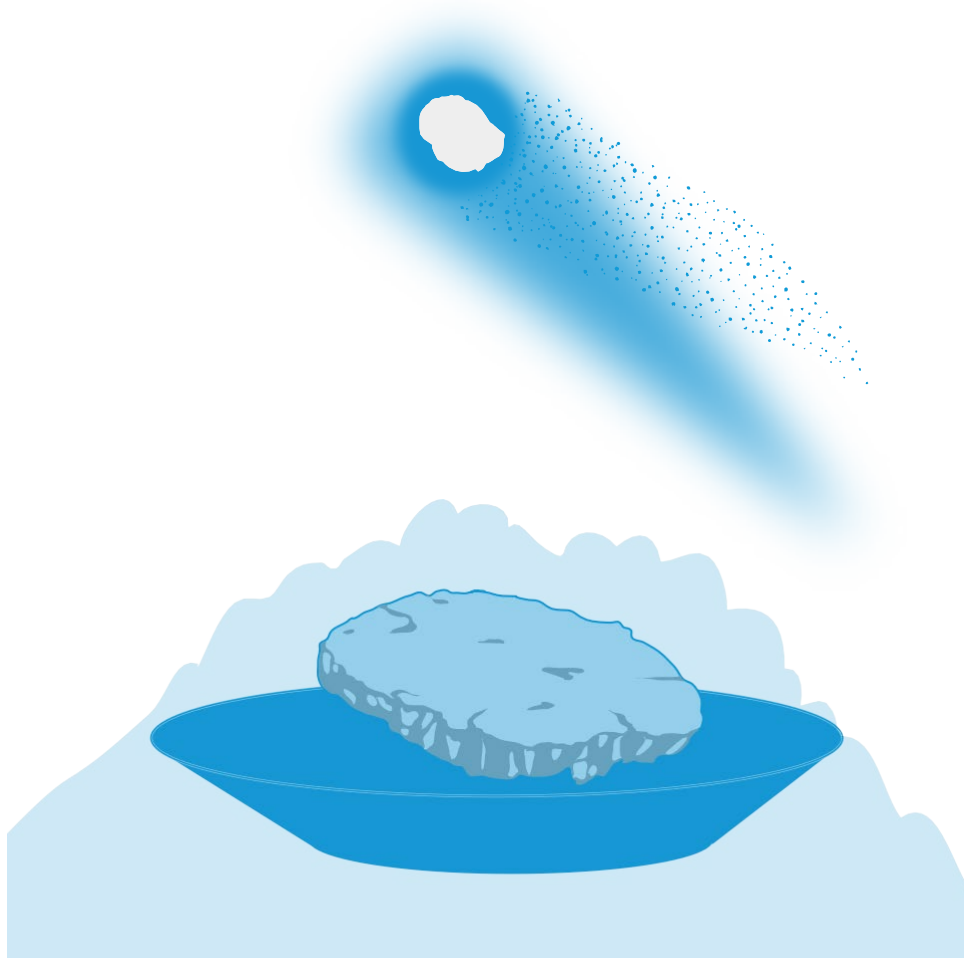


Teach with Space

→ KOCH E EINEN KOMETEN

Zutaten für Leben



→ EINLEITUNG

Kometen gelten als Zeitkapseln, die Informationen über die Bedingungen des frühen Sonnensystems enthalten. Um zu verstehen, was Kometen sind, woher sie kommen und welchen Einfluss sie auf die Entwicklung der Erde haben, muss man erst einmal herausfinden, welches Material sie enthalten. Dieses Unterrichtsmaterial und die praktischen Übungen für Schüler*innen, zusammen mit der daraus resultierenden Diskussion, geben einen Einblick in die chemischen Bestandteile von Kometen. Eine Erweiterungsdiskussion und -aktivität, die sich mit den Einschlagsprozessen auf der Erde und Berechnungen der beteiligten kinetischen Energie befasst, ist ebenfalls enthalten.

Eckdaten	Seite 3
Hintergrund	Seite 4
Aktivität – Einen Kometen kochen	Seite 12
Diskussion	Seite 14
Diskussionserweiterung	Seite 18
Fazit	Seite 20
Weltraumkontext @ ESA	Seite 21
Giotto	Seite 21
SOHO	Seite 24
Komet 103P/Hartley und Herschel	Seite 25
Rosetta	Seite 26
Anhang	Seite 29
Glossar	Seite 29
Arbeitsblatt Lösungen der Berechnungen	Seite 30
Links	Seite 33

→ KOCH EINEN KOMETEN

Zutaten für Leben?

Eckdaten

Alter: 14-18 Jahre

Typ: Lehrer*innendemonstration & Schüler*innenaktivität

Komplexität: einfach

Vorbereitungszeit für die Lehrkraft:
20 Minuten

Erforderliche Unterrichtszeit:
20 min bis 1 Stunde

Kosten Profi Bausatz: mittel (5 - 25 Euro)

Ort: Innenbereich (großer, gut belüfteter Klassenraum)

Materialien: Trockeneis (festes Kohlendioxid bei einer Temperatur unter minus 78 °C)

Schüler*innen sollten wissen

1. Die Formel der kinetischen Energie.
2. Die Konzepte der Spektroskopie und der Infrarotstrahlung.

Lernziele

1. Die Schüler*innen sollen die grundlegenden Unterschiede zwischen Kometen und Asteroiden verstehen.
2. Die Schüler*innen sollen mit den grundlegenden Parametern der Zusammensetzung von Kometen vertraut sein.
3. Die Schüler*innen sollen in der Lage sein, einfache Berechnungen der Energieumwandlungen durchzuführen, die beim Einschlag von Kometen oder Asteroiden auf Planeten stattfinden.

Sie benötigen auch



↑ Kochen eines Kometenvideos. Siehe Abschn. Links

Lehrplanbezug

Physik

- Energie, insbesondere kinetische Energie
- Energieerhaltung
- Phasenveränderungen
- Stöße, Einschläge
- Umlaufbahnen (im Sonnensystem)

Astronomie

- Lage und Beschaffenheit von Asteroiden und Kometen
- Merkmale eines Kometen (Kern, Koma, Staub und Ionenschweif) identifizieren
- Folgen von Kollisionen im Sonnensystem
- Zusammenhang zwischen Kuipergürtel und Oortscher Wolke und Kometen
- Raumsonden zur Untersuchung von Körpern im Sonnensystem

Chemie

- Phasenveränderungen

Kurzbeschreibung

Bei dieser Aktivität simulieren Lehrer*innen und Schüler*innen einen Kometenkern im Klassenzimmer. Die verwendeten Bestandteile entsprechen genau dem Material, das in einem echten Kometenkern zu finden ist, wie es durch Spektroskopie in Kombination mit den Ergebnissen von 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 (mit einer **Umlaufzeit**¹ von weniger als 200 Jahren) stammen aus dem Kuipergürtel, einer scheibenförmigen Ansammlung von gefrorenen Überresten der Entstehung des Sonnensystems jenseits der Umlaufbahn des Neptuns. Bei langperiodischen Kometen (mit Umlaufzeiten von bis zu zehntausend Jahren) geht man davon aus, dass sie aus einem kugelförmigen Halo aus eisigem Material am Rande unseres Sonnensystems stammen, der so genannten Oortischen Wolke. Die Oortische Wolke, die sich bis in eine Entfernung von mehreren tausend **Astronomischen Einheiten** (AE)² erstreckt, ist zu weit entfernt, um direkt abgebildet zu werden. Stattdessen müssen wir eine lange Kometenumlaufbahn in der Zeit zurückverfolgen, um ihren Ursprung zu bestimmen (Abbildung 2).



