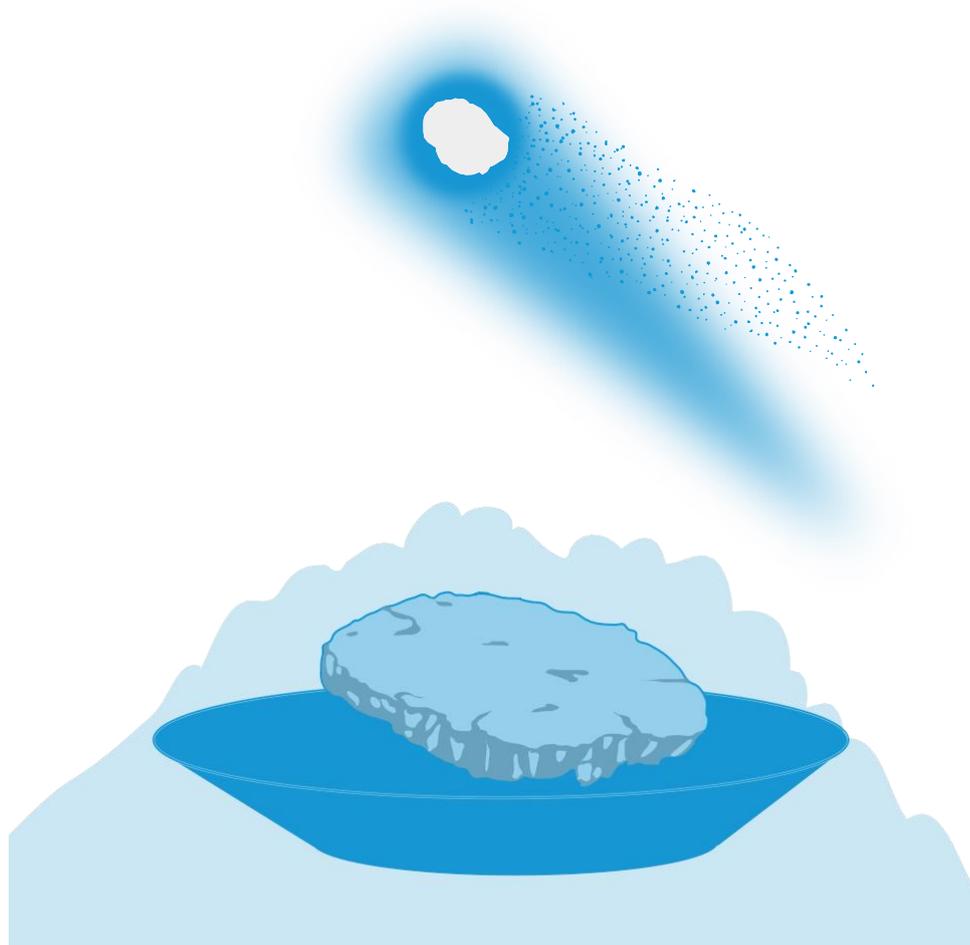


Teach with space

→ WIR BACKEN UNS EINEN KOMETEN

Die Zutaten fürs Leben?



→ EINLEITUNG

Kometen gelten als Zeitkapseln, die Informationen über die Verhältnisse des frühen Sonnensystems enthalten. Um zu verstehen, was Kometen sind, woher sie kommen und wie sie die Entwicklung der Erde beeinflusst haben, muss man herausfinden, welches Material sie enthalten. Diese Demonstration durch den Lehrer und praktische Aufgabe für Schüler vermittelt zusammen mit der daraus resultierenden Diskussion einen Einblick in die chemischen Bestandteile von Kometen. Einbezogen sind auch eine weiterführende Diskussion und weiterführende Aufgabe, wobei die Prozesse des Einschlags auf die Erde und Berechnungen der dabei auftretenden kinetischen Energie untersucht werden.

Die wichtigs	Seite 3
Hintergrun	Seite 4
Aufgabe – Wir backen ...	Seite 12
Diskussion	Seite 14
Weiterführende Diskussion	Seite 18
Schlussfolgerung	Seite 21
Arbeitsblätter für Sc	Seite 22
Mit der ESA im Weltraum	Seite 24
Giotto	Seite 24
SOHO	Seite 27
Komet 103P/Hartley und Herschel	Seite 28
Rosetta	Seite 29
Anhang	Seite 32
Glossar	Seite 32
Antworten zu den Arbeitsblättern	Seite 33
Links	Seite 36

→ WIR BACKEN UNS EINEN KOMETEN

Die Zutaten fürs Leben?

DIE WICHTIGSTEN

Altersgruppe: 14-18 Jahre

Art: Demonstration durch den Lehrer und Aufgabe für Schüler

Schwierigkeitsgrad: leicht

Vorbereitungszeit für den Lehrer: 20 Minuten

Zeitbedarf für den Unterricht: 20 Min. bis 1 St.

Kosten je Kit: mittel (5 - 25 Euro)

Ort: drinnen (großes, gut belüftetes Klassenzimmer)

Einschließlich der Verwendung von: Trockeneis (Kohlensäureeis bei einer Temperatur von unter -78°C)

Die Schüler sollten bereits kennen:

1. Die Gleichung der kinetischen Energie.
2. Die Begriffe Spektroskopie und Infrarotstrahlung.

Lernergebnisse

1. Die Schüler sollten die grundlegenden Unterschiede zwischen Kometen und Asteroiden kennen.
2. Die Schüler sollten mit den grundlegenden Parametern der Zusammensetzung von Kometen vertraut sein.
3. Die Schüler sollten in der Lage sein, einfache Berechnungen der Energieumwandlungen durchzuführen, die auftreten, wenn Kometen oder Asteroiden auf Planeten treffen.

Sie benötigen auch



↑ Video Wir backen uns einen Kometen. Siehe Abschnitt Links.

Verbindungen zum Lehrplan

Physik

- Kinetische Energie
- Erhaltung der Energie
- Zustandsänderungen
- Einschlagsprozesse
- Umlaufbahnen (im Sonnensystem)

Astronomie

- Ort und Art von Asteroiden und Kometen
- Ermittlung der Merkmale eines Kometen (Kern, Koma, Staub und Ionenschweife)
- Auswirkungen von Kollisionen im Sonnensystem
- Zusammenhang des Kuiper-Gürtels und der Oort'schen Wolke mit Kometen
- Raumsonden zur Untersuchung von Körpern im Sonnensystem

Chemie

- Zustandsänderungen

Kurzfassung

Bei dieser Aufgabe simulieren Lehrer und Schüler einen Kometenkern im Klassenzimmer. Die verwendeten Zutaten entsprechen genau dem Material, das in einem realen Kometenkern anzutreffen ist, wie es durch Spektroskopie in Verbindung mit den Ergebnissen aus Vorbeiflügen von Raumfahrzeugen an verschiedenen Kometen entdeckt wurde.

→ HINTERGRUND

Was sind Kometen?

Kometen sind kleine, eisige Welten, die hauptsächlich aus zwei Regionen des Sonnensystems stammen (Abbildung 1). Kurzperiodische Kometen (solche mit einer **Umlaufperiode*** von weniger als 200 Jahren) stammen aus dem Kuiper-Gürtel, einer scheibenartigen Sammlung gefrorener Überreste von der Entstehung des Sonnensystems jenseits der Umlaufbahn des Neptuns. Langperiodische Kometen (solche mit Umlaufperioden von bis zu zehntausenden von Jahren) stammen vermutlich aus einem sphärischen Halo von Eismaterial am Rande unseres Sonnensystems, bekannt als die Oort'sche Wolke. Diese Wolke, die bis in eine Entfernung von vielen tausend **astronomischen Einheiten (AE)***, reicht, ist zu weit entfernt, um direkt abgebildet zu werden. Stattdessen müssen wir die Umlaufbahn eines langperiodischen Kometen zeitlich zurückverfolgen, um seine Herkunft zu ermitteln (Abbildung 2).

Abbildung 1



↑ Foto des Kometen Hale-Bopp, aufgenommen in Kroatien.

Kometen umkreisen die Sonne größtenteils in stabilen Umlaufbahnen. Objekte aus dem Kuiper-Gürtel können jedoch durch die Gravitationsfelder der Riesenplaneten (Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun), und Objekte der Oort'schen Wolke durch **Gravitationsstörungen*** aufgrund der Bewegungen anderer Sterne beeinflusst werden. Gelegentlich können diese Störungen die Umlaufbahnen dieser kleinen, kalten Welten verändern und sie auf einen Kurs in das innere Sonnensystem schicken.

Wenn sich diese Objekte der Sonne nähern, erwärmen sie sich allmählich, und das darin enthaltene Eis **sublimiert***. Die ursprüngliche Struktur wird jetzt als „Kern“ bezeichnet. Erwärmt sich der Kern, setzt er Gas und Staub frei, was eine dünne, jedoch umfangreiche „Atmosphäre“ bildet, die als die Koma bekannt ist (Abbildung 3).

Bei weiterer Annäherung an die Sonne erzeugt die Interaktion der Koma mit einer zunehmenden Sonneneinstrahlung und dem **Sonnenwind*** die spektakulären „Schweife“, mit denen Kometen meist assoziiert werden. Gelegentlich sind die Schweife hell genug, um auf der Erde bei Tageslicht beobachtet zu werden.

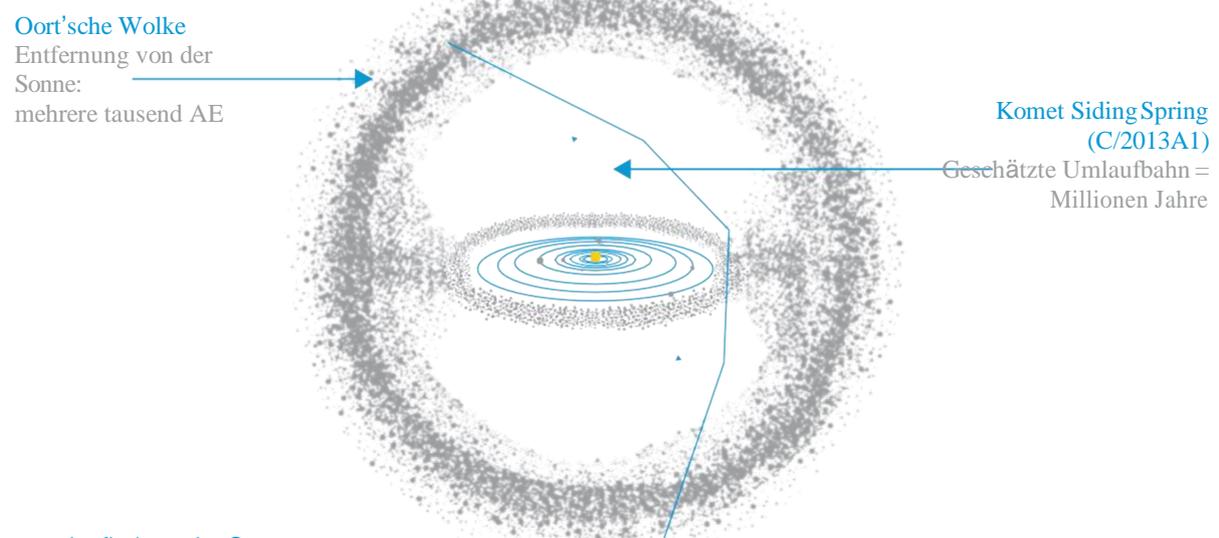
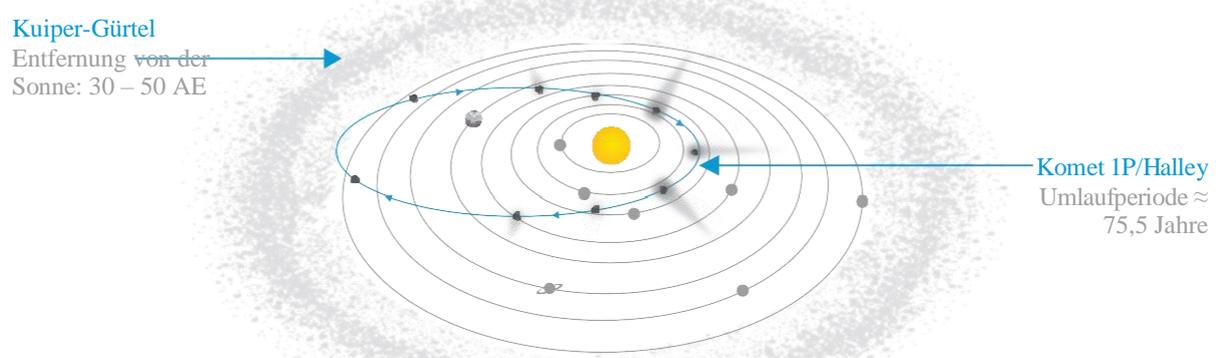
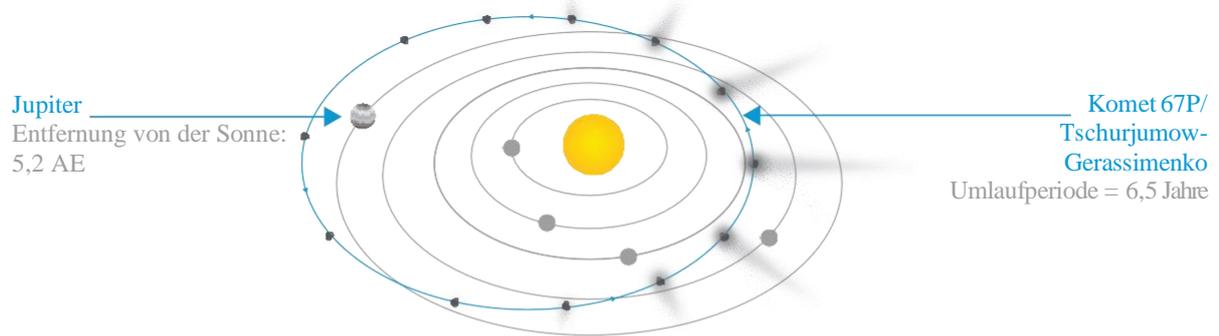
***Astronomische Einheit (AE)**: 1 AE ist die durchschnittliche Entfernung zwischen der Erde und der Sonne, bzw. der Orbitalradius der Erde, der ca. 150 Mio. km beträgt.

***Gravitationsstörungen**: Veränderungen der Umlaufbahn eines Himmelskörpers (z.B. Planet, Komet) aufgrund von Interaktionen mit den Gravitationsfeldern anderer Himmelskörper (z.B. Riesenplaneten, andere Sterne).

