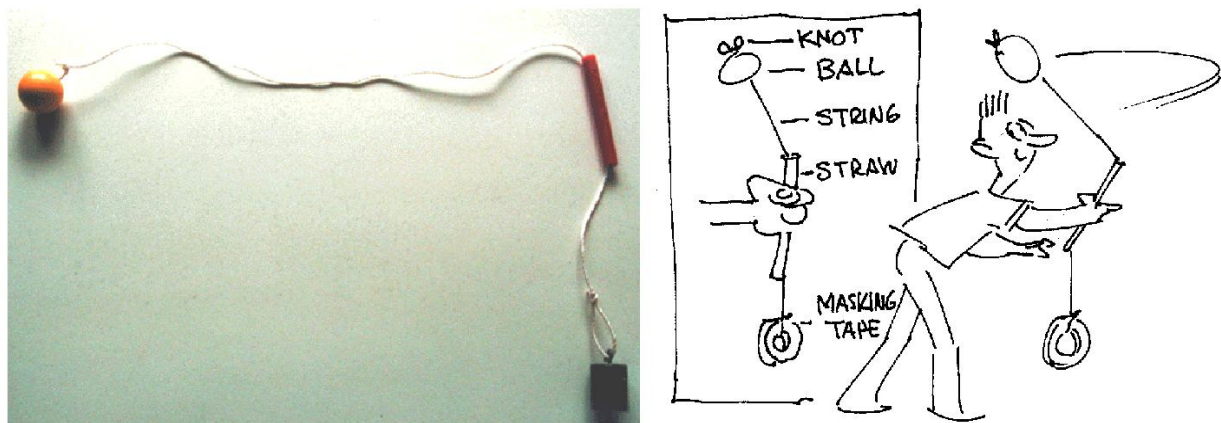
- Der Komet zeigt gut ausgebildete Schweife und ist deshalb nahe der Sonne zu vermuten (Abstand zur Sonne  $< 2\text{AE}$ ).
- Der Staubschweif erscheint etwa in der scheinbaren Größe von  $10^\circ$  (in Projektion!).  
$$x = \tan 10^\circ \cdot 1 \text{ AE} \geq 26 \cdot 10^6 \text{ km.}$$
Infolge der Sichtbarkeit in Projektion ist der Schweif mind. 26 Mio km lang.
- Der weißlich erscheinende breit gefächerte Schweif ist der Staubschweif, der durch das gestreute Sonnenlicht sichtbar wird. Der schmale Plasmaschweif erscheint im bläulichen Licht der Emission des einfach ionisierten Kohlenstoffmonoxids ( $\text{CO}^+$ ).
- Die Teilchen im Plasmaschweif (Ionen und Elektronen) entstehen aus den Gasmolekülen, die in Sonnennähe aus dem Kern frei werden. Dabei sind folgende Prozesse in der dargestellten Abfolge wirksam: Sublimation  $\rightarrow$  Dissoziation  $\rightarrow$  Ionisation. Kometen verdampfen nicht – sie sublimieren. Dieser Phasenübergang von fest zu gasförmig ist weniger alltäglich und erscheint deswegen exklusiv. Durch Druckerniedrigung kann auch bei festen Stoffen, die bei normalem Druck schmelzen, erreicht werden, dass sie sublimieren (Vakuumsublimation). Die frei gewordenen Gasmoleküle werden von hochenergetischen Photonen getroffen, wobei zuerst die molekularen Bindungen getrennt werden (Photodissoziation) und dann Elektronen angeregt und auch „abgesprengt“ werden (Photoionisation).
- Die Sonne ist bei einem Positionswinkel (von der nach oben weisenden Nordrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn gemessen) von etwa  $100^\circ$  zu erwarten.
- Auch die Staubteilchen stammen aus der Kometenkern. Dieser wird landläufig als schmutziger Schneeball bezeichnet, d. h. der Staub ist im gefrorenen Gas fixiert. Durch die sublimierenden Gasteilchen wird er dann in die Koma gestoßen.
- Der Komet bewegt sich in einer Richtung mit dem Positionswinkel von etwa  $200^\circ$  (von leicht links oben nach leicht rechts unten). (Der Staubschweif ist stärker zur Bahn hin gekrümmt als der Plasmaschweif).