↑ Foto des Kometen Hale-Bopp, aufgenommen in Kroatien

Kometen umkreisen die Sonne größtenteils in stabilen Bahnen. Objekte im Kuipergürtel können jedoch durch die Gravitationsfelder der Riesenplaneten (Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun) und Objekte der Oortischen Wolke durch **Gravitationsstörungen**³ beeinflusst werden, welche durch die Bewegungen anderer Sterne verursacht werden. Diese Störungen können gelegentlich die Umlaufbahnen dieser kleinen, kalten Welten verändern und sie in Richtung des inneren Sonnensystems ablenken.

Wenn sich diese Objekte der Sonne nähern, beginnen sie sich zu erwärmen und das Eis in ihnen **sublimiert**⁴. Die ursprüngliche Struktur wird heute als "Kern" bezeichnet. Wenn sich der Kern erwärmt, gibt er Gas und Staub ab, die eine dünne, aber riesige "Atmosphäre" bilden. Diese ist als **Koma** bekannt (Abbildung 3).

Wenn sich der Komet der Sonne noch weiter nähert, erzeugt die Wechselwirkung des Komasa mit der zunehmenden Sonnenstrahlung und dem **Sonnenwind**⁵ die spektakulären "Schweife", mit denen Kometen am häufigsten in Verbindung

¹ **Umlaufzeit:** Zeit, die benötigt wird, um einmal den Zentralkörper (zB die Sonne) zu umrunden.

² **Astronomische Einheit (AE):** 1 AE ist die durchschnittliche Entfernung zwischen der Erde und der Sonne bzw. der Erdbahnradius, der etwa 150 Millionen km beträgt.

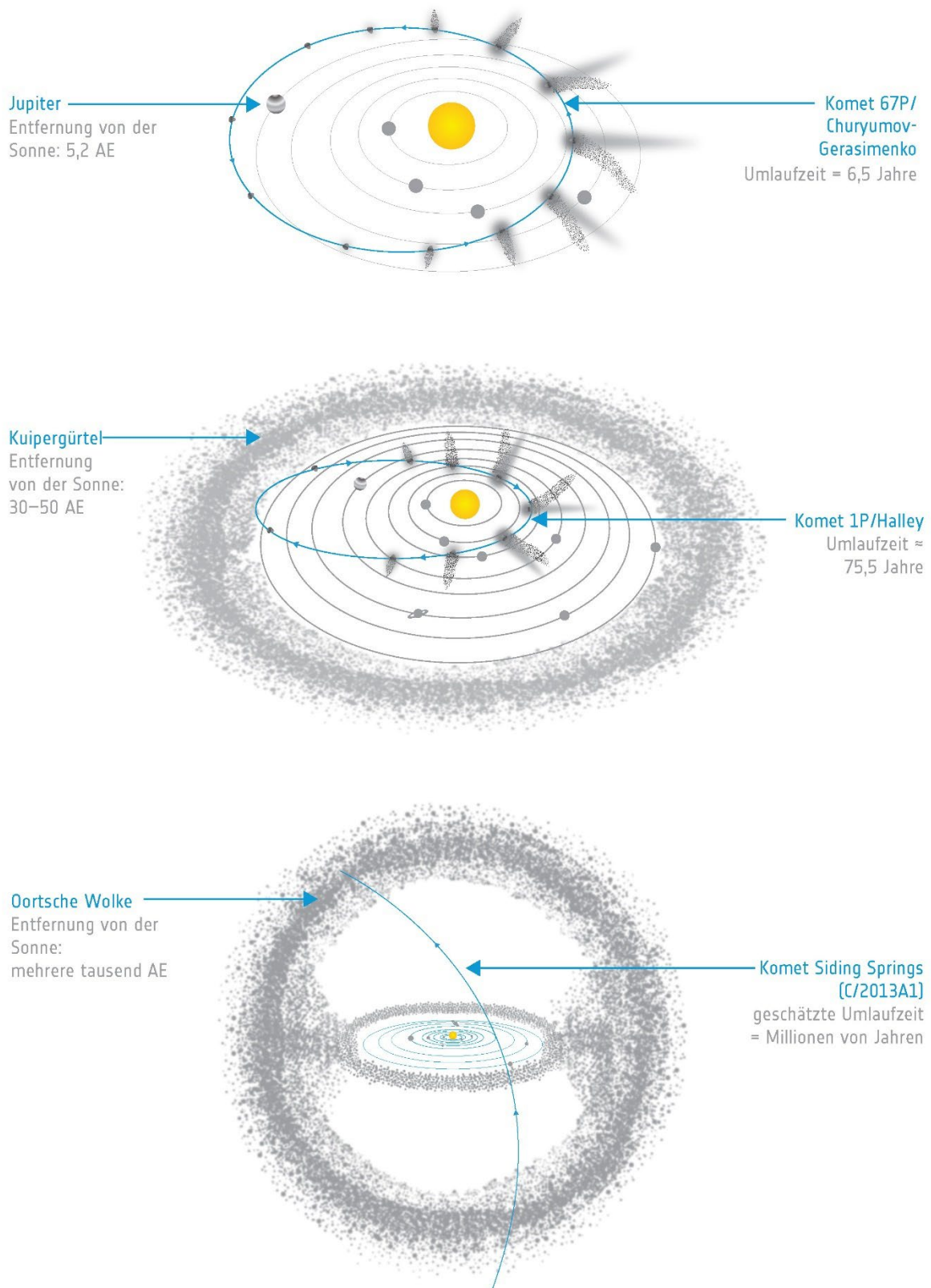
³ **Gravitationsstörungen:** Änderungen der Bahn eines Himmelskörpers (z. B. Planet, Komet) aufgrund von Wechselwirkungen mit den Gravitationsfeldern anderer Himmelskörper (z. B. Riesenplaneten, andere Sterne).

⁴ **Sublimation:** Wenn eine Substanz durch Erwärmung direkt von der festen in die gasförmige Phase übergeht und dabei den flüssigen Zustand umgeht. Wenn das Gas wieder abgekühlt wird, bildet es in der Regel eine feste Ablagerung (Resublimation).