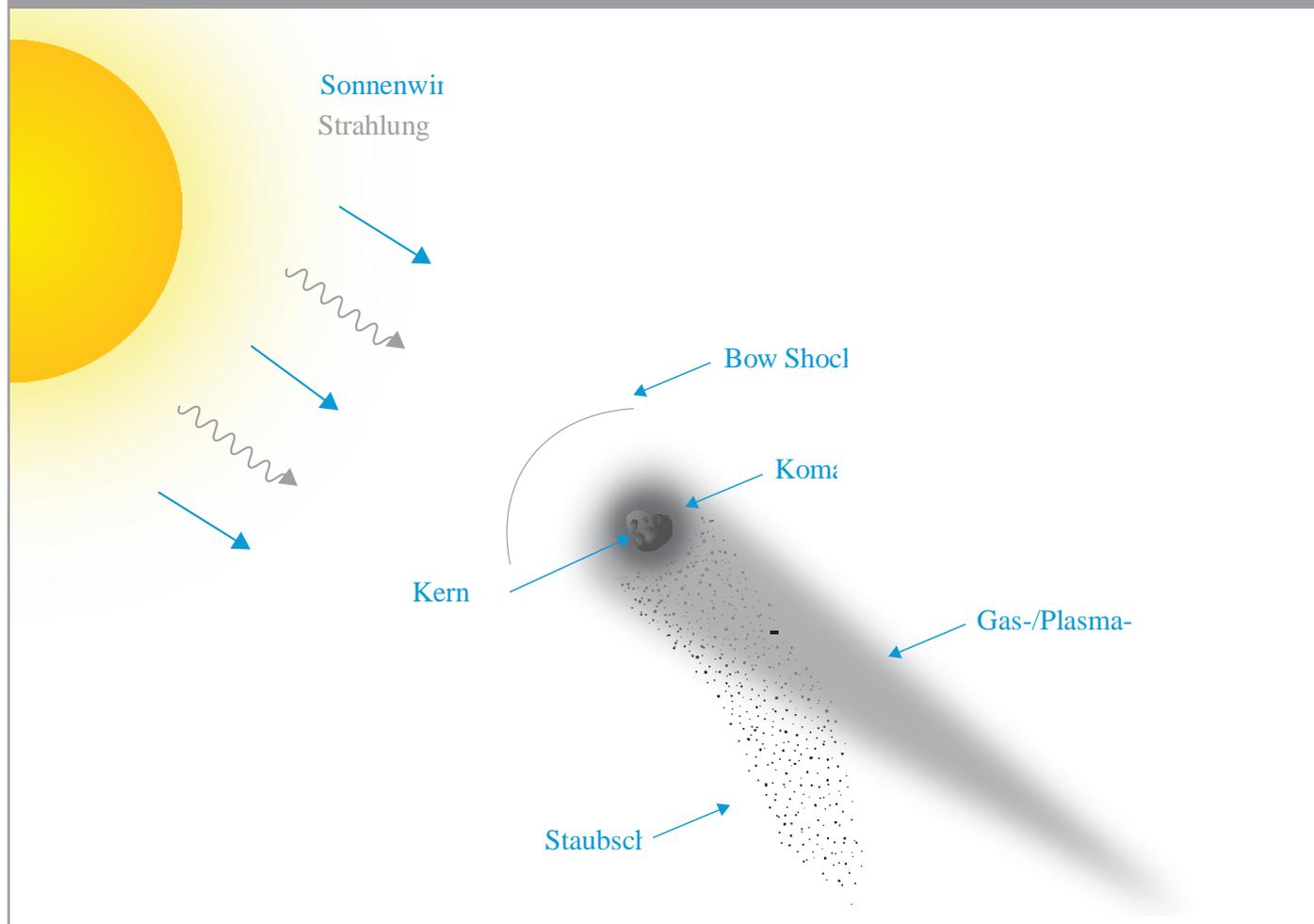
***Sonnenwind**: Ein Strom energiereicher Teilchen (Plasma), der von der oberen Atmosphäre der Sonne in alle Richtungen ausgestrahlt wird. Er enthält zum größten Teil Elektronen und Protonen.

***Sublimieren (Sublimation)**: Beim Erwärmen geht ein Stoff direkt von der festen Phase unter Umgehung der Flüssigphase in die Gasphase über. Wenn das Gas wieder abkühlt, bildet es normalerweise eine feste Ablagerung.

***Umlaufperiode**: Die zur Vollendung einer Umlaufbahn erforderliche Zeit.



↑ Kometenumlaufbahnen im Sonnensystem.



↑ Die Anatomie eines Kometen.

Nicht alle Kometenschweife sind so spektakulär wie die in Abbildung 1, oder gar von der Erde aus sichtbar. Wie spektakulär der Schweif aussieht, richtet sich nach der Größe des Kerns, dessen Bestandteilen, wie nahe er der Sonne kommt und wie oft sich der Komet zuvor der Sonne näherte. Sobald der Komet seinen sonnennächsten Punkt (**Perihel***) verlassen hat, zieht er sich wieder in die kälteren Regionen des Sonnensystems zurück, wobei er dauerhaft einen Teil seiner Masse verloren hat.

Kometen haben elliptische Umlaufbahnen mit der Sonne in einem Mittelpunkt (Abbildung 2) und sind deshalb nur für einen kurzen Zeitraum sichtbar, wenn sie sich dem Perihel nähern. Für Kometen in hoch-elliptischen Umlaufbahnen ist dies nur ein winziger Anteil der Zeit, die sie benötigen, um eine Umkreisung der Sonne zu vollenden. Den größten Teil ihrer Existenz verbringen sie damit, sich langsam von der Sonne zu dem **Aphel*** zu bewegen und dann aufgrund der Schwerkraft der Sonne wieder zu dem Perihel zu beschleunigen.

Zu weiteren Informationen über elliptische Umlaufbahnen und die Umlaufbahnen von Kometen wird auf ESA teach with space - Marble-ous ellipses | P02 Ressource für die Schulklasse verwiesen (siehe Abschnitt Links).

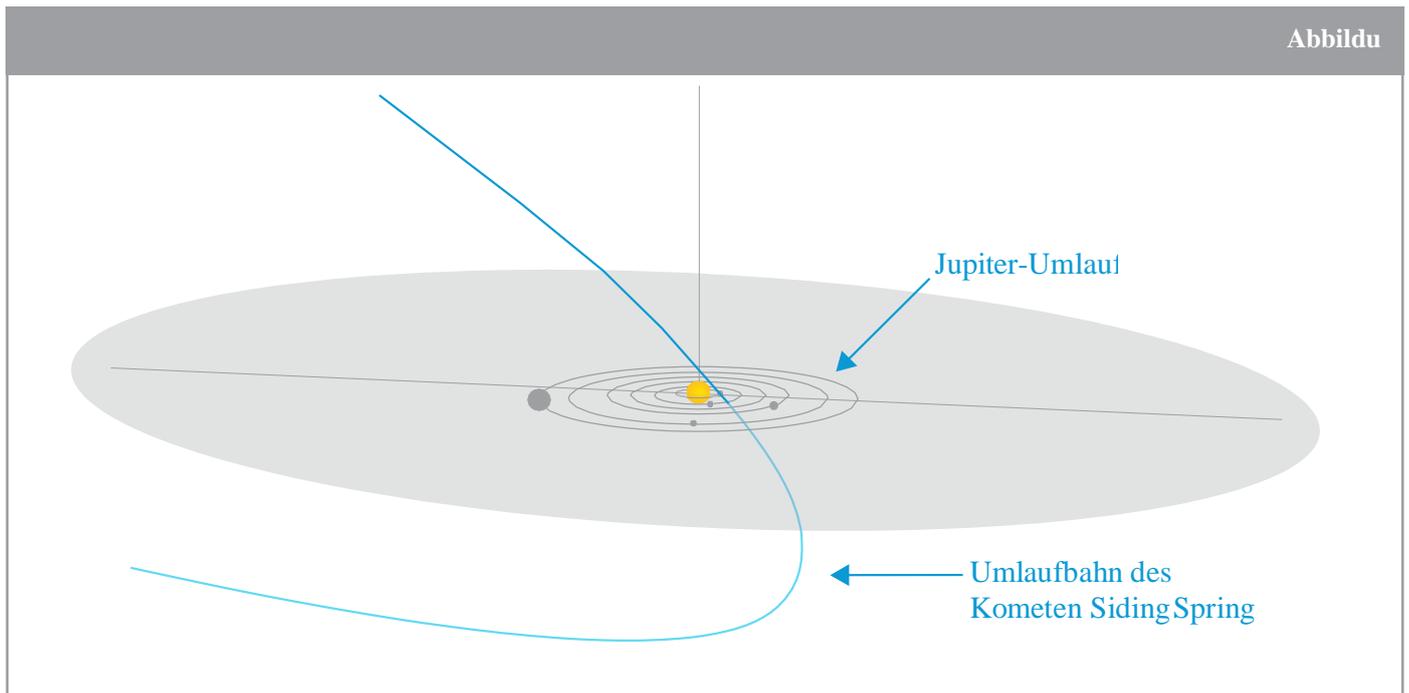
***Aphel**: Sonnenfernster Punkt in einer Umlaufbahn.

***Bow Shock (Komet)**: Fläche der Interaktion zwischen den Ionen der Kometen-Koma und dem Sonnenwind. Der Bow Shock entsteht dadurch, dass die relative Umlaufgeschwindigkeit des Kometen und der Sonnenwind im Überschallbereich liegen. Der Bow Shock bildet sich vor dem Kometen in der Strömungsrichtung des Sonnenwindes. Im Bow Shock entstehen große Mengen von Kometen-Ionen und laden das solare Magnetfeld mit Plasma auf. Dies hat zur Folge, dass sich die Feldlinien um den Kometen krümmen, wodurch die Kometen-Ionen entstehen und den Schweif aus Gas, Plasma und Ionen bilden.

***Perihel**: Sonnennächster Punkt in einer Umlaufbahn.

Einschläge im Sonnensystem

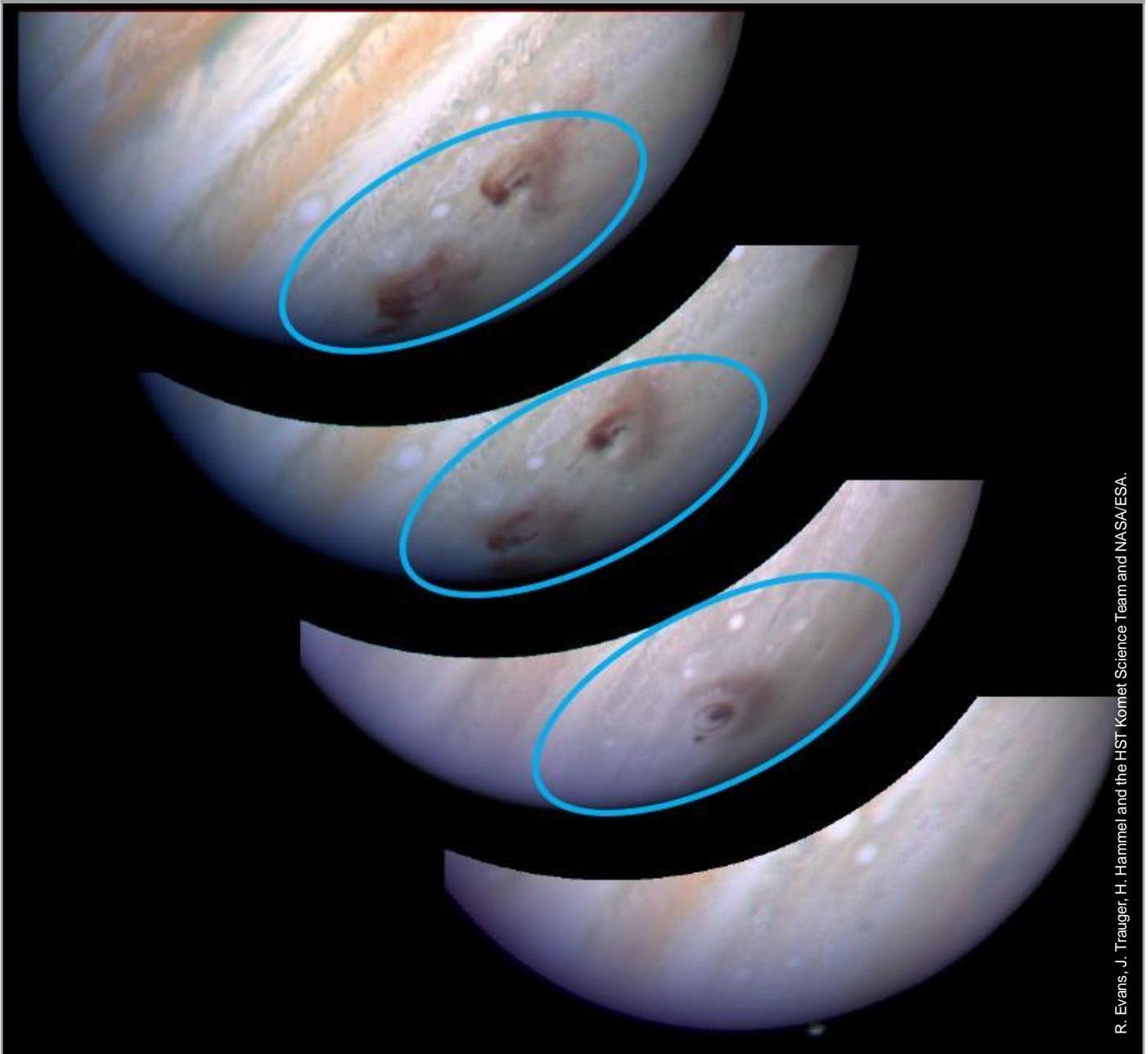
Abbildung 2 zeigt die Umlaufbahnen dreier verschiedener Kometen, die alle die Umlaufbahnen der Planeten zu kreuzen scheinen, was vermuten lässt, dass Kollisionen zwischen Kometen oder Asteroiden und Planeten unvermeidlich sind. Allerdings können die Umlaufbahnen von Kometen, die von der Oort'schen Wolke unterwegs sind, gegenüber der Sonnensystemebene (der Ekliptik) stark geneigt sein. Deshalb sind aufgrund der Perspektive viele der Bahnen, die die Planetenbahnen scheinbar direkt kreuzen, irreführend. So hat beispielsweise die Bahn des Kometen Siding Spring (C/2013 A1) während ihrer Annäherung an das Perihel im Jahr 2014 eine starke Neigung zur Bahnebene der Erde auf (Abbildung 4).



↑ Bahn des Kometen Siding Spring (C/2013 A1) durch das Sonnensystem.

Gleichwohl gibt es schlagende Beweise dafür, dass Planeten regelmäßig (im geologischen Zeitmaßstab) von Kometen und Asteroiden getroffen werden. Durch Einschlagsprozesse entstanden die meisten Krater, die auf den Oberflächen von Monden und Planeten im gesamten Sonnensystem zu beobachten sind. Zwar ereignete sich die höchste Einschlagshäufigkeit in der Frühgeschichte des Sonnensystems (Großes Bombardement), doch auch derzeit kommt es immer wieder zu Einschlägen.