## Das 2. keplersche Gesetz im Freihandversuch (Warum sehen wir Kometen nur für kurze Zeit?)

[\(←zurück zum Anfang\)](#)

Ein einfaches Freihandexperiment (Abb. 8) kann Ausgangspunkt für die Betrachtung der Kometenbahnen nach mathematisch-physikalischen Gesichtspunkten sein und einen aktiven und nachvollziehbaren Zugang zum 2. Keplerschen Gesetz ermöglichen.

Zunächst gilt es, die Analogie zwischen dem Experiment und der Kometenbewegung herzustellen. Im Zentrum der Drehbewegung (Rohrende) denke man sich die Sonne. Aufgrund des großen Massenunterschieds Sonne-Komet wird der Ort des Sonnenzentrums als fest angesehen. Das Gewicht des hängenden Massestücks repräsentiert die Gravitationskraft zwischen Sonne und Komet, die über den Faden auf die Kugel (Komet) als Zentralkraft wirkt. Die nicht im Versuch realisierbare Radiusabhängigkeit der Gravitationskraft sollte erwähnt werden. Die tangentielle Bewegung der Kugel (ihre Trägheitsbewegung) bewahrt sie davor, ins Zentrum gezogen zu werden. Für einen stabilen Umlauf in einem gegebenen Abstand bedarf es einer bestimmten Bahngeschwindigkeit. Während die Kugel im Versuch zum Ausgleich der Reibungsverluste stets kinetische Energie nachgeliefert bekommt, läuft ein Komet reibungsfrei um. Es muss erwähnt werden, dass periodische Kometen auf Ellipsenbahnen umlaufen. Der Begriff der Ellipse ist dazu eventuell kurz einzuführen. Die im Experiment darstellbare Kreisbahn stellt nur einen Spezialfall dar.



**Abbildung 8:** Freihandversuch zur Wiederholung/qualitativen Erarbeitung physikalischer Gesetzmäßigkeiten des Planetenumlaufs. Links: Eine Kugel wird an einem durch ein Rohr geführten Faden herumgeschleudert (obere Rohrwandung zur Reibungsminimierung abgerundet). Das Gewicht am anderen Fadenende liefert die Zentralkraft. Rechts: Anstatt des Gewichts ist am anderen Fadenende ein Ring angebracht, der das Durchrutschen durch das Rohr verhindert und als Zugring zur Abstandsverringerung dient. (Bild aus [\[1\]](#)).



Die Drehimpulserhaltung bildet den physikalischen Hintergrund für das 2. Keplersche Gesetz. Die Brücke zur Physik sollte hergestellt werden, indem man diesen Erhaltungssatz anhand des Freihandexperiments wiederholt oder eventuell einführt. Dazu schleudere man die Kugel der Masse  $m$  im größtmöglichen Abstand  $r_0$  (Zugring am Rohrende) mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  um (siehe Abb. ..). Nun verkürze man schnell den Abstand von  $r_0$  auf  $r_1$  durch Ziehen am Ring (die Reibungsverluste in der Zeit der Abstandsverringering seien unbedenklich). Es stellt sich eine merklich größere Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$  ein. Es wird klar, dass der Komet in Sonnennähe um ein Vielfaches schneller ist als in Sonnenferne. Die Art der Geschwindigkeitsvergrößerung kann mit dem Freihandversuch nicht quantitativ erfasst werden, muss also gegeben werden (Faktor  $(r_0/r_1)^2$ ). Die Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit muss als Konsequenz der Erhaltung des Drehimpulses diskutiert werden. Es gilt

$$m \cdot r_0^2 \cdot \omega_0 = m \cdot r_1^2 \cdot \omega_1.$$

Der Wortlaut des 2. keplerschen Gesetzes („Der Leitstrahl Sonne-Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen“) beinhaltet die geometrisch-anschauliche Formulierung des Drehimpulserhaltungssatzes. Nun gilt es zu zeigen, dass der Drehimpulserhaltungssatz in das 2. keplersche Gesetz überführt werden kann. Mit  $\omega = \Delta\varphi / \Delta t$  erhält man

$$r_0^2 \cdot \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta t} = r_1^2 \cdot \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta t}.$$