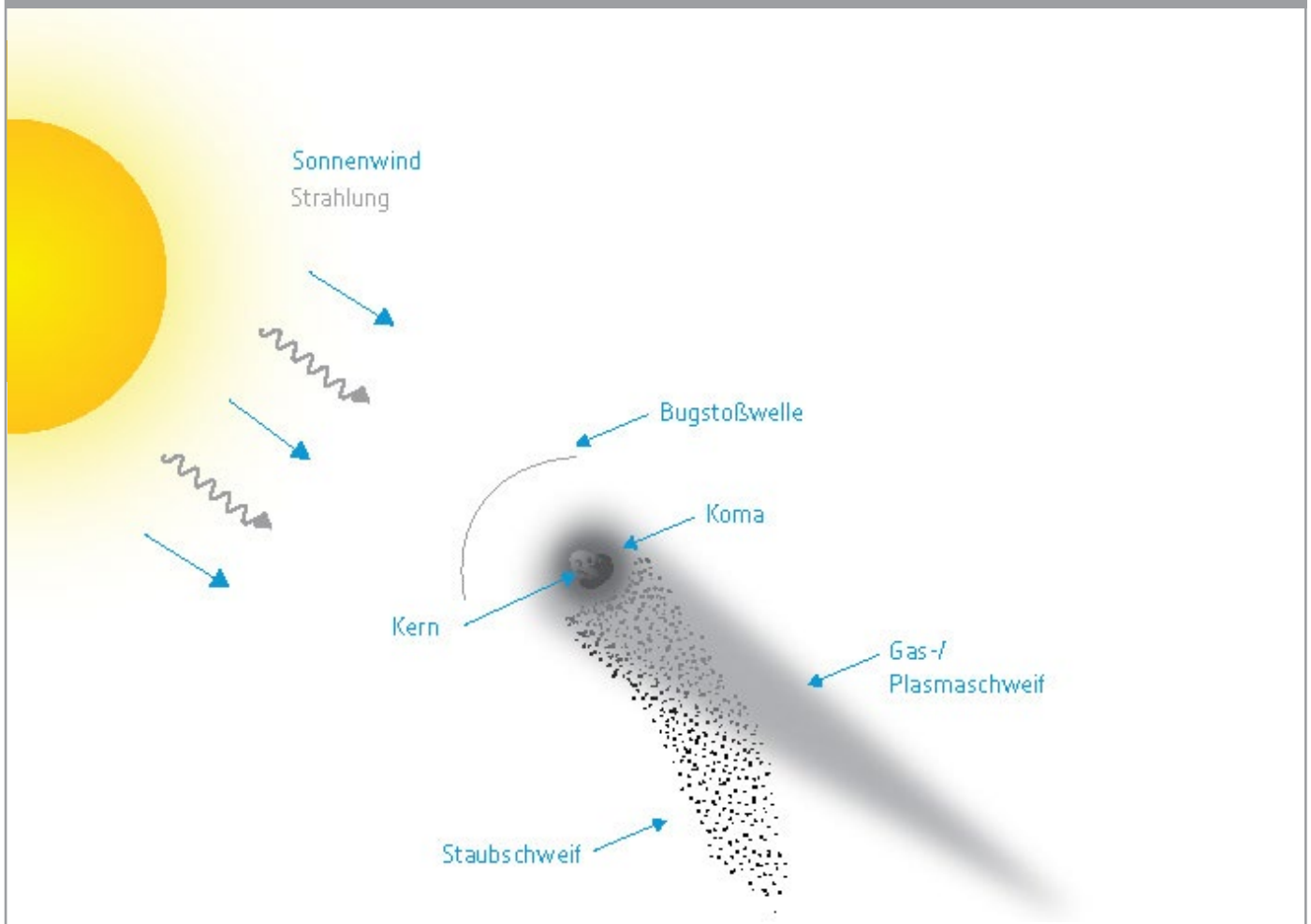
⁵ **Sonnenwind:** ein Strom hochenergetischer Teilchen (Plasma), der von der oberen Atmosphäre der Sonne in alle Richtungen ausgestoßen wird. Er enthält hauptsächlich Elektronen und Protonen.

gebracht werden. Sehr selten sind diese Schweife hell genug, um von einem Beobachter auf der Erde bei Tageslicht gesehen zu werden.

Abbildung 2



↑ Kometaumlaufbahnen im Sonnensystem.



↑ Die Anatomie eines Kometen.

Nicht alle Kometenschweife sind so spektakulär wie die in Abbildung 1 gezeigten oder sogar von der Erde aus sichtbar. Wie spektakulär sein Schweif aussieht, hängt von der Größe des Kometenkerns, seinen Bestandteilen, seiner Annäherung an die Sonne und davon ab, wie oft der Komet sich der Sonne bereits genähert hat. Nach seiner größten Annäherung an die Sonne (**Perihel**⁶) zieht sich der Komet wieder in die kälteren Regionen des Sonnensystems zurück, nachdem er einen Teil seiner Masse dauerhaft verloren hat.

Kometen haben elliptische Bahnen mit der Sonne in einem Brennpunkt (Abbildung 2) und sind daher nur für einen kurzen Zeitraum sichtbar, wenn sie sich dem Perihel nähern. Bei Kometen auf stark elliptischen Bahnen ist dies nur ein winziger Teil der Zeit, die sie für einen Umlauf um die Sonne benötigen. Den größten Teil ihrer Existenz verbringen sie damit, sich aufgrund der Schwerkraft der Sonne langsam von der Sonne weg zum **Aphel**⁷ abzubremesen und auf die Sonne zu beschleunigen, um das Perihel zu erreichen.

Weitere Informationen über elliptische Bahnen und die Bahnen von Kometen finden Sie unter ESA teach with space - marbled ellipses | Po2 classroom resource (siehe Abschnitt „Links“).

***Bugstoßwelle**: Oberfläche der Wechselwirkung zwischen den Ionen in der Kometenkoma und dem Sonnenwind. Die Bugstoßwelle

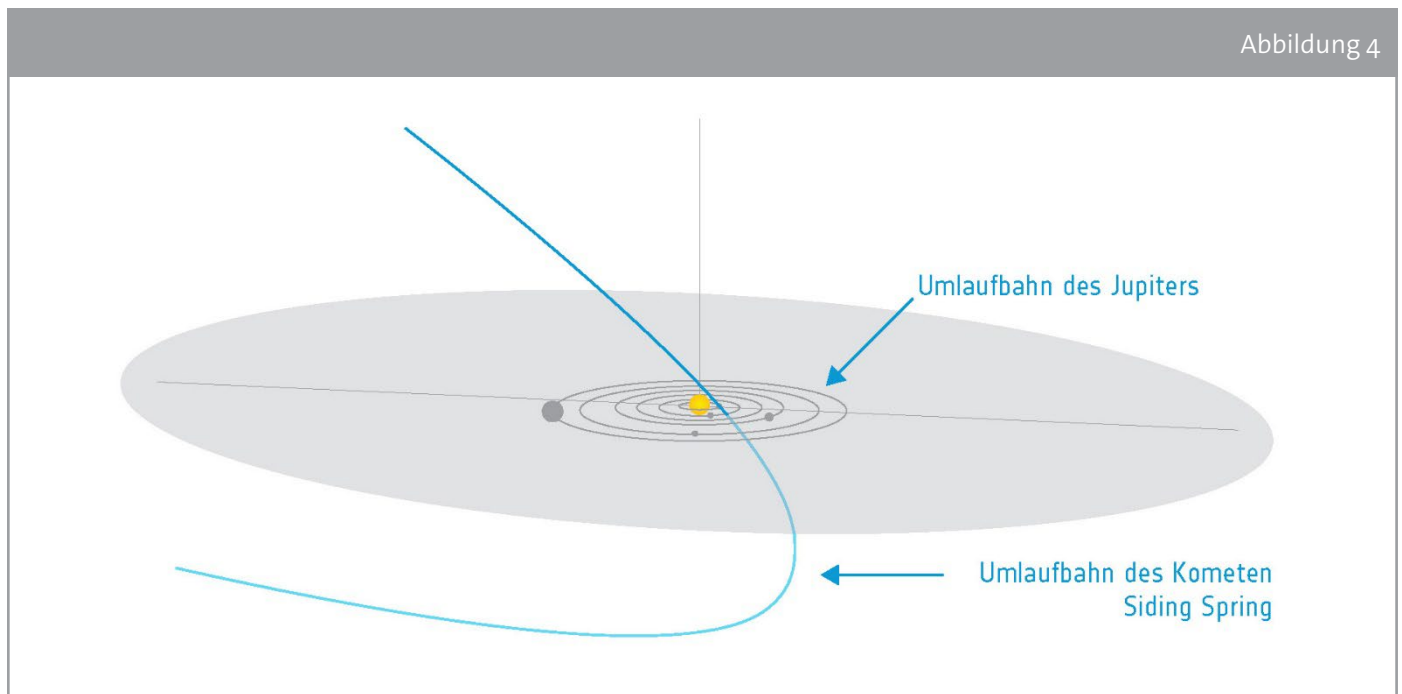
⁶ **Perihel**: Punkt auf einer Umlaufbahn, der der Sonne am nächsten ist.