1994 schlugen zahlreiche Fragmente des Kometen Shoemaker-Levy 9 (D/1993 F2) auf der Jupiter-Oberfläche ein. Die größte beobachtete Einschlagsspur wies einen Durchmesser von Tausenden Kilometern auf. Diese wurde durch das G-Fragment des Kometen verursacht, das nur wenige Kilometer groß war. Die Auswirkungen dieses Einschlags auf die Jupiter-Atmosphäre zeigt Abbildung 5, eine Zeitraffer-Montage von Bildern des Weltraumteleskops Hubble.



R. Evans, J. Trauger, H. Hammel and the HST Komet Science Team and NASA/ESA.

↑ Dieses Mosaik von Bildern zeigt die Entwicklung der Stelle des G-Einschlags auf Jupiter (durch die blaue Ellipse hervorgehoben).

Asteroiden

Kometen sind nicht die einzigen Objekte, die die Erde und andere Körper des Sonnensystems treffen. Asteroiden, die zum großen Teil aus dem Asteroiden-Gürtel zwischen Mars und Jupiter (Abbildung 6) stammen, sind große felsige oder metallische Objekte. Insgesamt entstanden die Asteroiden sehr viel näher an der Sonne und enthalten deshalb weniger leichte Elemente als Kometen. Bei der Zusammensetzung von Asteroiden überwiegen Metalle, Metalloxide, Mineralien und Silikate. Bei Kometen ermöglichen die größeren Mengen leichter Elemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel die Bildung bestimmter Verbindungen wie beispielsweise Wasser, Methan und Kohlendioxid.

Die größten bekannten Asteroiden sind Vesta und Pallas, deren Durchmesser über 500 km beträgt. Abbildung 7 zeigt einen Größenvergleich einiger Asteroiden und Kometen. Die unregelmäßigen Asteroiden in Abbildung 7 sind zwar viel kleiner als Vesta und Pallas, doch viele sind beträchtlich größer als die abgebildeten Kometenkerne.

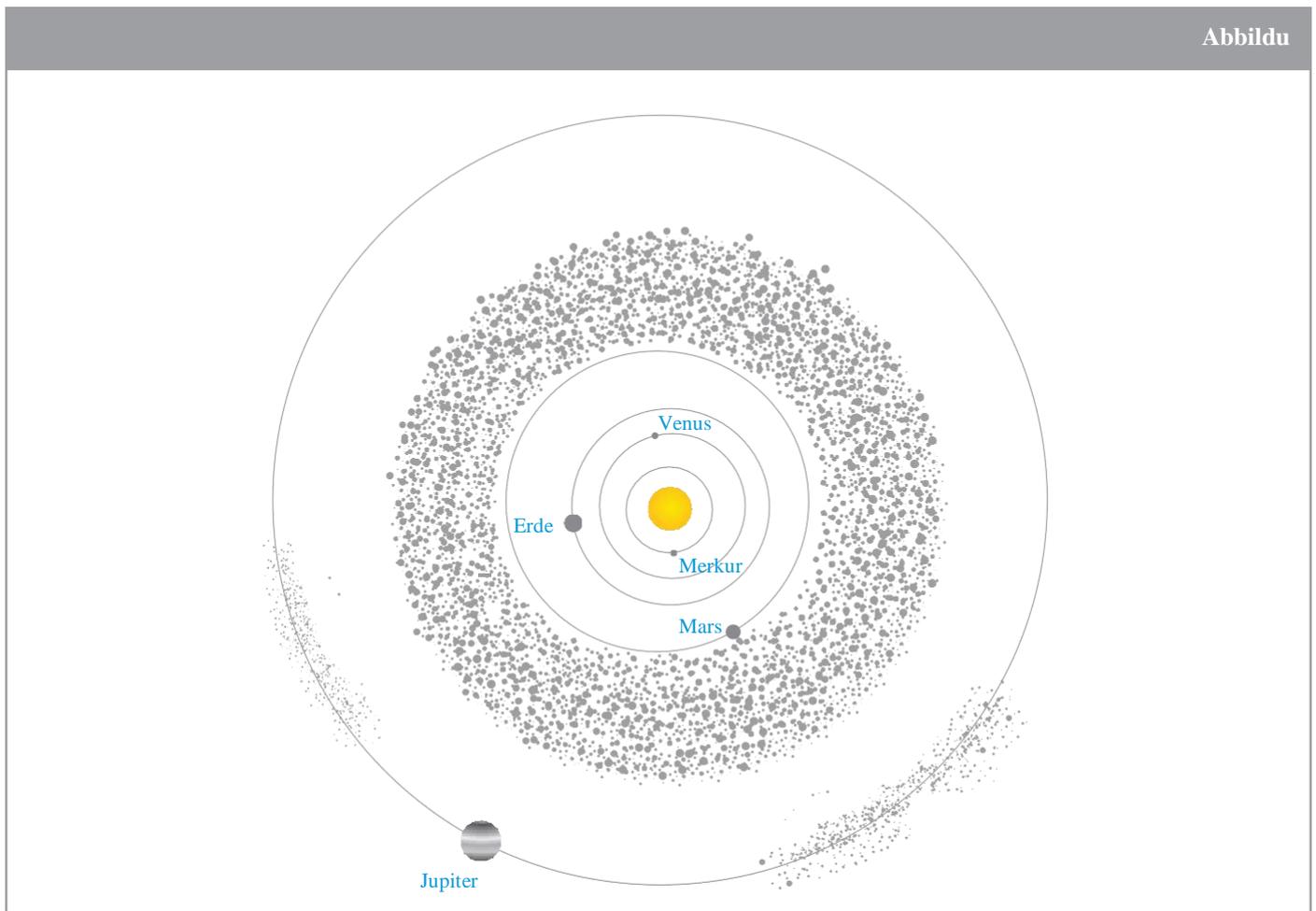


Abbildung 6

↑ Diagramm der Asteroidenverteilung im Sonnensystem. Die meisten Asteroiden befinden sich im Hauptgürtel zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter. Andere große Asteroidengruppen sind die Jupiter-Trojaner, die die stabilen **Lagrange-Punkte***, L4 und L5, auf der Umlaufbahn des Jupiters belegen.

***Lagrange-Punkte:** In jeder Orbitalkonfiguration gibt es fünf Punkte, an denen ein nur durch die Schwerkraft beeinflusstes Objekt eine stabile Umlaufbahn einnehmen kann. Zu weiteren Informationen siehe ESA teach with space - gravity wells video | VP04 (siehe Abschnitt Links).

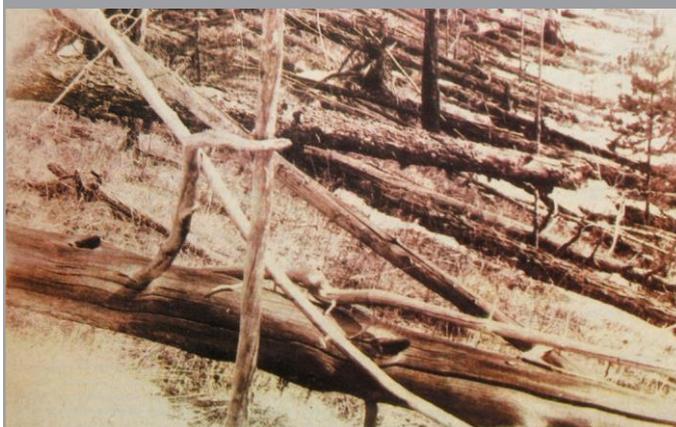


↑ Linkes Bild: Meteor-Krater, Arizona, USA. Rechtes Bild: Meteor-Krater, aufgenommen von der Internationalen Raumstation.

Der Meteor-Krater entstand vor ungefähr 50.000 Jahren durch einen Nickel-Eisen-Asteroid, der in die Ebenen von Arizona, USA einschlug. Dieser Einschlag bildete einen Krater von fast 200 m Tiefe und 1,5 km Durchmesser. Fragmente des ursprünglichen Einschlagskörpers verstreuten sich auf die umliegende Landschaft.

1908 explodierte ein Asteroid oder Komet von vermutlich über 50 m Durchmesser in einer Höhe von 5 bis 10 km über einem abgelegenen Waldgebiet in der Nähe des Flusses Tunguska in der heutigen Region Krasnojarsk, Russland. Da der Asteroid oder Komet vermutlich nicht auf der Erdoberfläche einschlug, machte die Stärke der Explosion ein Waldgebiet von über 2.000 km² (Abbildung 9) dem Erdboden gleich.

Abbildung 9



↑ Bei der Tunguska-Explosionsdruckwelle umgeknickte Bäume.

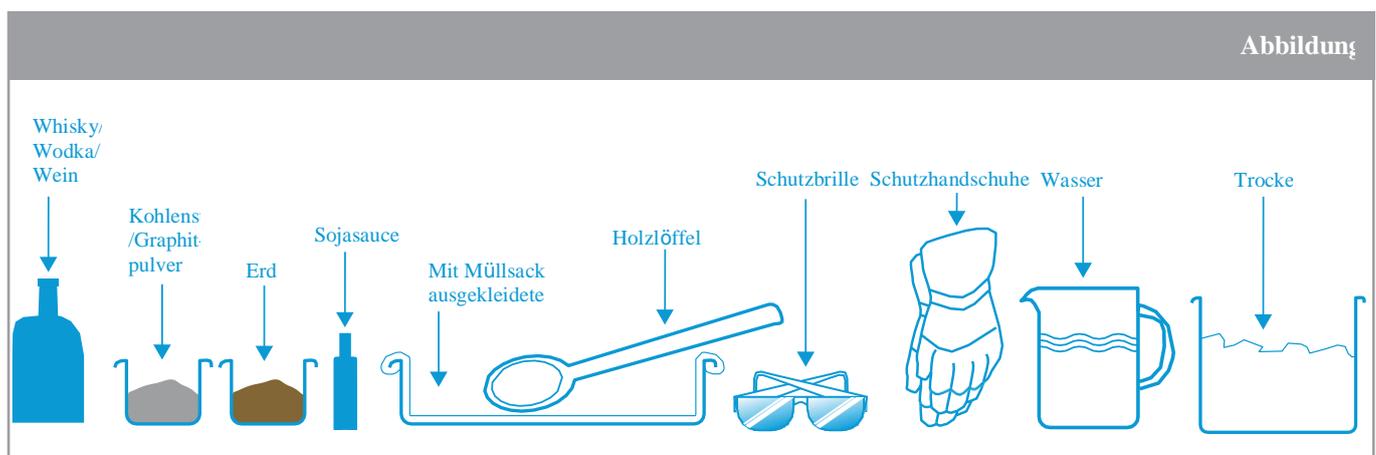
Wir backen uns einen Kometen

Bei dieser Demonstration simulieren die Lehrer einen Kometenkern im Klassenzimmer. Die verwendeten Zutaten entsprechen genau dem Material, das in einem echten Kometenkern anzutreffen ist.

Bei einer Schülerversion dieser Aufgabe werden kleinere Mengen in Plastikbechern verwendet. Es kommt darauf an, dass die Schüler genaue Anweisungen zu den Gefahren erhalten und die Richtlinien für Sicherheit und Gesundheitsschutz einhalten. Die Anweisungen für die Schüler sind im Arbeitsblatt für Schüler nach der Aufgabe enthalten.

Versuchsmaterial

- Trockeneis (etwa 0,75 l, die kleinstmöglichen Pellets)
- Wasser (etwa 0,75 l)
- Große Müllsäcke
- 10 Esslöffel (4 sehr große Holzlöffel) Erde (darauf achten, dass die Erde nicht klumpt, sondern eine regelmäßige Konsistenz aufweist)
- 1 Esslöffel Kohlenstaub oder Kohle in Pulverform oder Graphitpulver
- 2-3 Esslöffel Whisky, Wodka oder Rotwein (Methanol-/Ethanol-Komponente)
- Einige Tropfen Sojasauce (organische Komponente)
- Einige Tropfen eines Reinigungsmittels (Ammoniak-Komponente)
- Große Plastikschüssel
- Eimer für Abfall
- Holzlöffel
- Klare Scheibe aus Sicherheitsglas
- Polystyrolbehälter für Trockeneis
- Wärmeschutzhandschuhe
- Schutzbrillen für alle Teilnehmer und Vorführenden
- Labor-Schutzkittel für den Vorführenden (optional)
- Messbecher



↑ Versuchsanordnung.

Sicherheit und Gesundheitsschutz

- Beim Umgang mit Trockeneis immer Schutzhandschuhe und Schutzbrille tragen. Das Trockeneis nicht berühren, verschlucken oder probieren. Vermitteln Sie den Schülern klare Anweisungen zu den Gefahren und dem Abstand, den sie zu der Demonstration einzuhalten haben, da der Komet „spucken“ kann.
- Das Trockeneis nicht in einem Behälter verschließen, da es dadurch zu einer explosiven Ausgasung kommen kann!
- Den Kometen draußen in einem gut belüfteten Bereich ablegen, zu dem die Schüler keinen Zugang haben.
- Trockeneis niemals im Haushalts-Kühlschrank lagern.
- Den Versuch in einem gut belüfteten Bereich durchführen.

Anweisungen

Bitte das Begleitvideo: [Teach with space – cooking a Komet | VC03](#) hinzuziehen.

1. Die Schüssel mit einem Müllsack auskleiden. Wir schlagen vor, die Schüssel in den Müllsack zu setzen und sie mit der oberen Schicht auszukleiden. Dies erleichtert die anschließende Entsorgung des Kometen. Darauf achten, dass der Sack im Inneren der Schüssel glatt anliegt.
2. Die nachstehenden Zutaten hinzufügen: Wasser, Erde, Kohlenstaub, Wein bzw. Alkohol, Reinigungsmittel und Sojasauce. Diese stellen einige der Verbindungen eines echten Kometen dar. Freiwillige unter den Teilnehmern können sich daran beteiligen, indem sie einige der Zutaten hinzufügen. Mit dem Holzlöffel gut vermischen.
3. Das Trockeneis zu dem Gemisch hinzufügen. Das Gemisch mit dem Holzlöffel umrühren. Zweckmäßigerweise sollte ein Assistent die Schüssel während des Mischvorgangs schräg halten. Dann mit den Schutzhandschuhen den Kometen etwa 30 Sekunden lang zu einem Klumpen formen. Haftet der Komet nicht leicht zusammen, etwas Wasser hinzugeben. Den Kometen nicht zu stark zusammendrücken, da er auseinanderbrechen kann.
4. Nach Abschluss der Demonstration den Kometen in die Schüssel legen und die Schüssel vorsichtig von dem Müllsack zurückziehen, so dass der Komet darin eingeschlossen ist. Den Müllsack in den Eimer legen. Darauf achten, dass der Müllsack noch offen ist, damit Gase entweichen können. Den Kern in einem abgesperrten Außenbereich entsorgen. Das Trockeneis im Kern dürfte innerhalb von 24 Stunden sublimieren.