Da sich die Fläche eines Kreissegments aus

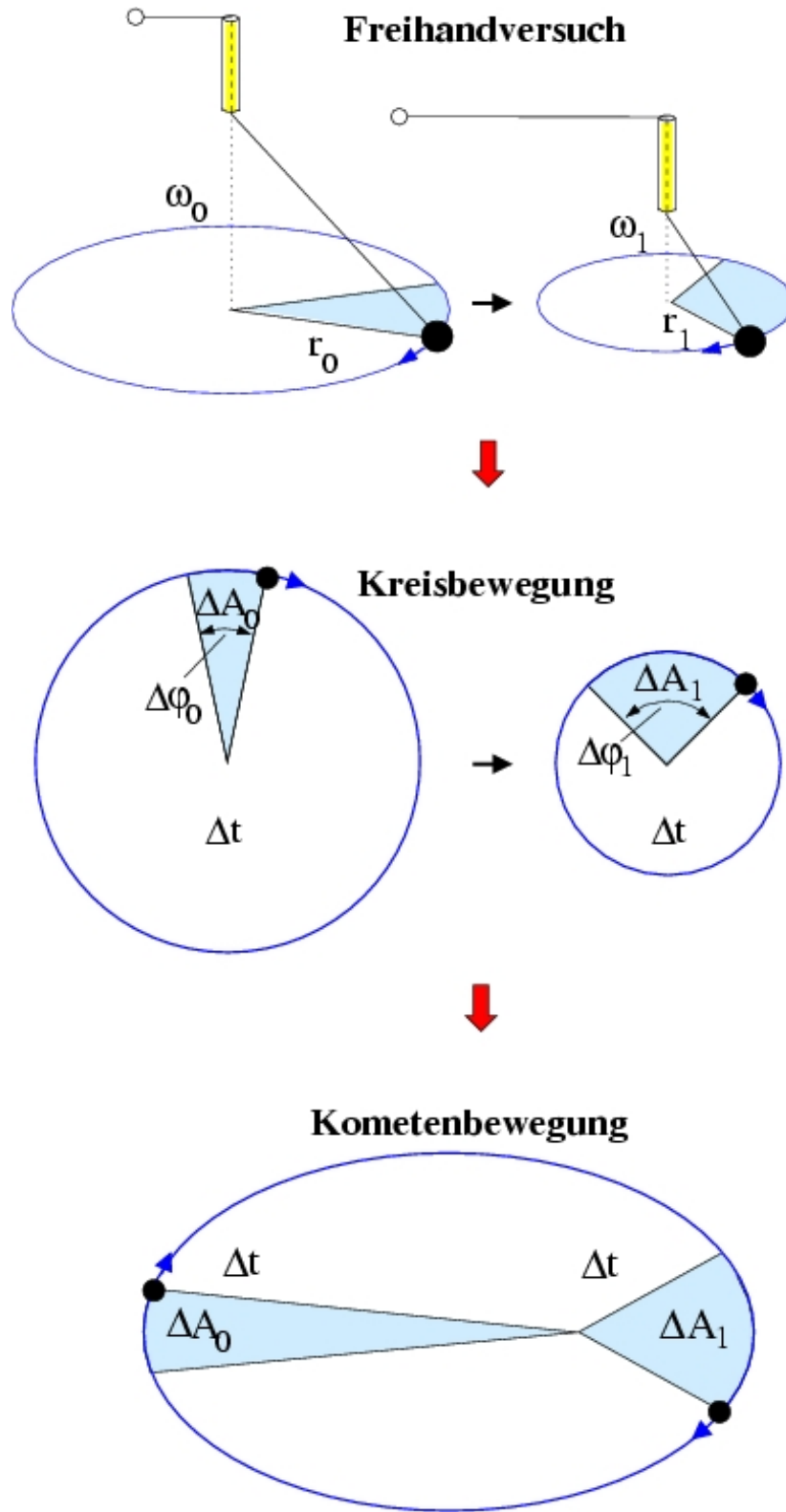
$$\Delta A = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{\Delta\varphi}{2} \cdot r^2$$

berechnen lässt, erhält man

$$\frac{\Delta A_0}{\Delta t} = \frac{\Delta A_1}{\Delta t},$$

d. h. in gleichen Zeiten  $\Delta t$  werden gleiche Flächen ( $\Delta A_0 = \Delta A_1$ ) überstrichen.