⁷ **Aphel**: Punkt einer Umlaufbahn, der am weitesten von der Sonne entfernt ist.

bildet sich, weil die relative Umlaufgeschwindigkeit des Kometen und des Sonnenwinds Überschallgeschwindigkeit erreichen. Die Bugstoßwelle bildet sich stromaufwärts des Kometen in Strömungsrichtung des Sonnenwinds. In der Bugstoßwelle sammeln sich große Konzentrationen von Kometenionen an und belasten das solare Magnetfeld mit Plasma. Dies führt dazu, dass sich die Feldlinien um den Kometen herum biegen, die Kometenionen einschließen und den Gas/Plasma/Ionen-Schweif bilden

Einschläge im Sonnensystem

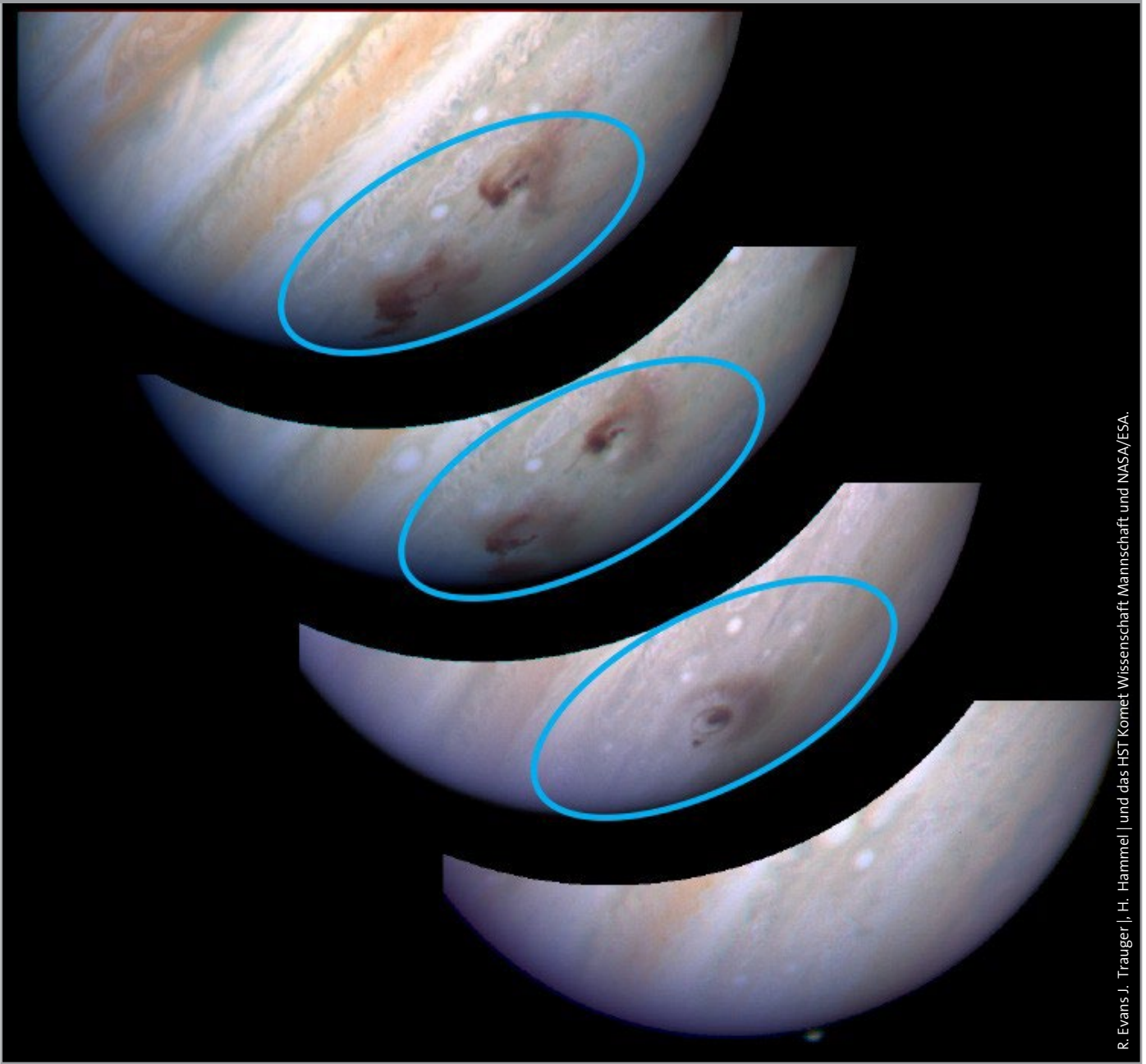
Abbildung 2 zeigt die Umlaufbahnen von drei verschiedenen Kometen, die alle die Bahnen der Planeten zu kreuzen scheinen, was darauf schließen lässt, dass Kollisionen zwischen Kometen oder Asteroiden und Planeten unvermeidlich sind. Allerdings können die Bahnen von Kometen, die aus der Oortschen Wolke kommen, stark gegen die Ebene des Sonnensystems (die Ekliptik) geneigt sein. Daher sind viele der Bahnen, die die Planetenbahnen direkt zu kreuzen scheinen, aufgrund der Perspektive irreführend. So weist beispielsweise die Bahn des Kometen Siding Spring (C/2013 A1) während seiner Annäherung an das Perihel im Jahr 2014 eine starke Neigung gegenüber der Erdbahnebene auf (Abbildung 4).



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

Dennoch gibt es überwältigende Beweise dafür, dass Planeten regelmäßig (auf geologischen Zeitskalen) von Kometen und Asteroiden getroffen werden. Einschläge haben die meisten der auf den Oberflächen von Monden und Planeten im gesamten Sonnensystem beobachteten Krater gebildet. Die größte Häufigkeit von Einschlägen gab es zu Beginn der Geschichte des Sonnensystems (Zeit des späten schweren Bombardements), aber auch in der Gegenwart gibt es noch Einschläge.

Im Jahr 1994 schlugen zahlreiche Fragmente des Kometen Shoemaker-Levy 9 (D/1993 F2) auf der Oberfläche des Jupiters ein. Die größte beobachtete Einschlagsnarbe hatte einen Durchmesser von Tausenden von Kilometern. Sie wurde durch das G-Fragment des Kometen verursacht, welches nur wenige Kilometer groß war. Die Auswirkungen dieses Einschlags auf die Jupiteratmosphäre sind in Abbildung 5 zu sehen, einer Zeitraffermontage von Bildern, die vom Weltraumteleskop Hubble aufgenommen wurden.