Hinweis: Wird der Versuch am Vormittag durchgeführt, können die Schüler nachmittags herausfinden, wie sich der Komet entwickelt hat.

Praxis erzeugt bessere Kometen! Zur Erzielung optimaler Ergebnisse ist es zweckmäßig, den Versuch mehrmals auszuprobieren, bevor er mit den Schülern durchgeführt wird.

Diskussion

Wie entsprechen die Zutaten dem, was wir in echten Kometenkernen finden? Wie wirkt sich das auf das Leben auf unserem Planeten aus?

Die ersten spektroskopischen Beobachtungen von Kometen fanden zu Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts statt. Mit der Spektroskopie konnten die Astronomen zunächst die chemische Zusammensetzung von Komas der Kometen aufdecken. Bei diesen frühen Beobachtungen wurden zweiatomiger Kohlenstoff, Natriumionen und eine Vielzahl von Molekülen auf Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffbasis ermittelt.

1950 schlug der US-amerikanische Astronom Fred Whipple ein neues Modell zur Beschreibung eines Kometenkerns vor. Whipples Modell eines „schmutzigen Schneeballs“ deutete darauf hin, dass Kometen über einen Eiskern verfügen, der aus Spuren von Staub, Gestein und meist gefrorenen flüchtigen Bestandteilen wie **Wasser, Kohlendioxid, Methan und Ammoniak** besteht. Später bestätigten Beobachtungen von der Erde und aus dem Weltraum Whipples Modell, obwohl einige kleinere Änderungen erforderlich waren, da die Beobachtungen zeigten, dass die Kometenkerne größer und dunkler waren als in dem Modell beschrieben.

Eine vor kurzem durchgeführte Untersuchung des Kometen 103P/Hartley ergab, dass dessen **Wassergehalt** dasselbe Isotopenverhältnis von Deuterium zu Wasserstoff (schweres Wasser) aufweist wie die Weltmeere. Dies war eine sehr bedeutsame Entdeckung. Wasser ist ein Schlüssel-molekül für das Leben, wie wir es kennen. Es ist ein universelles Lösungsmittel, das die Lösung verschiedener chemischer Bestandteile darin ermöglicht. Nach Auffassung von Wissenschaftlern ist das Wasser der Schlüssel für die Entwicklung des Lebens. Kometeneinschläge in der frühen Erdgeschichte waren möglicherweise eine Hauptquelle des ursprünglichen Wasservorkommens der Erde.

Der **Kohlenstoffgehalt** von Kometen ist sehr hoch, weil alles Leben, wie wir es kennen, auf Kohlenstoff beruht. Diese Schlüsselzutat für das Leben auf der Erde könnte von Kometeneinschlägen herrühren.

Die **Sojasauce** stellt die in Kometen vorhandenen Aminosäuren und Aminosäure-Vorläufer dar. 2004 wurden auf der Stardust-Mission der NASA Proben aus dem Staub in der Koma des Kometen 81P/Wild gesammelt und zur Erde zurückgebracht. Die Analyse dieses Staubs bestätigte das Vorhandensein von Glycin, der einfachsten Aminosäure. Dies war von herausragender Bedeutung. Aminosäuren sind die Bausteine für Proteine. Als solche stellen sie einen wichtigen Baustein für das Leben selbst dar. Das Auffinden dieser biologischen Moleküle (chemische Formel $C_2H_5NO_2$) auf einem Himmelskörper, der nicht die Erde ist, könnte ein Anhaltspunkt für Wissenschaftler sein, dass möglicherweise einige der Zutaten für das Leben auf unserem Planeten durch Kometeneinschläge vor Milliarden Jahren dahin gelangten.

Zusätzlich zu dem bei der Demonstration verwendeten **Kohlendioxid** (Trockeneis) wurden in der Koma von Kometen mittels Spektroskopie weitere Gase entdeckt. Hierzu gehören (jedoch nicht ausschließlich) die in Tabelle 1 angegebenen Gase.

Tabelle A1	
C_2H_4	Ethylen
NH_3	Ammoniak
CH_4	Methan
C_2H_6	Ethan
$C_2H_5NH_2$	Ethylamin
O_2	Sauerstoff
CH_3OH	Methanol
NH_2CH_2OH	Aminomethanol
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
H_2	Wasserstoff
CH_3COOH	Essigsäure
CH_3NH_2	Methylamin
C_2H_2	Acetylen
HCN	Hydrogencyanid

↑ In den Kometenkernen gefundene Gase.

Was ist Trockeneis?

Trockeneis ist gefrorenes Kohlendioxid - CO_2 , das unter normalen Temperatur- und Druckbedingungen ein Gas ist.

Verantwortlich für die Entstehung der Koma eines Kometen ist der Sublimationsprozess, bei dem sich Kohlendioxid direkt von einem Feststoff in ein Gas verwandelt. Der umgekehrte Prozess heißt Desublimation oder Deposition. Bei normalem Luftdruck verwandelt sich Kohlendioxid direkt von einem Gas in einen Feststoff, wobei sich Trockeneis bei $-78^\circ C$ bildet.

Was sind die weißen Schwaden bzw. Rauche, die bei der Demonstration zu sehen sind?

Da die Temperatur des bei der Demonstration verwendeten Trockeneises über $-78^\circ C$ steigt, sublimiert es zu einem kalten Gas. Dies bewirkt die Abkühlung des in der Umgebungsluft vorhandenen Wasserdampfs, der zu den beobachteten weißen Schwaden kondensiert.

Was verursacht die bei der Demonstration zu beobachtende explosive Ausgasung?

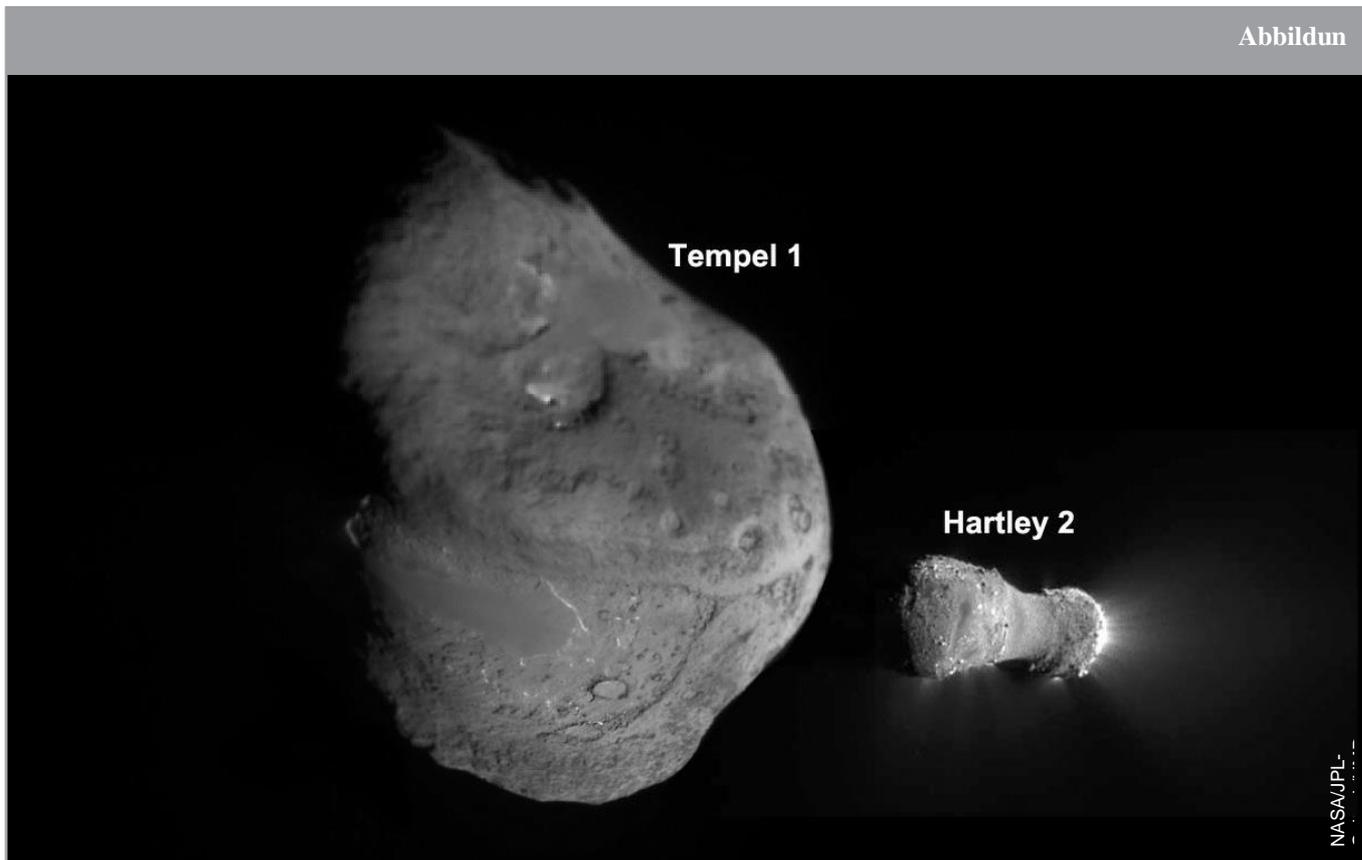
Bei dieser Aufgabe haben wir es bei der Entstehung des analogen Kometenkerns mit zwei konkurrierenden Faktoren zu tun. Flüssiges Wasser gerät in thermischen Kontakt mit Trockeneis, das eine Temperatur von unter $-78^\circ C$ aufweist – das flüssige Wasser gefriert und bildet um das Trockeneis einen „Eiskäfig“. Da sich das Trockeneis mit Material über $-78^\circ C$ in thermischem Kontakt befindet, beginnt es zu sublimieren. Die Verwandlung beim Trockeneis vom Festkörper zur Gasphase resultiert in einer Volumenänderung von mehr als dem 600-Fachen. Dies bedeutet, dass Trockeneis-Sublimationsnester gelegentlich explosiv durch die Wassereiskruste des Kerns ausgasen. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, einen Labor-Schutzkittel sowie Schutzhandschuhe und eine Schutzbrille zu tragen.

Welche Form und Größe weisen die Kometenkerne auf?

Durch zahlreiche **Vorbeiflüge*** wurde eine Vielzahl von Formen und Größen der Kometenkerne bestätigt. Zu diesen Missionen gehören Giotto (ESA – Komet 1P/Halley und Komet 26P/Grigg-Skjellerup), Stardust (NASA – Komet 81/PWild und Komet 9P/Tempel), Deep Impact (NASA – Komet 9P/Tempel und Komet 103P/Hartley) sowie Rosetta (ESA – Komet 67P/ Tschurjumow-Gerassimenko). Im maßstabsgerechten Bild in Abbildung A2 beträgt die Längsachse des Kerns des Kometen 103P/Hartley etwa 2,2 km, und die weiteste Ausdehnung des Kerns des Kometen 9P/Tempel etwa 7,6 km. Durch vorherige Messungen während der ESA-Mission Rosetta bei deren Ankunft beim Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko wurde dessen längste Ausdehnung mit 4,1 km bestätigt.

* **Vorbeiflug:** Nahe Passage einer Raumsonde bei einem Planeten oder anderem Himmelskörper. Benutzt die Raumsonde das Gravitationsfeld des Planeten zur Steigerung ihrer Geschwindigkeit oder zur Änderung ihrer Flugbahn, heißt dies Swing-by oder Schuberrhöhungsmanöver.

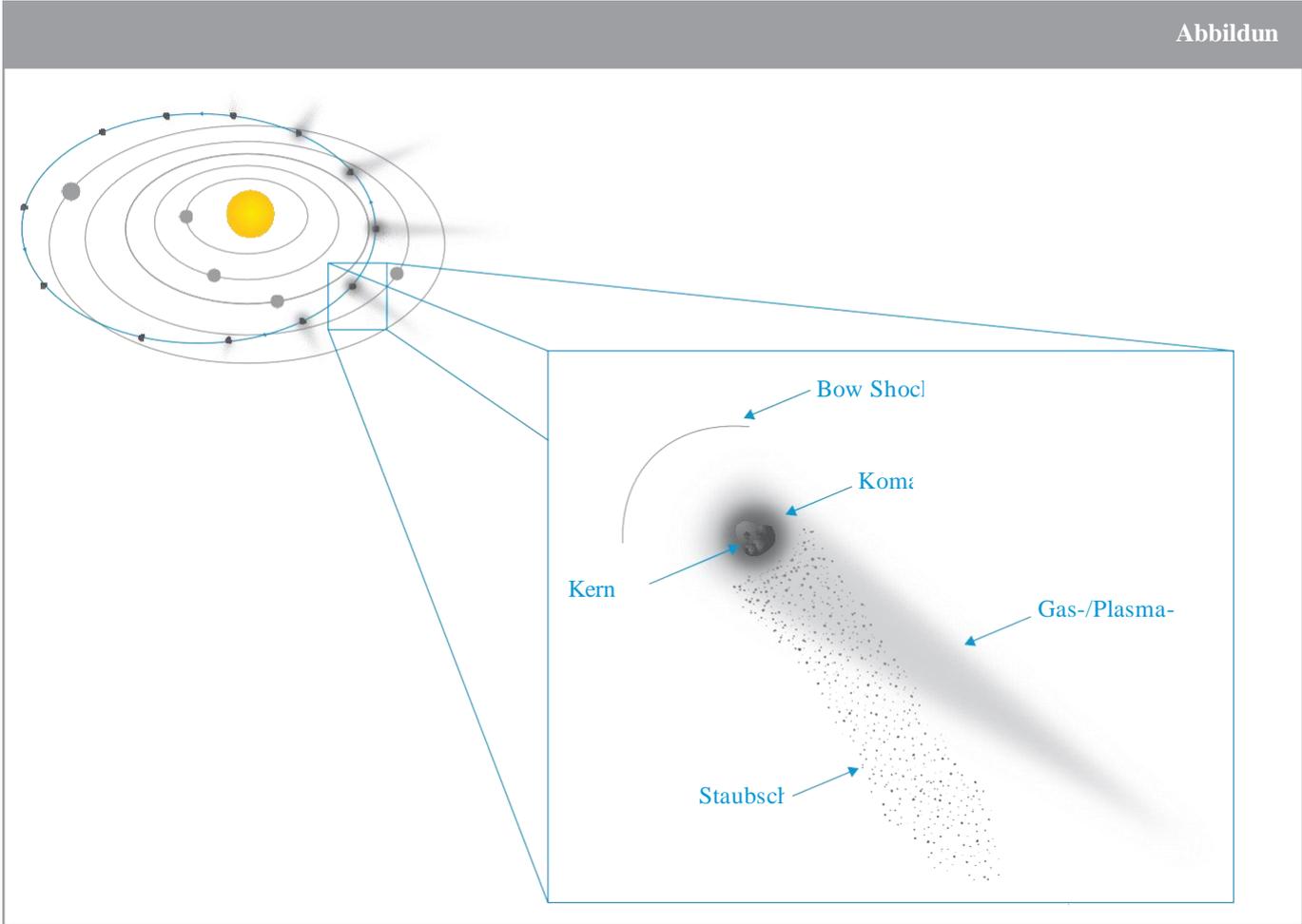
Die Montage in Abbildung 7 zeigt mehrere abgebildete Kometenkerne im Vergleich zu Bildern, die bei Vorbeiflügen verschiedener Raumsonden (bis zum Jahr 2010) von Asteroiden und mehreren Monden des Sonnensystems aufgenommen wurden. Kometenkerne sind in der rechten unteren Ecke von Abbildung 7. abgebildet.