**Abbildung 9:** Folienvorlage mit Erarbeitungskette (Datei: [kepler.jpg](#)). Vom Freihandexperiment zum Spezialfall des Flächensatzes für die Kreisbahnbewegung hin zur Verallgemeinerung des Flächensatzes für die Planetenbewegung. ©: Olaf Fischer.

**Aufgabe für Schüler:**

Warum sind Kometen nur relativ kurz in der Nähe der Sonne? Man schätze dazu am Beispiel des Kometen 73P/Schwassmann-Wachmann (Fragment C) ab, um wie viel er in Sonnennähe schneller ist als in Sonnenferne. Die gegebenen Bahndaten sind die Periheldistanz von 0,939135 AE, die große Halbachse von  $a=3,060989$  AE und die numerische Exzentrizität von  $\varepsilon=0,693192$  (Quelle: <http://cfa-www.harvard.edu/iau/Ephemerides/Comets/0073P.html>).

Die Bahn des Kometen ist maßstabsgerecht im Vergleich zur Erdbahn zu zeichnen, wobei die Sonne im Ursprung des Koordinatensystems liegen soll.

Wie lange hält sich der Komet 73P/Schwassmann-Wachmann in den zwei sonnennahen Quadranten auf (Umlaufzeit  $T=5,35$  Jahren)?

**Ergebnis:**

Für die Abschätzung des Verhältnisses der Bahngeschwindigkeiten im Perihel und im Aphel (Sonnenabstand  $r_{\text{Perihel}}$  bzw.  $r_{\text{Aphel}}$ ) wird jeweils ein kurzer (als linear idealisierter) Bahnabschnitt  $s_{\text{Perihel}}$  bzw.  $s_{\text{Aphel}}$  betrachtet, der eine Dreiecksfläche mit der Spitze in der Sonne ausschneidet.

Es gilt

$$\Delta A_{\text{Perihel}} = r_{\text{Perihel}} \cdot s_{\text{Perihel}} \quad \text{und} \quad \Delta A_{\text{Aphel}} = r_{\text{Aphel}} \cdot s_{\text{Aphel}}.$$

Da der Leitstrahl Sonne-Komet nach dem 2. keplerschen Gesetz in gleichen Zeiten gleiche Flächen überstreicht, gilt für einen angenommenen kurzen Zeitraum  $\Delta t$

$$\Delta A_{\text{Perihel}} = \Delta A_{\text{Aphel}} \quad \text{und es folgt}$$

$$\frac{v_{\text{Perihel}}}{v_{\text{Aphel}}} = \frac{s_{\text{Perihel}} / \Delta t}{s_{\text{Aphel}} / \Delta t} = \frac{r_{\text{Aphel}}}{r_{\text{Perihel}}}.$$

Der Aphelabstand  $r_{\text{Aphel}}$  ergibt sich aus  $a+e$ , wobei  $e$  (Abstand  $e$  vom Mittelpunkt zum Brennpunkt der Ellipse, die lineare Exzentrizität) sich mit Hilfe der numerischen Exzentrizität berechnen lässt.

$$r_{\text{Aphel}} = a + e = a + \varepsilon \cdot a = (1 + \varepsilon) \cdot a = (1 + 0,693192) \cdot 3,060989 \text{ AE} = 5,182842 \text{ AE}.$$