R. Evans J. Trauger | H. Hammel | und das HST Komēt Wissenschaft Mannschaft und NASA/ESA.

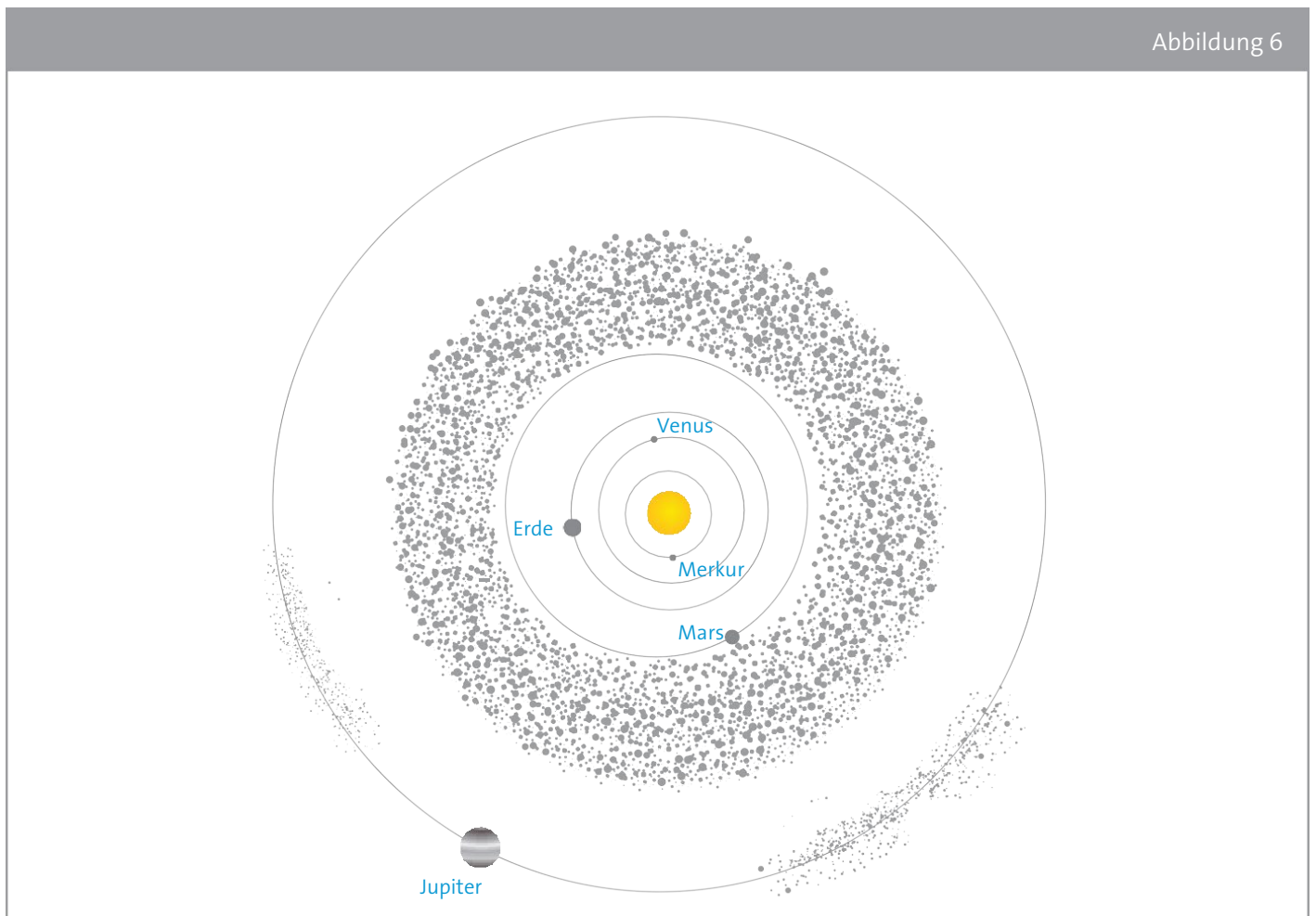
↑ Diese Zeitraffermontage von Bildern zeigt die Entwicklung der G-Einschlagstelle auf Jupiter (hervorgehoben durch die blaue Ellipse).

Asteroiden

Kometen sind nicht die einzigen Objekte, die die Erde und andere Körper des Sonnensystems treffen. Asteroiden, die größtenteils aus dem **Asteroidengürtel** zwischen Mars und Jupiter stammen (Abbildung 6), sind große felsige oder metallische Objekte. Im Großen und Ganzen sind Asteroiden viel näher an der Sonne entstanden und enthalten daher weniger leichte Elemente als Kometen. Metalle, Metalloxide, Mineralien und Silikate dominieren die Zusammensetzung von Asteroiden. Bei Kometen ermöglichen die größeren Mengen an leichten Elementen wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel die Bildung bestimmter Verbindungen, z. B. Wasser, Methan und Kohlendioxid.

Die größten bekannten Asteroiden sind **Vesta** und **Pallas** mit einem Durchmesser von mehr als 500 km. Abbildung 7 zeigt einen Größenvergleich einiger Asteroiden und Kometen. Die in Abbildung 7 gezeigten irregulären Asteroiden sind viel kleiner als Vesta und Pallas, aber viele sind erheblich größer als die abgebildeten Kometenkerne.

Abbildung 6



↑ Ein Diagramm der Asteroidenverteilung im Sonnensystem. Die meisten Asteroiden befinden sich im Hauptgürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Andere große Gruppen von Asteroiden sind die Jupiter-Trojaner, die die stabilen **Lagrange-Punkte**⁸ L₄ und L₅ auf der Jupiterbahn besetzen.

⁸ **Lagrange-Punkte:** In jeder Bahnkonfiguration gibt es fünf Punkte, in denen ein Objekt, das nur von der Schwerkraft beeinflusst wird, stabil umlaufen kann. Weitere Informationen finden Sie im Video ESA teach with space - gravity wells | VPo4 (siehe Abschnitt „Links“).

Abbildung 8



↑ Linkes Bild: Barringer-Krater, Arizona, USA. Rechtes Bild: Barringer-Krater fotografiert von der Internationalen Raumstation.

Der Meteoritenkrater entstand vor etwa 50 000 Jahren durch einen Nickel-Eisen-Asteroiden, der in den Ebenen von Arizona, USA, einschlug. Dieser Einschlag bildete einen Krater von fast 200 m Tiefe und 1,5 km Durchmesser. Fragmente des ursprünglichen **Impaktors**⁹ sind über die umliegende Landschaft verstreut.

Im Jahr 1908 explodierte ein Asteroid oder Komet, von dem man annimmt, dass er einen Durchmesser von über 50 m hatte, in einer Höhe von 5 bis 10 km über einem abgelegenen Waldgebiet in der Nähe des Tunguska-Flusses im heutigen Krasnojarsk, Russland. Es wird zwar nicht angenommen, dass der Asteroid oder Komet auf der Erdoberfläche aufschlug, aber die Wucht der Explosion machte ein Waldgebiet von mehr als 2000 km² platt (Abbildung 9).

Abbildung 9



↑ Bäume, die bei der Tunguska-Explosion umgeworfen wurden.

⁹ Auf der Oberfläche eines Planeten oder Mondes eingeschlagener Himmelskörper (Komet, Asteroid)

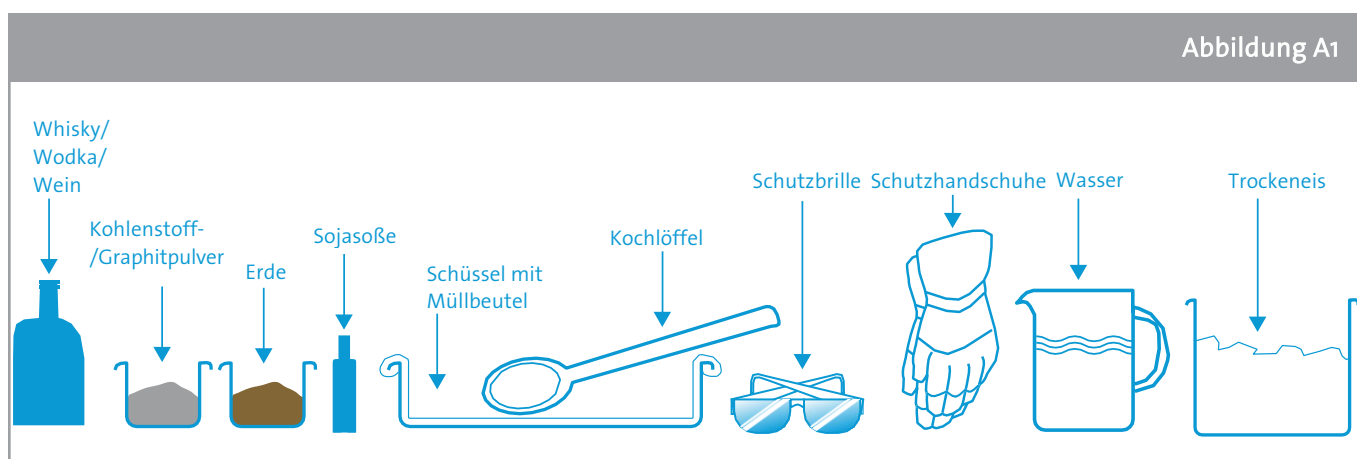
Einen Kometen kochen

In dieser Demonstration simuliert die Lehrkraft einen Kometenkern im Klassenzimmer. Die verwendeten Zutaten entsprechen genau dem Material, das in einem echten Kometenkern vorkommt.