↑ Größenvergleich der Kerne der Kometen 9P/Tempel und 103P/Hartley.

Warum haben einige Kometenschweife so verschiedene Formen?

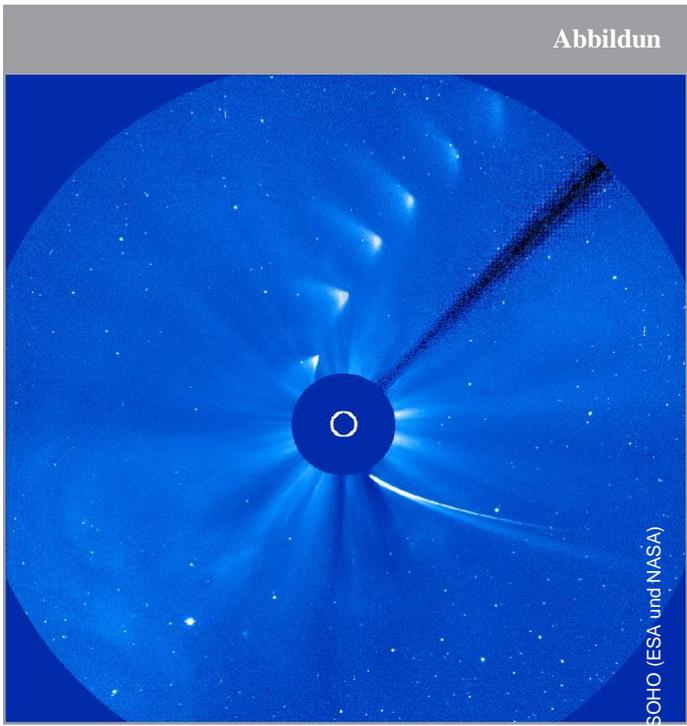
Die Form und das Aussehen der Kometenschweife sind durch die Interaktion von Sonnenwind und Sonnenstrahlung mit dem vom Kern ausgestoßenen Material bedingt. Es sind oft zwei Schweife zu sehen, die in verschiedene Richtungen weisen. Einer weist stets direkt von der Sonne weg. Dies ist der Plasma- oder Ionenschweif. Ultraviolettes Licht von der Sonne ionisiert die Gase in der Koma. Diese ionisierten Teilchen werden dann durch den Sonnenwind vom Kometen weggerissen. Der andere Schweif ist der Staubschweif, der durch den Druck der Sonnenstrahlung entsteht, der die kleinen Feststoffteilchen in der Koma von der Sonne wegstößt. Der Staubschweif krümmt sich leicht bzw. bildet einen Bogen in der Richtung, aus der der Komet kommt (Abbildung A3). Da das Maß der Sonnenaktivität, der Kerndrehung und die Ausgasungsgeschwindigkeiten von Komet zu Komet erheblich variieren, lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Schweifformen beobachten.



↑ Ein Diagramm mit den beiden Schweif eines Kometen und ihrer unterschiedlichen Form bei dessen Umkreisung der Sonne.

Wie lange hält ein Kometenkern?

Bei jeder Passage durch das Perihel verlieren Kometen flüchtige Bestandteile (beispielsweise Kohlendioxid und Wasser) und Staub, wobei sie Trümmerspuren zurücklassen. Das bedeutet, dass ein bestimmter Kern eine endliche Zahl von Perihel-Passagen haben kann, bevor alle seine flüchtigen Bestandteile abgebaut sind. Ein Beispiel dafür war Komet 2012/S1 ISON, ein sonnennaher Komet, der 2013 seine erste Annäherung an das Perihel machte (Abbildung A4). Es sah so aus, als ob der Komet 2012/S1 ISON seine Gas- und Staubproduktion einstellte, kurz bevor er an der Sonne vorbeiflog.



↑ Der Komet ISON streift die Sonne; aufgenommen von dem ESA-/NASA-Satelliten SOHO am 28.-30. November 2013.

Wodurch könnte sich die Flugbahn eines Kometen bei der nächstliegenden Annäherung an die Sonne ändern?

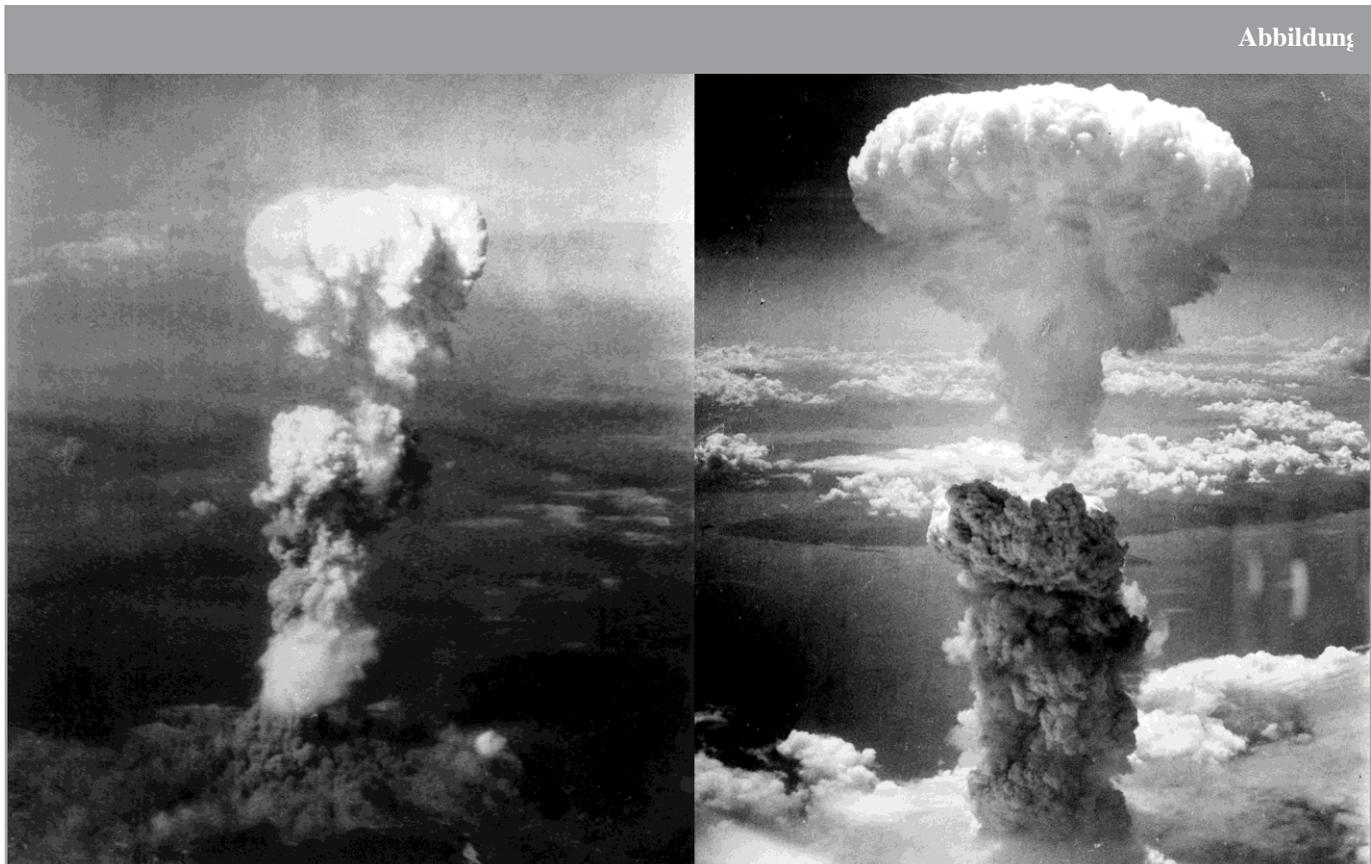
Wenn sich die flüchtigen Bestandteile in einem Kometenkern (wie Kohlendioxid und Wasser) bei Annäherung an die Sonne allmählich erwärmen, kann das Ausgasen einen Rückstoßeffekt erzeugen. Wird Gas ausgestoßen, übt es eine gleichgroße und entgegengerichtete Kraft (Drittes Newton'sches Gesetz) auf den Kometen aus, und verleiht ihm dadurch einen ganz leichten Schub. Dies kann sich so auswirken, dass sich die Flugbahn des Kometen geringfügig, und auch dessen Umlaufperiode um die Sonne ändern, da der Kern von seiner vorgesehenen Umlaufbahn abgelenkt wird. Da sich die meisten Kerne auch in einem Zustand des Trudeln (möglicherweise um mehrere Achsen, so dass sie nach vorn und zur Seite taumeln) befinden, können die Abweichungen von Komet zu Komet erheblich variieren.

Weiterführende Diskussion – können Kometen oder Asteroiden die Erde treffen?

Anhand der Erkenntnisse aus Kernexplosionen, die seit 1945 von verschiedenen Nationen durchgeführt wurden, und der Gleichung der kinetischen Energie lässt sich eine gute Annäherung der Größe des Einschlagskörpers herstellen, der den Meteor-Krater hervorbrachte.

Die Energie von Kernwaffen wird in Kilotonnen (kt) gemessen – wobei 1 kt der Energieausbeute von 1.000 Tonnen TNT entspricht. $1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$.

Die Atombomben von Hiroshima und Nagasaki (Abbildung A5) hatten jeweils eine Energieausbeute von etwa 20 kt.



↑ Linkes Bild: Rauchschwaden über Hiroshima von der ersten Atombombe. Rechtes Bild: die atomare Bombardierung von Nagasaki.

Um einen Krater von der Größe des Meteor-Kraters in der Art des Gesteins, das in dem Gebiet gefunden wurde, zu erzeugen, benötigte man etwa 2,5 Mt (2.500 kt) oder etwa 125 Hiroshima-Bomben. Ein mathematisches bzw. Computer-Simulationsmodell lässt vermuten, dass der Einschlagskörper die Erde mit einer Geschwindigkeit von etwa $12,8 \text{ km s}^{-1}$ traf. Diese Information reicht aus, um eine ungefähre Größe des Einschlagskörpers zu berechnen.

In der Umgebung des Meteor-Kraters liegen viele Fragmente des Einschlagskörpers verstreut. Aus der Analyse dieser Fragmente ergibt sich, dass der Einschlagskörper zu 92 % aus Eisen und zu 7 % aus Nickel bestand (die übrigen 1 % enthielten Silikateinschlüsse und andere Spurenelemente). Der Einschlagskörper hatte eine mittlere Dichte von etwa 7.000 kg m^{-3} .

Anhand dieser Informationen lassen sich die nachstehenden Berechnungen unter der Annahme anstellen, dass die gesamte kinetische Energie des Einschlagskörpers in Detonationsenergie zur Bildung des Kraters umgewandelt wurde:

1. Zusammenfassung der Parameter
Kinetische Energie, $E_K = 2.500 \text{ kt}$
Eintrittsgeschwindigkeit = $12,8 \text{ km s}^{-1}$
 $1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$
Dichte von Eisenmeteorit, $\rho = 7.000 \text{ kg m}^{-3}$
2. Umwandlung der zur Ausformung des Kraters erforderlichen Energie in Joule.
 $E_K = 2.500 \text{ kt} = 2.500 \times 4,2 \times 10^{12} \text{ J} = 1,05 \times 10^{16} \text{ J}$
3. Berechnung der Masse des Einschlagskörpers anhand der Gleichung der kinetischen Energie.
 $E_K = 1/2 mv^2$

Umstellung nach m:

$$m = (2E_K)/v^2 = (2 \times 1,05 \times 10^{16} \text{ J}) / (12.800 \text{ m s}^{-1})^2 = 128 \times 10^6 \text{ kg} = 128.000 \text{ t}$$

4. Berechnung des Volumens des Einschlagskörpers anhand der Dichtegleichung.
Da Masse = Dichte x Volumen
Volumen = Masse/Dichte = $(128 \times 10^6 \text{ kg}) / (7.000 \text{ kg m}^{-3}) = 1,83 \times 10^4 \text{ m}^3$
5. Berechnung des Halbmessers des Einschlagskörpers anhand der Kugelgleichung unter Annahme eines kugelförmigen Einschlagskörpers.
Alternativ kann der Einschlagskörper als ein Würfel modelliert werden.
Da das Volumen einer Kugel = $(4/3) \pi r^3$

Ergibt sich durch Umstellung

$$r^3 = (3 \times 1,83 \times 10^4 \text{ m}^3) / (4 \times \pi) = 4.371 \text{ m}$$

und somit $r = 16,4 \text{ m}$

Die Schüler können anschließend die Grenzen bzw. Unsicherheiten der bei der Modellrechnung getroffenen Annahmen untersuchen, wozu gehören:

- Annahme einer 100 %-igen Umwandlung der kinetischen Energie. Energie dürfte aber auch in anderen Formen wie Schall und Erwärmung der Atmosphäre verloren gehen.
- Die Unsicherheit bei der Einschlagsgeschwindigkeit. Dieser Wert ist ein von Beobachtungen eines alten Einschlagskraters abgeleiteter Wert und könnte deshalb ungenau sein, was zu einer unrichtigen Größenberechnung führt.
- Auswirkung des Auftreffwinkels. Die Menge Gestein, die verdampft bzw. herausgeschleudert würde, richtet sich nach dem Eintrittswinkel. Da viele der ursprünglichen Faktoren von diesem Nachweis abgeleitet sind, hat der Eintrittswinkel einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Das Experimentieren mit unterschiedlichen Eintrittswinkeln für denselben Einschlagskörper anhand des Einschlagssimulators Down2Earth (siehe unten und im Abschnitt Links) könnte dazu beitragen, diese Fragestellung weiter zu vertiefen.