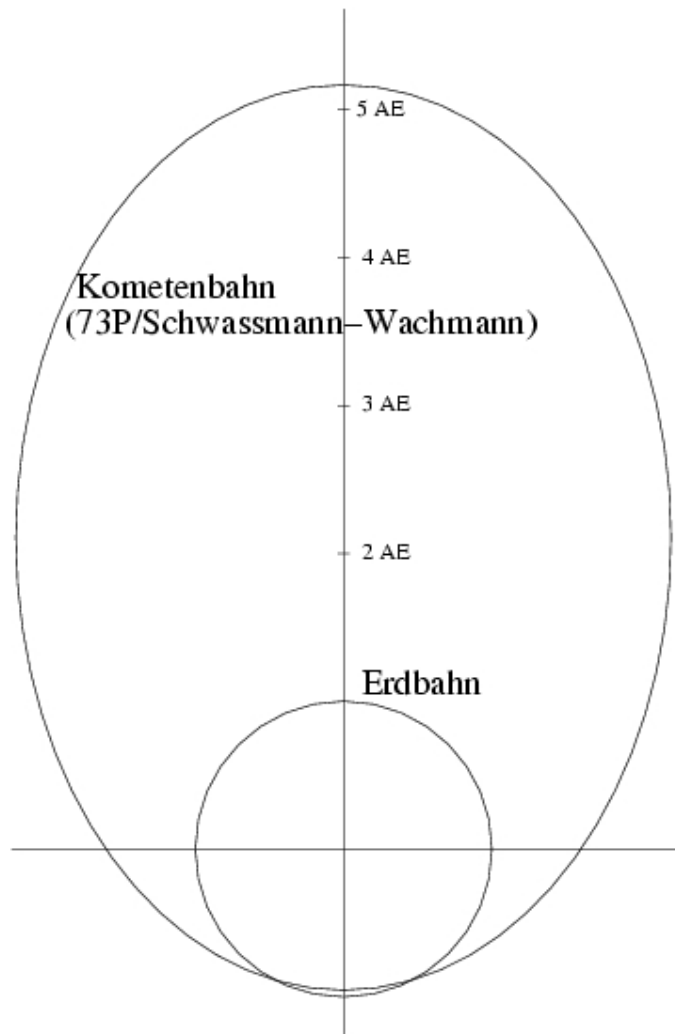
$$\frac{v_{\text{Perihel}}}{v_{\text{Aphel}}} = \frac{r_{\text{Aphel}}}{r_{\text{Perihel}}} = \frac{5,182842 \text{ AE}}{0,939135 \text{ AE}} \approx \underline{\underline{5,5}}$$

Da sich Kometen in Sonnennähe um ein Mehrfaches schneller als in Sonnenferne bewegen, die Kometenphänomene Halo und Schweif aber nur in Sonnennähe auftreten und nur in relativer Erdnähe beobachtbar sind, gelten Kometen als seltene Himmelserscheinungen.

Zur Zeichnung der Bahnellipse des Kometen ist die Kenntnis der kleinen Halbachse  $b$  wichtig.

$$b = \sqrt{a^2 - e^2} = \sqrt{a^2 - (\varepsilon \cdot a)^2} = \sqrt{(1 - \varepsilon^2) \cdot a^2} = \sqrt{(1 - 0,693192^2) \cdot 3,060989^2 \text{ AE}^2} \approx \underline{\underline{2,2 \text{ AE}}}$$

Man beachte, dass die Kometenbahn in Bezug zur Erdbahn eigentlich um etwa  $10^\circ$  geneigt ist.



Die Aufenthaltsdauer des Kometen in den sonnennahen beiden Quadranten (im linken Bild die unteren Quadranten) kann entsprechend dem 2. keplerschen Gesetz aus der überstrichenen Fläche ermittelt werden. Die Ellipsenfläche in den besagten Quadranten verhält sich zur Gesamtfläche der Ellipse wie die gesuchte Zeitspanne zur Umlaufzeit des Kometen. Die Flächen können durch auszählen („Freihand-Numerik“) ermittelt werden. Für die Gesamtfläche der Ellipse kann auch die Formel  $\pi \cdot a \cdot b$  verwendet werden.

Eine andere und trickreiche Möglichkeit zur Bestimmung des Flächenverhältnisses besteht darin, die Flächen auf Pappe abzutragen, auszuschneiden und (bei Annahme gleicher Flächendichte) durch Auswägen zu ermitteln (siehe [2], S. 272).