Eine Schüler*innenversion dieser Aktivität verwendet kleinere Mengen in Plastikbechern. Es ist wichtig, dass die Schüler*innen klare Anweisungen über die Gefahren erhalten und die Gesundheits- und Sicherheitsrichtlinien befolgen. Die Anweisungen für die Schüler*innen finden Sie auf dem Arbeitsblatt nach der Aktivität.

Material

- Trockeneis (etwa 0,75 Liter, die kleinsten verfügbaren Pellets)
- Wasser (ca. 0,75 Liter)
- Große Mülltüten/Müllsäcke
- 10 Esslöffel (4 sehr große Holzlöffel) Erde (achten Sie darauf, dass die Erde nicht klumpig ist, sondern eine gleichmäßige Konsistenz hat)
- 1 Esslöffel Kohlenstaub/-pulver oder Graphitpulver
- 2-3 Esslöffel Whisky, Wodka oder Rotwein (Methanol/Ethanolanteil)
- Einige Tropfen Sojasauce (organische Komponente)
- Einige Tropfen eines Reinigungsmittels (Amoniakkomponente)
- Große Plastikschüssel
- Eimer für die Entsorgung
- Hölzerner Löffel
- Klarer Sicherheitsschirm
- Styroporbehälter für Trockeneis
- Thermische Schutzhandschuhe
- Schutzbrille für alle Teilnehmer*innen und Demonstratoren
- Laborschutzhittel für den Demonstrator (optional)
- Messbecher



↑ Versuchsaufbau.

Gesundheit & Sicherheit

- Tragen Sie beim Umgang mit Trockeneis immer Schutzhandschuhe und eine Schutzbrille. Berühren Sie das Trockeneis nicht, schlucken Sie es nicht und kosten Sie es nicht. Geben Sie den Schüler*innen klare Anweisungen über die Gefahr und den Abstand, in dem sie von der Demonstration entfernt sitzen sollten, da der Komet "spucken" kann.
- Verschließen Sie das Trockeneis nicht in einem Behälter, da es zu explosiven Ausgasungen kommen kann!
- Entsorgen Sie den Kometen draußen in einem gut belüfteten Bereich, zu dem die Schüler*innen keinen Zugang haben.
- Lagern Sie Trockeneis niemals in einem Gefrierschrank.
- Führen Sie das Experiment in einem gut belüfteten Raum durch.

Anweisungen

Bitte beachten Sie das begleitende Video: Teach with space – Cooking a comet | VCo3.

1. Legen Sie die Schüssel mit einem Müllsack aus. Wir empfehlen Ihnen, die Schale in den Müllbeutel zu stellen und die Schale mit der obersten Schicht auszukleiden. So lässt sich der Komet später leichter entsorgen. Achten Sie darauf, dass der Beutel an der Innenseite der Schüssel glatt ist.
2. Fügen Sie die folgenden Zutaten hinzu: Wasser, Erde, Kohlestaub, Wein/Alkohol, Reinigungsmittel und Sojasauce. Diese stellen einige der Bestandteile eines echten Kometen dar. Freiwillige aus der Klasse können sich beteiligen, indem sie einige der Zutaten hinzufügen. Mischen Sie die Zutaten gut mit dem Holzlöffel.
3. Fügen Sie das Trockeneis zu der Mischung hinzu. Rühren Sie die Mischung mit dem Holzlöffel um. Es ist hilfreich, wenn eine Hilfsperson die Schüssel während des Mischens kippt. Ziehen Sie dann die Schutzhandschuhe an und formen Sie den Kometen etwa 30 Sekunden lang zu einem Klumpen. Wenn der Komet nicht leicht zusammenklebt, fügen Sie etwas mehr Wasser hinzu. Nicht zu stark zusammendrücken, sonst könnte der Komet zerbrechen.
4. Wenn die Demonstration beendet ist, legen Sie den Kometen in die Schale und entfernen Sie die Schale vorsichtig aus dem Müllbeutel, wobei man den Kometen in den Müllbeutel einschließt. Legen Sie den Müllbeutel in den Eimer. Achte darauf, dass der Müllbeutel noch offen ist, damit die Gase entweichen können. Entsorgen Sie den Kometenkern an einem Ort im Freien, der nur begrenzt zugänglich ist. Das Trockeneis im Kometenkern sollte innerhalb von 24 Stunden sublimieren.

Tipp: Wenn das Experiment am Vormittag durchgeführt wird, können die Schülerinnen und Schüler am Nachmittag zurückkehren, um zu sehen, wie sich der Komet entwickelt hat.

Übung macht den Kometen besser! Um die besten Ergebnisse zu erzielen, kann es hilfreich sein, einige Male zu üben, bevor man das Experiment mit den Schüler*innen durchführt.

Diskussion

Inwiefern entsprechen die Bestandteile dem, was wir in tatsächlichen Kometenkernen finden? Was sind die Auswirkungen auf das Leben auf unserem Planeten?

Die ersten spektroskopischen Beobachtungen von Kometen fanden Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts statt. Die **Spektroskopie** ermöglichte es den Astronom*innen, die chemische Zusammensetzung der Kometen aufzudecken. Bei diesen frühen Beobachtungen wurden zweiatomiger Kohlenstoff, Natriumionen und eine Vielzahl von Molekülen auf Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffbasis festgestellt.

Im Jahr 1950 schlug der US-amerikanische Astronom Fred Whipple ein neues Modell zur Beschreibung eines Kometenkerns vor. Whipples Modell des "**schmutzigen Schneeballs**" besagt, dass Kometen einen eisigen Kern haben, der aus Spuren von Staub, Gestein und meist gefrorenen flüchtigen Stoffen wie **Wasser, Kohlendioxid, Methan und Ammoniak** besteht. Später bestätigten boden- und welt-raumgestützte Beobachtungen das Modell von Whipple, obwohl einige kleine Änderungen notwendig waren, da die Beobachtungen zeigten, dass die Kometenkerne größer und dunkler sind als im Modell beschrieben.

Eine kürzlich durchgeführte Untersuchung des Kometen 103P/Hartley zeigte, dass sein **Wassergehalt** das gleiche Isotopenverhältnis von Deuterium (schweres Wasser) zu Wasserstoff aufweist wie die Ozeane der Erde. Dies war eine sehr wichtige Entdeckung. Wasser ist ein Schlüsselmolekül für das Leben, wie wir es kennen. Es ist ein universelles Lösungsmittel, in dem sich verschiedene chemische Komponenten auflösen können. Wissenschaftler*innen glauben, dass Wasser der Schlüssel für die Entwicklung des Lebens ist. Kometeneinschläge zu Beginn der Erdgeschichte könnten eine wichtige Quelle für den ursprünglichen Wasservorrat der Erde gewesen sein.

Der **Kohlenstoffgehalt** von Kometen ist von Bedeutung, da alles Leben, wie wir es kennen, auf Kohlenstoff basiert. Diese Schlüsselzutat für das Leben auf der Erde könnte durch Kometeneinschläge geliefert worden sein.

Die Sojasauce steht für die in Kometen vorhandenen **Aminosäuren** und Aminosäurevorläufer. Im Jahr 2004 nahm die Stardust-Mission der NASA Proben des Staubs in der Koma des Kometen 81P/Wild, die zur Erde zurückgeschickt wurden. Die Analyse dieses Staubs bestätigte das Vorhandensein von Glycin, der einfachsten Aminosäure. Dies war von enormer Bedeutung. Aminosäuren sind die Bausteine für Proteine. Als solche sind sie ein wichtiger Baustein des Lebens selbst. Der Fund dieser biologischen Moleküle (chemische Formel $C_2H_5NO_2$) auf einem Körper, der nicht die Erde ist, könnte für die Wissenschaftler*innen ein konkreter Hinweis darauf sein, dass einige der Zutaten für das Leben auf unserem Planeten vielleicht von Kometeneinschlägen vor Milliarden von Jahren mitgebracht wurden.