Online-Einschlagsimulator – „Down2Earth“

Down2Earth (siehe Abschnitt Links) ist ein webbasierter Einschlagssimulator für Lernzwecke, womit die Schüler Parameter für einen Einschlag wie Zusammensetzung des Einschlagskörpers (Asteroid oder Komet), Eintrittswinkel, Größe, Art des Gesteins am Einschlagsort und den Einschlagsort selbst festlegen können. Die Schüler können die Auswirkung dieser Faktoren auf die Kratergröße vorhersagen und diese mit den Energieübertragungen während des Einschlags verknüpfen. Anschließend können die Schüler ihre Vorhersagen in einer virtuellen Umgebung überprüfen.

→ SCHLUSSFOLGERUNG

Kometen bieten einen aufschlussreichen Kontext zur Vermittlung vieler verschiedener Unterrichtsthemen von Gravitationsfeldern und Umlaufbahnen, kinetischer Energie und Energieübertragung bis hin zu Kometenspektroskopie und den Zutaten fürs Leben. Unsere Faszination für diese gefrorenen Welten bietet eine Fülle aufregender Lernchancen.

Wir backen uns einen Mini-Kometen

Bei dieser Aufgabe erstellt ihr ein Pendant zu einem Kometenkern anhand üblicher Zutaten, die die Hauptgruppen des in Kometenkernen gefundenen Materials darstellen. Einige der Materialien, wie Trockeneis, sind gefährlich – euer Lehrer gibt euch Anweisungen, wie sie zu verwenden sind.

Versuchsmaterial

- Trockeneis (etwa 100 ml)
- Wasser (etwa 100 ml)
- Kleine Müllsäcke
- 3 Teelöffel Erde
- 1 Teelöffel Kohlenstaub oder Kohle in Pulverform oder Graphitpulver
- 1 Teelöffel Whisky, Wodka oder Rotwein (Methanol-/Ethanol-Komponente)
- Einige Tropfen Sojasauce (organische Komponente)
- Ein Tropfen eines Reinigungsmittels (Ammoniak-Komponente)
- Einmal-Plastikbecher
- Eimer für Abfall
- Teelöffel
- Polystyrolbehälter für Trockeneis
- Wärmeschutzhandschuhe
- Schutzbrillen für alle Teilnehmer
- Labor-Schutzkittel

Anweisungen

1. Die nachstehenden Zutaten in einen ausgekleideten Einmal-Plastikbecher geben: Wasser, Erde, Kohlenstaub, Wein bzw. Alkohol, Reinigungsmittel und Sojasauce. Diese stellen einige der Verbindungen eines echten Kometen dar. Mit dem Teelöffel gut vermischen.
2. Das Trockeneis hinzufügen. Das Gemisch aus Wasser und Trockeneis umrühren. Dann mit den Schutzhandschuhen den Kometen etwa 30 Sekunden lang zu einem Klumpen formen. Den Kometen nicht zu stark zusammendrücken, da er auseinanderbrechen kann.
3. Nach Abschluss der Aufgabe den Kometen in den Müllsack und in den von eurem Lehrer bereitgestellten Eimer legen.

Berechnung von Masse, Geschwindigkeit und Energie eines Kometen

Anhand dieser Fragen untersucht ihr die Masse, die Geschwindigkeiten und die Energiemengen von Kometen anhand der Daten in nachstehender Tabelle.

Masse der Sonne	$m_{\text{Sonne}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
Dichte von Eis	$\rho = 1.000 \text{ kg m}^{-3}$
Gravitationskonstante	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Fragen

- Ein Komet hat eine kinetische Energie von $4,5 \times 10^{13} \text{ J}$. Er fliegt mit einer Geschwindigkeit von 34 km s^{-1} . Berechnet die Masse des Kometen.
- Ein großer Komet mit der Masse $5,2 \times 10^8 \text{ kg}$ hat eine Beinahekollision mit der Erde und streift die Atmosphäre. Zum Zeitpunkt der Messung betrug seine Geschwindigkeit $49,0 \text{ km s}^{-1}$.
 - Berechnet die kinetische Energie des Kometen (in J).
 - Wenn die bei der Explosion von 1 Kilotonne (1.000 Tonnen) TNT freigesetzte Energie $4,2 \times 10^{12} \text{ J}$ beträgt, wie viele Kilotonnen Energie hätte dann dieser Komet gehabt, wenn er auf der Erde eingeschlagen wäre?
 - Nach der Beinahekollision änderten sich die Masse und die Flugbahn des Kometen. Schlagt einen Grund hierfür vor.
- Ein Komet bewegt sich in einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne. Seine sonnennächste Annäherung erfolgt in einer Entfernung von $4,9 \times 10^{10} \text{ m}$. An diesem Punkt beträgt seine Geschwindigkeit $8,9 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$. Er stammte aus der Oort'schen Wolke, weit jenseits der Umlaufbahn des Neptuns. Wie hoch ist seine Geschwindigkeit, wenn er $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ von der Sonne entfernt ist (dies ist die Orbitaldistanz der Erde zur Sonne)?
- Wie haben eurer Meinung nach Kometen- und Asteroideneinschläge die Erde und das Leben auf der Erde im Lauf ihrer Geschichte beeinflusst?

→ MIT DER ESA IM WELTRAUM

Giotto

Der Komet 1P/Halley hat eine Umlaufperiode von etwa 75,5 Jahren (die Zahl schwankt wegen der Ausgasung von seinem Kern und Gravitationsstörungen geringfügig von Umlaufbahn zu Umlaufbahn). Dieser Komet konnte (mit bloßem Auge) regelmäßig von der Erde aus beobachtet werden, und Erscheinungen wurden seit etwa 240 v.Chr. aufgezeichnet. Aufgrund der Aufzeichnungen dieser Beobachtungen konnten Astronomen die Umlaufbahn des Kometen 1P/Halley auf wenige Monate um das Perihel eingrenzen. Eine berühmte Darstellung der Sichtbarkeit des Kometen 1P/Halley von der Erde aus wurde auf dem Teppich von Bayeux wiedergegeben, der die Schlacht von Hastings 1066 abbildet (Abbildung 10).

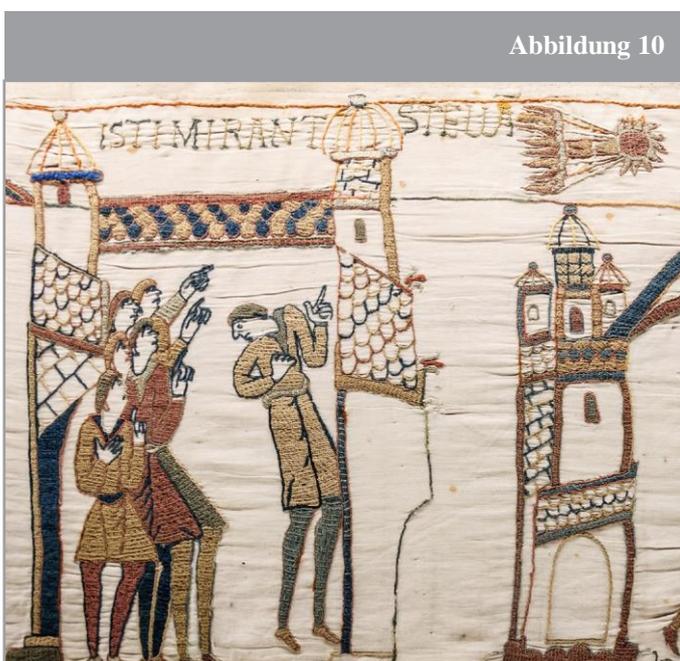


Abbildung 10



Abbildung 11

↑ Komet 1P/Halley, abgebildet auf dem Teppich von Bayeux.

↑ Giotto steht für den Sonnen-Simulationstest bereit. Copyright: ESA

In jüngerer Zeit – 1986 – näherte sich der Komet 1P/Halley erstmalig seit dem Beginn des Weltraumzeitalters der Sonne. Die ESA-Raumsonde Giotto (Abbildung 11) flog in einer Entfernung von weniger als 600 km an seinem Kern vorbei und erzielte dabei zum allerersten Mal Nahaufnahmen von einem Kometenkern (Abbildungen 12 und 13). Durch diese Beobachtungen änderte sich das Verständnis der Wissenschaftler von diesen eisigen Objekten.

Giotto beobachtete, dass die Oberfläche des Kerns sehr dunkel war, schwärzer als Kohle. Dies ließ vermuten, dass er mit einer Staubschicht bedeckt war. Die Daten ergaben, dass die Häufigkeit bzw. das Verhältnis leichter Elemente (Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff) im Kometen 1P/Halley ähnlich wie bei der Sonne war, was bedeutet, dass er aus dem ursprünglichen Material besteht, aus dem das Sonnensystem entstand.

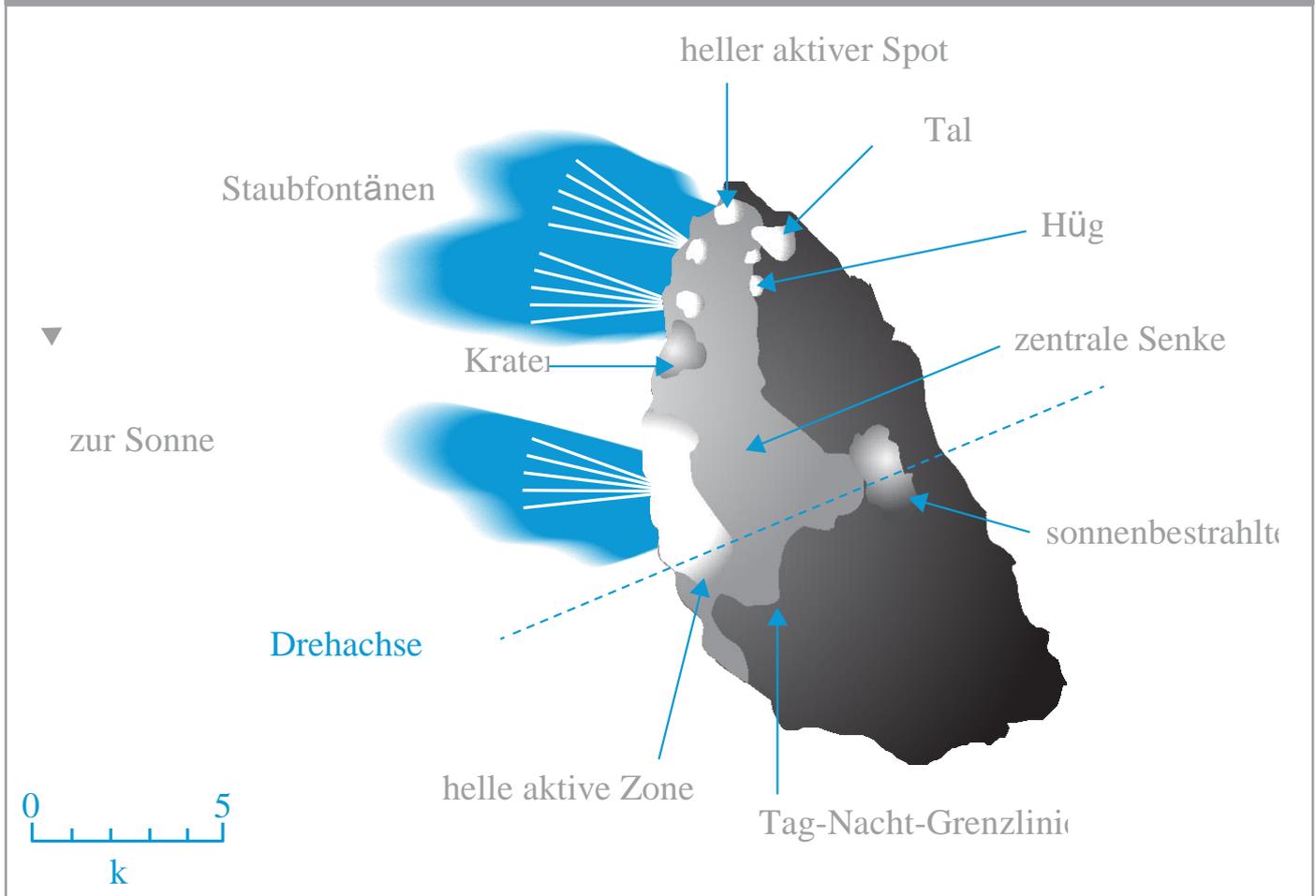
Die Bildmontage in Abbildung 12 zeigt weitere Merkmale, die bei der Annäherung der Sonde an den Kern sichtbar wurden.



↑ Der Kern des Kometen 1P/Halley, von Giotto aus nächster Distanz aufgenommen.



↑ Bild des Kerns des Kometen 1P/Halley, von Giotto aufgenommen.



↑ Auf den Bildern des Kometen 1P/Halley ermittelte Hauptmerkmale, die von der ESA-Raumsonde Giotto zurückgeschickt wurden.

Abbildung 14 zeigt Merkmale, die von einem Bild des Kerns des Kometen 1P/Halley (Abbildung 13) interpretiert wurden. Dabei lassen sich Jets mit Material bzw. Staubfontänen beobachten, die von der Oberfläche des Kerns austreten. Verursacht wird dies durch die rasche Sublimierung der flüchtigen Bestandteile auf und in der Nähe der Oberfläche des Kerns. Da der Druck dieser sich ausdehnenden flüchtigen Bestandteile zunimmt, werden sie letztlich in einem als Ausgasung bekannten Prozess freigesetzt.

Das SOHO – Sonnen- und Heliosphären-Observatorium

Das von der ESA und NASA gestartete Sonnen- und Heliosphären-Observatorium, kurz SOHO, überwacht die Sonne aus einer Entfernung von etwa 1,5 Mio. km von der Erde entfernt (Abbildung 15). Hier hält die gemeinsame Schwerkraft von Erde und Sonne die Raumsonde auf einer Umlaufbahn stabil auf der Erde-Sonne-Linie. Von dieser Position hat das SOHO eine ununterbrochene Sicht auf die Sonne und kann deshalb rund um die Uhr Beobachtungen anstellen.

Das SOHO soll den inneren Aufbau der Sonne, deren erweiterte äußere Atmosphäre (die Korona) und den Ursprung des Sonnenwinds untersuchen. Seit seinem Start 1995 hat das SOHO die Sonne über einen vollständigen Sonnenzyklus beobachtet und den Wissenschaftlern wertvolle Daten geliefert, um die Maxima und Minima des langfristigen Verhaltens der Sonne besser verstehen zu können.

Von seinem einzigartigen Beobachtungspunkt aus konnte das SOHO auch Tausende von sonnennahen Kometen beobachten, einschließlich den Kometen 2012/S1 ISON, einen sonnennahen Kometen, der 2013 eine nahe Perihel-Annäherung unternahm. Das SOHO ist einer der größten Kometen-Entdecker aller Zeiten und hat seit seinem Start über 2.700 Kometen entdeckt.