## Wie viele Kometenkerne braucht man, um die Ostsee zu füllen? ([→zurück zum Anfang](#))

Auf S. 24 des zugehörigen SuW-Beitrags kann man nachlesen, dass man annimmt, dass „spätere Kometeneinschläge auf der jungen Erde einen Großteil des Wassers in die Ozeane brachten“. Wie intensiv kann man sich das Kometenbombardement vorstellen? Dazu folgende Aufgabe.



### Aufgabe für Schüler:

Unter den Annahmen, dass Kometenkerne im Mittel eine Größe von 5 km haben und bei einer Dichte von  $0,6 \text{ t/m}^3$  zu 90% aus Wassereis bestehen, soll berechnet werden, wie viele Kometenkerne benötigt werden, um die Ostsee (Wasservolumen:  $21.721 \text{ km}^3$ ) zu füllen. Es wird in dieser Aufgabe davon ausgegangen, dass 80% des Meerwassers aus Kometenkernen stammt.

In den Weltmeeren befinden sich insgesamt etwa  $1,4 \text{ Mrd km}^3$  Wasser. Wie viele Kometenkerne wären dafür nötig (Bedingungen wie oben)? Bestimme Einschlagraten in Abhängigkeit verschiedener angenommener Zeiträume.

### Ergebnisse:

a.) Ostsee:

Die Kometen werden der Einfachheit halber als Kugeln mit einem Durchmesser von 5 km angenommen.

$$V_{\text{Kern}} = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot 2,5^3 \text{ km}^3 \approx 65,4 \text{ km}^3.$$

Durch die „Kompaktierung“ bei Verflüssigung (Vergrößerung der Dichte von  $0,6 \text{ t/m}^3$  zu  $1,0 \text{ t/m}^3$ ) und bei Berücksichtigung des Wassergehalts von 90% erhält man aus einem Kometenkern ein Wasservolumen von

$$V_{\text{Wasser}} = V_{\text{Kern}} \cdot 0,6 \cdot 0,9 = 65,4 \text{ km}^3 \cdot 0,6 \cdot 0,9 \approx 35,3 \text{ km}^3.$$

Gesucht ist die Anzahl  $N$  der Kometenkerne, die nötig sind, um 80% des Meerwassers zu bilden.

$$N = 0,8 \cdot V_{\text{Ostsee}} / V_{\text{Wasser}} = 0,8 \cdot 21721 \text{ km}^3 / 35,3 \text{ km}^3 \approx \underline{\underline{492}}.$$

a.) Weltmeere:

Für die Weltmeere sind

$$N = 0,8 \cdot V_{\text{Weltmeere}} / V_{\text{Wasser}} = 0,8 \cdot 1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3 / 35,3 \text{ km}^3 \approx 3,2 \cdot 10^7 \text{ Kometenkerne nötig.}$$

Innerhalb von 1 Mio Jahren würden dann 32 Kerne pro Jahr die Erde treffen. Nimmt man dagegen einen Zeitraum von 100 Mio Jahren an, so wäre etwa alle 3 Jahre ein „Wassercontainer“ zu erwarten.

## Quellen

- [1] Fraknoi, A. (Editor): The Universe At Your Fingertips. An Astronomy Activity Resource Book, Project Astro at the Astronomical, Society of the Pacific, 1995
- [2] Götz, R., Dahncke, H., Langensiepen, F. (Hrsg.): Handbuch des Physik-Unterrichts, Sekundarstufe I, Fischler, H., Götz, R., Schlosser, W., Schmidt, H., Schneider, E., Volkmer, M., Weltner, M., Winnenburg, W., Baumann, A., Neumann, L. (Verfasser): Band 8, Atom- und Kernphysik, Astronomie, Technikbezüge, Aulis Verlag Deubner & Co KK, Köln, 1998, S. 208-317
- [3] By NASA, STScI - This image was obtained from the NASA StarChild informative page on Comets [1] on December 31, 2011., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36960584>
- [4] CD SOHO, Exploring the sun, esa