Neben dem **Kohlendioxid** (Trockeneis), das bei der Demonstration verwendet wurde, wurden mit Hilfe der Spektroskopie auch andere Gase in den Komae von Kometen entdeckt. Dazu gehören (aber nicht nur) die in Tabelle 1 aufgeführten 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	Cyanwasserstoff

↑ Gase, die in den Kernen von Kometen gefunden werden.

Was ist Trockeneis?

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

Der Prozess der Sublimation, bei dem Kohlendioxid direkt von einem Feststoff in ein Gas umgewandelt wird, ist für die Bildung der Koma eines Kometen verantwortlich. Der umgekehrte Prozess wird Resublimation oder Ablagerung genannt. Bei normalem Atmosphärendruck verwandelt sich Kohlendioxid bei -78 °C direkt von einem Gas in einen Feststoff und bildet Trockeneis.

Was sind die weißen Wolken/Dämpfe, die während der Demonstration zu sehen sind?

Wenn das bei der Demonstration verwendete Trockeneis über -78 °C steigt, sublimiert es und bildet ein kaltes Gas. Dadurch kühlt der in der Umgebungsluft vorhandene Wasserdampf ab, der kondensiert und die beobachteten weißen, wogenden Wolken bildet.

Was verursacht die explosive Ausgasung, die bei der Demonstration zu sehen ist?

Bei dieser Aktivität, bei der sich der analoge Kometenkern bildet, sind zwei konkurrierende Faktoren am Werk. Flüssiges Wasser kommt in thermischen Kontakt mit Trockeneis, das eine Temperatur unter -78 °C hat - das flüssige Wasser gefriert und bildet einen "Eiskäfig" um das Trockeneis. Wenn das Trockeneis in Wärmekontakt mit Material über -78 °C kommt, beginnt es zu sublimieren. Der Übergang des Trockeneises von der festen in die gasförmige Phase führt zu einer Volumenänderung von mehr als dem 600-fachen. Das bedeutet, dass sublimierende Taschen aus Trockeneis gelegentlich explosionsartig durch die Wassereiskruste des Kerns ausgasen. Aus diesem Grund wird das Tragen eines Schutzkittels, von Schutzhandschuhen und einer Schutzbrille dringend empfohlen.

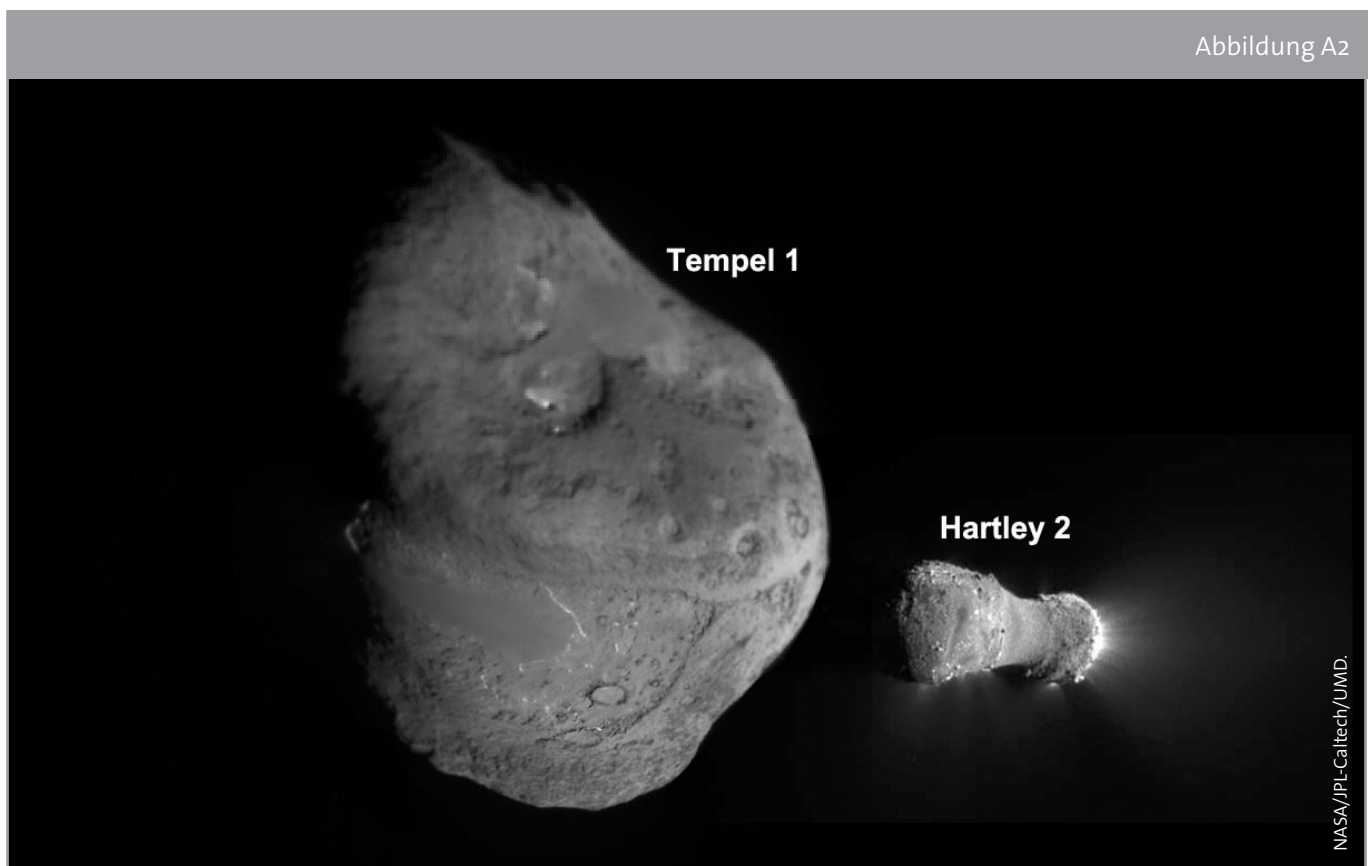
Welche Form und wie groß sind die Kerne von Kometen?

Eine Reihe von **Vorbeiflügen**¹⁰ von Raumsonden haben eine Vielzahl von Formen und Größen von Kometenkernen bestätigt. Zu diesen Missionen gehören Giotto (ESA - Komet 1P/Halley und Komet 26P/Grigg-Skjellerup), Stardust (NASA - Komet 81P/Wild und Komet 9P/Tempel), Deep Impact (NASA - Komet 9P/Tempel und Komet 103P/Hartley) und Rosetta (ESA - Komet 67P/Churyumov-

¹⁰ **Vorbeiflug:** enger Vorbeiflug eines Raumfahrzeugs an einem Planeten oder einem anderen Himmelskörper. Nutzt das Raumfahrzeug das Gravitationsfeld des Planeten, um seine Geschwindigkeit zu erhöhen und seine Flugbahn zu ändern, spricht man von einem Swing-by Manöver.

Gerasimenko). In der maßstabsgetreuen Abbildung A2 ist die Längsachse des Kerns von Komet 103P/Hartley etwa 2,2 km lang, und der Kern von Komet 9P/Tempel ist an seiner längsten Stelle etwa 7,6 km lang. Vorläufige Messungen, die von der ESA-Mission Rosetta bei der Ankunft am Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko durchgeführt wurden, bestätigen, dass seine längste Abmessung 4,1 km beträgt.