Abbildungun



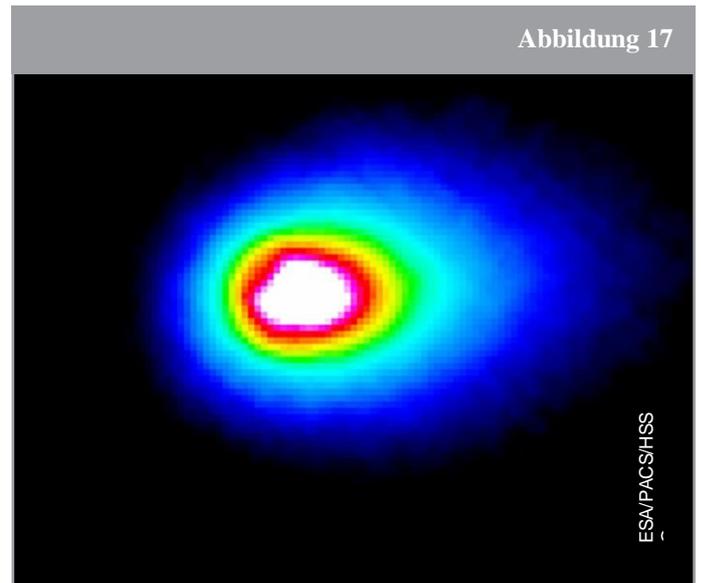
↑ Künstlerische Darstellung des SOHO.

Komet 103P/Hartley und Herschel

Das ESA-Infrarot-Weltraumobservatorium Herschel (Abbildung 16) wurde 2009 gestartet und trug das größte und leistungsfähigste je in den Weltraum beförderte Teleskop. Es war das erste Observatorium, das den gesamten Bereich von fernem Infrarot bis zu den Wellenlängen im Submillimeterbereich abdeckte. Mit den Beobachtungen von Herschel waren Erkundungen weiter im fernen Infrarot als mit jeder anderen früheren Mission dadurch möglich, dass ansonsten unsichtbare staubige und kalte Regionen des nahen und fernen Kosmos untersucht werden konnten.



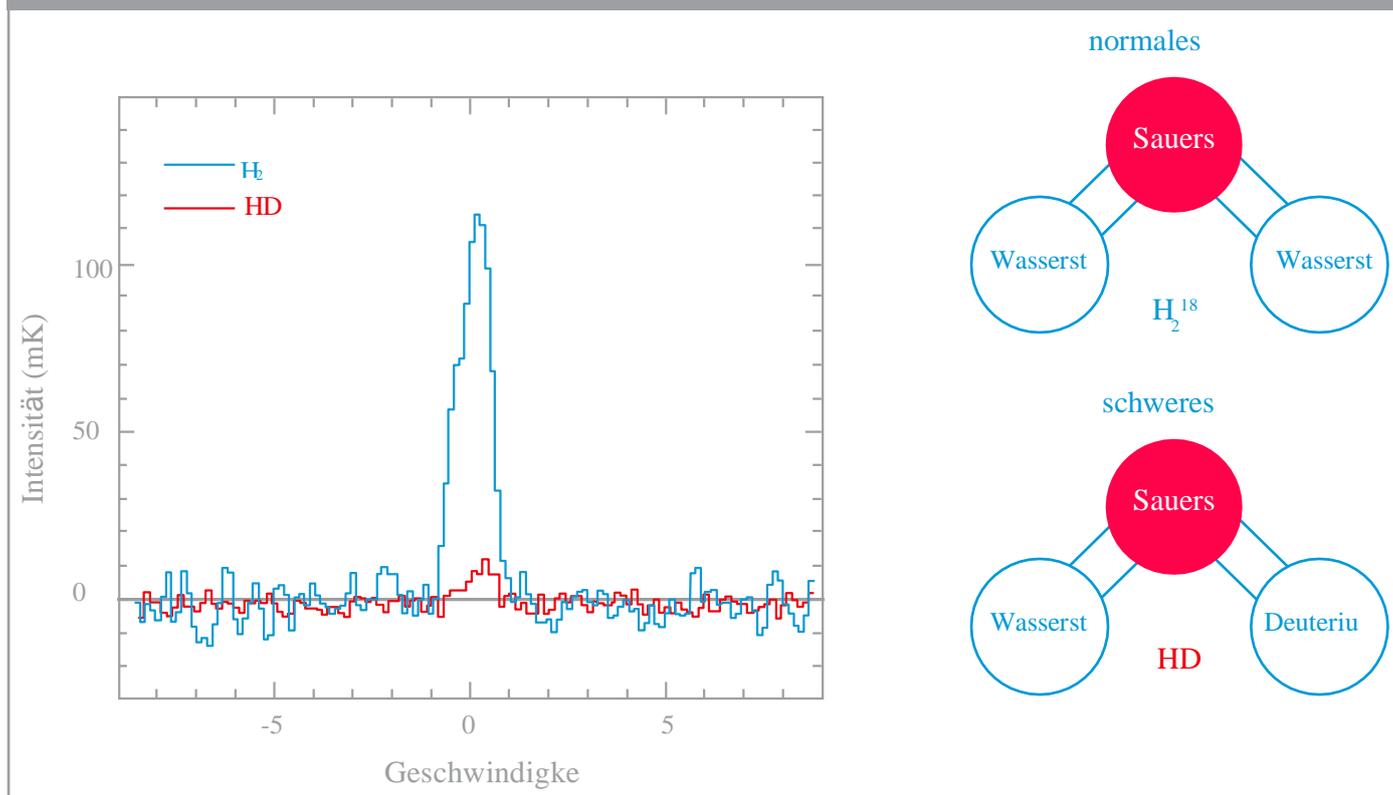
↑ Künstlerische Darstellung des Infrarot-Weltraumobservatoriums Herschel.



↑ Komet 103P/Hartley, aufgenommen von dem PACS-Instrument auf dem Infrarot-Weltraumobservatorium Herschel.

2010 führte Herschel spektroskopische Beobachtungen des Kometen 103P/Hartley im fernen Infrarot durch und beobachtete die Emission großer Wassermengen von dessen Kern, wie in Abbildung 17 in rot und weiß wiedergegeben. Diese Beobachtungen erfolgten in der Nähe des Perihels (sonnennächste Annäherung) des Kometen.

Mit den Infrarotspektroskopie-Messungen, die mit dem HIFI-Instrument an Bord von Herschel erfolgten, ließen sich Schätzungen des Verhältnisses von Deuterium („schwerer Wasserstoff“ – Wasserstoffatome mit einem Neutron in ihren Kernen sowie ein Proton) zu Wasserstoff in dem von dem Kometenkern abgegebenen Wasser (d.h. das Verhältnis von normalem Wasser zu „deutერიertem“ Wasser; Abbildung 18) vornehmen. Es wurde festgestellt, dass der Wassergehalt dieses besonderen Kometen im Gegensatz zu anderen beobachteten Kometen dasselbe Verhältnis zum Wassergehalt der Weltmeere aufweist. Dies lieferte den ersten direkten Nachweis für die Theorie, dass der ursprüngliche Wassergehalt der Erde aus derselben Quelle stammte wie einige Kometen.



↑ Mit einem zusätzlichen Neutron in einem der Wasserstoffbestandteile des Moleküls erzeugt schweres Wasser einen niedrigeren Spektral-Peak.

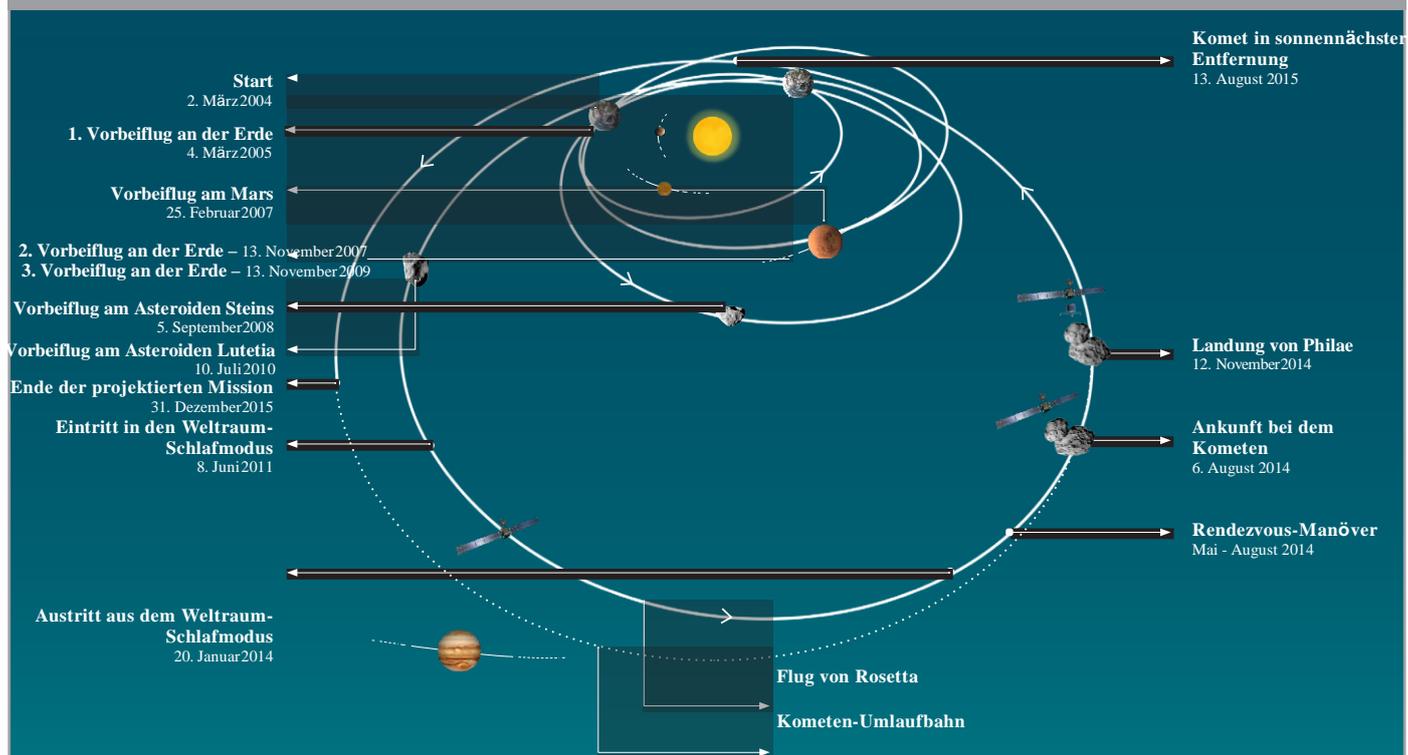
Rosetta

Die ESA-Mission Rosetta zu dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko wurde 2004 auf eine 10-jährige Reise zum Zusammentreffen mit und zur Landung auf dem Kern eines Kometen geschickt.

Das vorrangige Ziel von Rosetta ist das bessere Verständnis von Ursprung und Entwicklung des Sonnensystems. In der Zusammensetzung eines Kometen spiegelt sich die Zusammensetzung des präsolaren Nebels wider, aus dem die Sonne und die Planeten des Sonnensystems vor mehr als 4,6 Mrd. Jahren entstanden. Eine eingehende Analyse des Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko durch Rosetta und deren Landegerät liefert wesentliche Informationen zum Verständnis der Entstehung des Sonnensystems.

Es gibt überzeugende Nachweise dafür, dass Kometen bei der Entwicklung der Planeten eine Schlüsselrolle spielten, weil bekanntlich Kometeneinschläge in der Frühzeit des Sonnensystems sehr viel häufiger auftraten als heute. So könnten Kometen beispielsweise Wasser auf die Erde gebracht haben. Die chemische Zusammensetzung des Wassers auf dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko wird daraufhin untersucht, ob sie dieselbe ist wie bei den Weltmeeren. Zusätzlich zu Eis und Staub enthalten Kometen viele komplexe Moleküle, einschließlich organischer Materialien, die bei der Entwicklung des Lebens auf der Erde möglicherweise eine entscheidende Rolle gespielt haben.

Um zu dem Kometen zu gelangen, musste Rosetta eine Reihe von Gravitationsmanövern („Slingshots“) durchführen, wobei die Schwerkraft eines Himmelskörpers dazu genutzt wird, die Raumsonde weiter zu beschleunigen (Abbildung 19). Um tiefer in den Weltraum zu fliegen, benötigte Rosetta vier Gravitationsmanöver einschließlich dreier naher Vorbeiflüge an der Erde und eines am Mars. Bei jedem derartigen Manöver änderte sich die kinetische Energie von Rosetta und somit die Geschwindigkeit der Raumsonde, wobei sich auch die Dimensionen der elliptischen Umlaufbahn änderten.



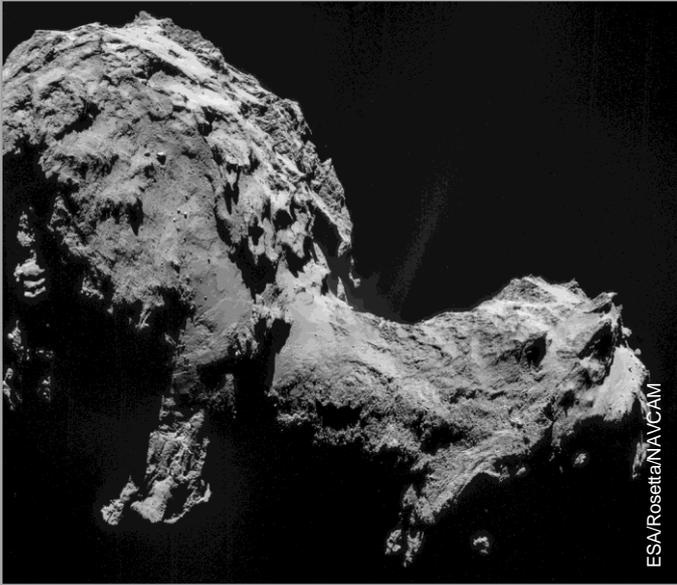
Die ESA-Raumsonde Rosetta führte mehrere Gravitationsmanöver mit Planeten durch, um ihren Bestimmungsort zu erreichen.

Wegen einer derart langen Reise wurde Rosetta im Juni 2011 zur Einsparung von Strom und Treibstoff und zur Minimierung der Betriebskosten in einen Schlafmodus versetzt. Fast alle ihren elektrischen Systeme wurden abgeschaltet, ausgenommen der Computer und mehrere Heizgeräte.

Im Januar 2014 weckte Rosettas vorprogrammierter interner „Wecker“ die Raumsonde in Vorbereitung auf deren Zusammentreffen mit dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko behutsam auf. Nach dem Aufwecken wurden die 11 wissenschaftlichen Instrumente und die 10 Instrumente des Landegeräts der Raumsonde reaktiviert und für wissenschaftliche Beobachtungen betriebsbereit gemacht. Dann wurden insgesamt zehn kritische Manöver zur Korrektur der Umlaufbahn durchgeführt, um dadurch die Geschwindigkeit der Raumsonde relativ zu dem Kometen zu verringern und somit an dessen elliptische Umlaufbahn anzupassen.

Nachdem Rosetta am 6. August 2014 beim Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko eingetroffen war, leitete sie weitere Manöver ein, um sie in eine „Umlaufbahn“ um den Kometenkern zu bringen. Von diesem Beobachtungspunkt aus kann das Instrumentarium von Rosetta eine eingehende wissenschaftliche Untersuchung des Kometen liefern und dabei die Oberfläche in beispielloser Detailgenauigkeit untersuchen und abbilden (Abbildung 20).

Abbildung 20



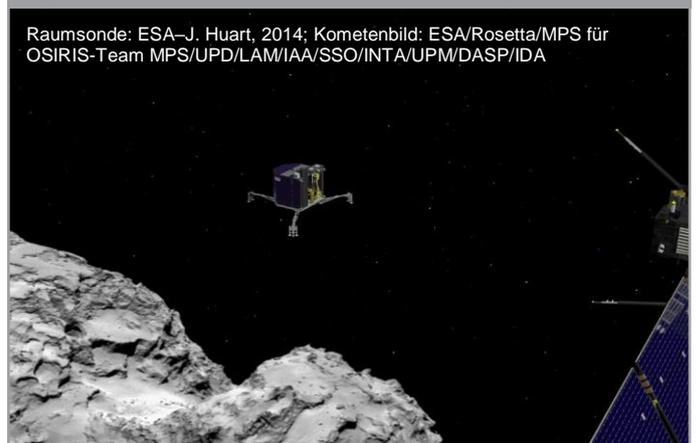
↑ Mosaik aus vier NAVCAM-Bildern des Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko unter Verwendung von Bildern, die am 19. September 2014 aufgenommen wurden, als sich Rosetta in einer Entfernung von 28,6 km von dem Kometen befand.

Nach der Landung begleitet Rosetta den Kometen weiter auf seiner elliptischen Reise. Rosetta beschleunigt dann mit dem Kometen zurück zum inneren Sonnensystem und wird weiter aus der Nähe untersucht und beobachtet, wie sich der eisige Kometenkern bei Annäherung an die Sonne erwärmt.

Im November 2014 wird Rosetta nach einer monatelangen Abbildung und Analyse des Kometenkerns ihr Landegerät Philae aussetzen, um die allererste Landung auf einem Kometenkern zu versuchen. Da der Komet eine außerordentlich niedrige Schwerkraft hat, verwendet Philae Harpunen und Eisschrauben, um sich auf der Oberfläche zu verankern. Abbildung 21 zeigt eine künstlerische Darstellung des Aufsetzens von Philae auf der Oberfläche.

Das Landegerät Philae benutzt 10 Instrumente, einschließlich eines Bohrgeräts, zur Entnahme von Proben von der Oberfläche, und **Spektrometer*** zur direkten Analyse des Aufbaus und der Zusammensetzung des Kometen.

Abbildung 21



↑ Das Landegerät Philae liefert beispiellose Informationen über die Oberfläche und den inneren Aufbau eines Kometen.

* **Spektrometer:** Instrument zur Aufspaltung von Licht in dessen konstitutive Wellenlängen derart, dass sich die Eigenschaften der Lichtquelle messen lassen.

Glossar

Aphel: Sonnenfernster Punkt in einer Umlaufbahn.

Astronomische Einheit (AE): 1 AE ist die durchschnittliche Entfernung zwischen der Erde und der Sonne, bzw. der Orbitalradius der Erde, der ca. 150 Mio. km beträgt.

Bow Shock (Komet): Fläche der Interaktion zwischen den Ionen der Kometen-Koma und dem Sonnenwind. Der Bow Shock entsteht dadurch, dass die relative Umlaufgeschwindigkeit des Kometen und der Sonnenwind im Überschallbereich liegen. Der Bow Shock bildet sich vor dem Kometen in der Strömungsrichtung des Sonnenwindes. Im Bow Shock entstehen große Mengen von Kometen-Ionen und laden das solare Magnetfeld mit Plasma auf. Dies hat zur Folge, dass sich die Feldlinien um den Kometen krümmen, wodurch die Kometen-Ionen entstehen und den Schweif aus Gas, Plasma und Ionen bilden.

Gravitationsstörungen: Veränderungen der Umlaufbahn eines Himmelskörpers (z.B. Planet, Komet) aufgrund von Interaktionen mit den Gravitationsfeldern anderer Himmelskörper (z.B. Riesenplaneten, andere Sterne).

Lagrange-Punkte: In jeder Orbitalkonfiguration gibt es fünf Punkte, an denen ein nur durch die Schwerkraft beeinflusstes Objekt eine stabile Umlaufbahn einnehmen kann. Zu weiteren Informationen siehe ESA teach with space - gravity wells video | VP04 (siehe Abschnitt Links).

Perihel: Sonnennächster Punkt in einer Umlaufbahn.

Rückläufige Bewegung eines Planeten: Scheinbare Bewegung eines Planeten am Nachthimmel in einer Richtung, die der normal beobachteten (rechtläufige Bewegung) entgegengerichtet ist.

Sonnenwind: Ein Strom energiereicher Teilchen (Plasma), der von der oberen Atmosphäre der Sonne in alle Richtungen ausgestrahlt wird. Er enthält zum größten Teil Elektronen und Protonen.

Sublimieren (Sublimation): Beim Erwärmen geht ein Stoff direkt von der festen Phase unter Umgehung der Flüssigphase in die Gasphase über. Wenn das Gas wieder abkühlt, bildet es normalerweise eine feste Ablagerung.

Umlaufperiode: Die zur Vollendung einer Umlaufbahn erforderliche Zeit.

Vorbeiflug: Nahe Passage einer Raumsonde bei einem Planeten oder einem anderem Himmelskörper. Benutzt die Raumsonde das Gravitationsfeld des Planeten zur Steigerung ihrer Geschwindigkeit oder zur Änderung ihrer Flugbahn, heißt dies Swing-by oder Schuberrhöhungsmanöver.

Berechnung von Masse, Geschwindigkeit und Energie eines Kometen

Bei diesen Fragen untersucht ihr die Masse, die Geschwindigkeiten und die Energiemengen von Kometen anhand der Daten in nachstehender Tabelle.

Masse der Sonne	$m_{\text{Sonne}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
Dichte von Eis	$\rho = 1.000 \text{ kg m}^{-3}$
Gravitationskonstante	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Fragen

1. Ein Komet hat eine kinetische Energie von $4,5 \times 10^{13} \text{ J}$. Er fliegt mit einer Geschwindigkeit von 34 km s^{-1} . Berechnet die Masse des Kometen.

$$v = 34 \text{ km s}^{-1}$$

Stellt die Gleichung um, um m zu ermitteln:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = 4,5 \times 10^{13} \text{ J}$$

2. Ein großer Komet mit der Masse $5,2 \times 10^8 \text{ kg}$ hat eine Beinahekollision mit der Erde und streift die Atmosphäre. Zum Zeitpunkt der Messung betrug seine Geschwindigkeit $49,0 \text{ km s}^{-1}$.

Berechnet

- a) die kinetische Energie des Kometen (in J).

$$m = 5,2 \times 10^8 \text{ kg}$$

$$v = 49 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$$

$$m = \frac{2 \times E_k}{v^2} = \frac{2 \times 4,5 \times 10^{13}}{(34 \times 10^3)^2} = 77854,7 \text{ kg}$$

- b) Wenn die bei der Explosion von 1 Kilotonne (1.000 Tonnen) TNT freigesetzte Energie $4,2 \times 10^{12} \text{ J}$ beträgt, wie viele Kilotonnen Energie hätte dann dieser Komet gehabt, wenn er auf der Erde eingeschlagen wäre?

$$1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{(5,2 \times 10^8) \times (49 \times 10^3)^2}{2} = 6,24 \times 10^{17} \text{ J}$$

$$E_{\text{impact}} = \frac{E_k}{1 \text{ kt}} = \frac{6,24 \times 10^{17}}{4,2 \times 10^{12}} = 147,6 \text{ kt}$$

c) Nach der Beinahekollision änderten sich die Masse und die Flugbahn des Kometen. Schlagt einen Grund hierfür vor.

Der Komet streifte durch die Atmosphäre. Bei der Passage kommt es aufgrund von Wärmeeffekten (durch die Stauverdichtung, obwohl die Schüler oft Reibung für die Ursache halten) dazu, dass der Komet einen Teil seiner Masse durch die Sublimierung von Eis verliert. Dadurch ändert sich seine Umlaufbahn.

Der Staudruck ist ein Druck, der auf einen Körper ausgeübt wird, der sich durch ein Fluid bewegt. In diesem Fall trägt die Atmosphäre dazu bei, dass eine starke Widerstandskraft auf den Körper ausgeübt wird.

$$P = \rho \times v^2$$

wobei P der Druck, ρ die Dichte des Fluids und v die Geschwindigkeit des Körpers sind.

3. Ein Komet bewegt sich in einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne. Seine sonnennächste Annäherung erfolgt in einer Entfernung von $4,9 \times 10^{10}$ m. An diesem Punkt beträgt seine Geschwindigkeit $8,9 \times 10^4$ m s⁻¹. Er stammte aus der Oort'schen Wolke, weit jenseits der Umlaufbahn des Neptuns. Wie hoch ist seine Geschwindigkeit, wenn er $1,5 \times 10^{11}$ m von der Sonne entfernt ist (dies ist die Orbitaldistanz der Erde zur Sonne)?

$E_p =$ potenzielle Gravitationsenergie $E_p + E_k = \text{ct}$

Sonnennächste Annäherung:

$$d_K = 4,9 \times 10^{10} \text{ m}$$

$$v_K = 8,9 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$$

Auf der Erde:

$$d_E = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$m \ v_E = ?$$

$$\frac{1}{2} m_{\text{comet}} v_c^2 - \frac{G m_{\text{sun}} m_{\text{comet}}}{d_c} = \frac{1}{2} m_{\text{comet}} v_E^2 - \frac{G m_{\text{sun}} m_{\text{comet}}}{d_E}$$

Dividiert durch m_{Komet}

$$\frac{1}{2} v_c^2 - \frac{G m_{\text{sun}}}{d_c} = \frac{1}{2} v_E^2 - \frac{G m_{\text{sun}}}{d_E}$$

$$v_E^2 = v_c^2 - \frac{2 G m_{\text{sun}}}{d_c} + \frac{2 G m_{\text{sun}}}{d_E}$$

$$v_E = \sqrt{v_c^2 - \frac{2 G m_{\text{sun}}}{d_c} + \frac{2 G m_{\text{sun}}}{d_E}}$$

Setzt eure Zahlen ein:

$$v_E = \sqrt{(8,9 \times 10^4)^2 - \frac{2(6,67 \times 10^{-11})(2 \times 10^{30})}{4,9 \times 10^{10}} + \frac{2(6,67 \times 10^{-11})(2 \times 10^{30})}{1,5 \times 10^{11}}}$$

$$= \sqrt{7,92 \times 10^9 - 5,44 \times 10^9 + 1,78 \times 10^9} = 6,52 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$$

4. Wie haben eurer Meinung nach Kometen- und Asteroideneinschläge die Erde und das Leben auf der Erde im Lauf ihrer Geschichte beeinflusst?

Etwaige erwähnenswerte Punkte:

- Kometen, die zum großen Teil aus Eis bestehen, haben wahrscheinlich einen Großteil des Wassers auf die Erde gebracht.
- Bei Kometen wurden auch organische Elemente wie Aminosäuren gefunden, die einige der grundlegenden Zutaten geliefert haben könnten, die für das Leben auf der Erde erforderlich sind.
- Große Einschläge können gewaltige globale Effekte auslösen, wozu gehören:
 - Klimaveränderungen aufgrund großer Mengen in die Atmosphäre geschleuderter Materialien;
 - zunehmende Erdbeben- und Vulkantätigkeit aufgrund der durch den Einschlag verursachten Druckwellen, was zur Freisetzung großer Mengen an CO₂ und SO₂ in die Atmosphäre führt;
 - durch große Einschläge können Tsunamis und Flutwellen ausgelöst werden;
 - aus diesen Prozessen können sich Ereignisse ergeben, die zum Aussterben von Arten führen (wie der Dinosaurier-Einschlag vor 65 Mio. Jahren).

Links

Rosetta

ESA-Website zu Rosetta: www.esa.int/rosetta

ESA-Blog zu Rosetta: blogs.esa.int/rosetta/

Videos und Animationen zu Rosetta: www.esa.int/spaceinvideos/Missions/Rosetta

Bilder zu Rosetta: [www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/\(class\)/image](http://www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/(class)/image)

Datenblatt zu Rosetta, einschließlich Zeitachse der Mission:

www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet

Die bisherige Geschichte: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_the_story_so_far

Die Jagd auf den Kometen: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing_a_comet

Eine 12-jährige Reise durch den Weltraum: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space

Rosettas Umlaufbahn um den Kometen: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Wie umrundet man einen Kometen?: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet

Kometen

Artikel von ESA Kids zu Kometen: www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF_OurUniverse_0.html

ESA-Website zu Rosetta (technisch): www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta

ESA-Website zu Giotto: sci.esa.int/giotto/

ESA-Website zu Rosetta: www.esa.int/rosetta

Artikel von ESA Kids zu unserem Universum: www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_0.html

Giotto

Überblick über Giotto: www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Giotto_overview

Herschel

ESA-Website zum Weltraumobservatorium Herschel: www.esa.int/herschel

Kamen die Weltmeere von Kometen?: www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Did_Earth_s_oceans_come_from_comets

SOHO

ESA-Website zu SOHO: soho.esac.esa.int

Video des Streifflugs des Kometen ISON an der Sonne vorbei aus der Sicht des ESA-/NASA-Satelliten SOHO: sci.esa.int/soho/54346-soholasco-view-of-comet-ison-27-30-november-2013/

Einschlag auf die Erde

Einschlagssimulator Down2Earth: education.down2earth.eu/

Sammlung Teach with space

ESA teach with space - gravity wells video | VP04: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_class_room_demonstration_video_VP04

ESA teach with space - marble-ous ellipses teacher's guide and student activities | P02: esamultimedia.esa.int/docs/edu/P02_Marble-ous_ellipses_teacher_guide.pdf

ESA teach with space - marble-ous ellipses Video | VP02: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VP02

ESA teach with space – Wir backen uns einen Kometen - Video | VP06: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06

teach with space – Wir backen uns einen Kometen | P06
www.esa.int/education

Für die ESA entwickelt von der National Space Academy, UK
Abbildungen von Kaleidoscope Design, NL

Eine Produktion von ESA Education (ESA-Bildungsbüro)
Copyright © European Space Agency 2014