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

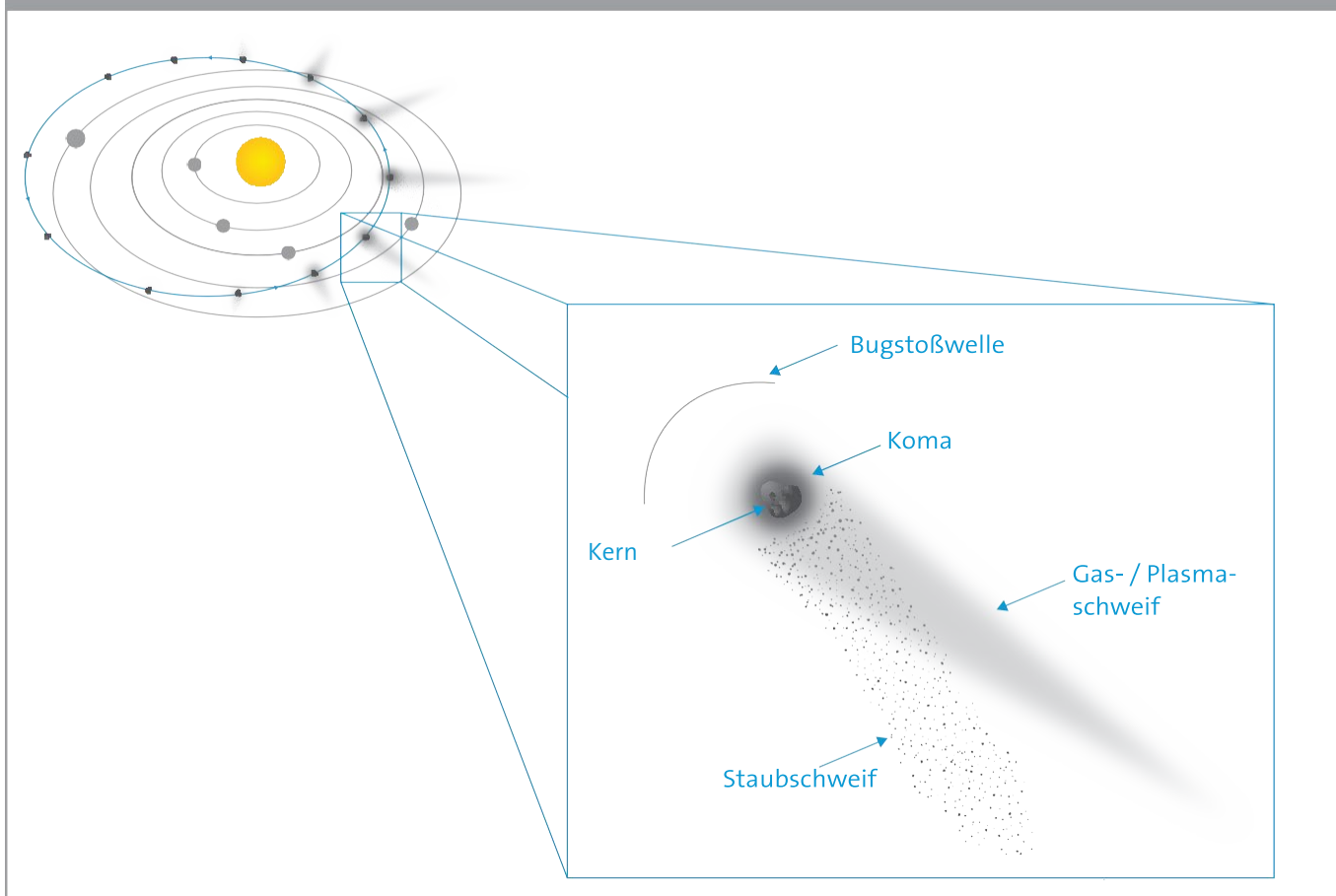


↑ Größenvergleich der Kerne des Kometen 9P/Tempel und Komet 103P/Hartley.

Warum sind manche Kometenschweife so unterschiedlich geformt?

Die Form und das Aussehen der Kometenschweife sind auf die Wechselwirkung zwischen dem Sonnenwind und der Sonnenstrahlung mit dem vom Kern ausgestoßenen Material zurückzuführen. Oft sind zwei Schweife zu sehen, die in unterschiedliche Richtungen zeigen. Einer zeigt immer direkt von der Sonne weg. Dies ist der Plasma- oder Ionenschweif. Das ultraviolette Licht der Sonne ionisiert die Gase in der Koma. Diese ionisierten Teilchen werden dann durch den Sonnenwind vom Kometen weggezogen. Der andere Schweif ist der Staubschweif, der durch den Druck der Sonnenstrahlung entsteht, der die kleinen festen Teilchen in der Koma von der Sonne wegdrückt. Der Staubschweif macht einen leichten Bogen in die Richtung, aus der der Komet gekommen ist (Abbildung A3). Da die Sonnenaktivität, die Kernrotation und die Ausgasungsgeschwindigkeiten von Komet zu Komet sehr unterschiedlich sind, kann man eine Fülle verschiedener Schweifformen beobachten.

Abbildung A3

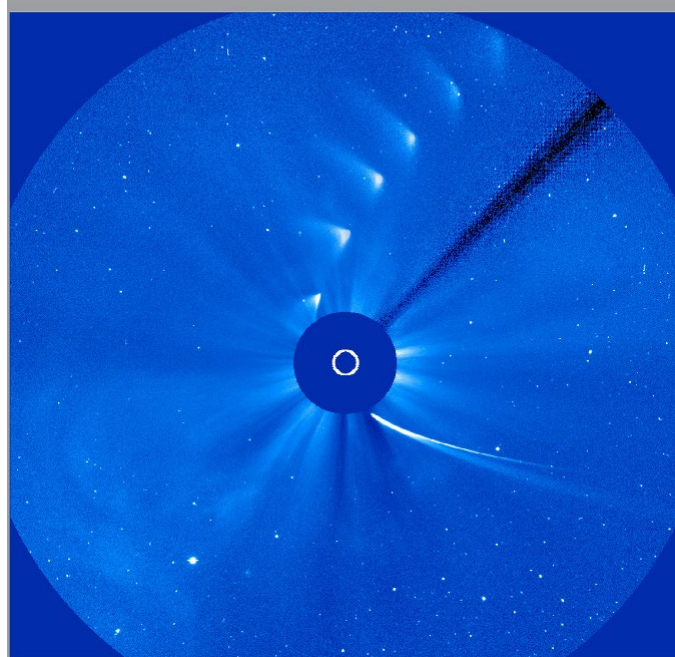


↑ Ein Diagramm, das die beiden Schweife eines Kometen zeigt und wie sie sich auf der Umlaufbahn des Kometen um die Sonne verändern.

Wie lange hält ein Kometenkern?

Kometen verlieren bei jedem Vorbeiflug an der Sonne flüchtige Stoffe (z. B. Kohlendioxid und Wasser) und Staub, wobei sie Trümmerspuren hinterlassen. Dies bedeutet, dass ein bestimmter Kometenkern nur eine begrenzte Anzahl von Vorbeiflügen an der Sonne haben kann, bevor alle seine flüchtigen Bestandteile aufgebraucht sind. Ein Beispiel hierfür ist der Komet 2012/S1 ISON, ein sogenannter **Sungrazing Comet**¹¹, der sich 2013 zum ersten Mal einem Perihel näherte (Abbildung A4). Der Komet 2012/S1 ISON hat offenbar kurz vor seinem Vorbeiflug an der Sonne aufgehört, Gas und Staub zu produzieren.

Abbildung A4



↑ Die Begegnung des Kometen ISON mit der Sonne, gesehen vom ESA/NASA-Satelliten SOHO von 28. bis 30. November 2013.

¹¹ **Sungrazing Comets** sind Kometen, die bei einem Vorbeiflug der Sonne sehr nahekommen, sie fast „berühren“.

Welche Effekte können die Umlaufbahn eines Kometen während seiner größten Annäherung an die Sonne verändern?

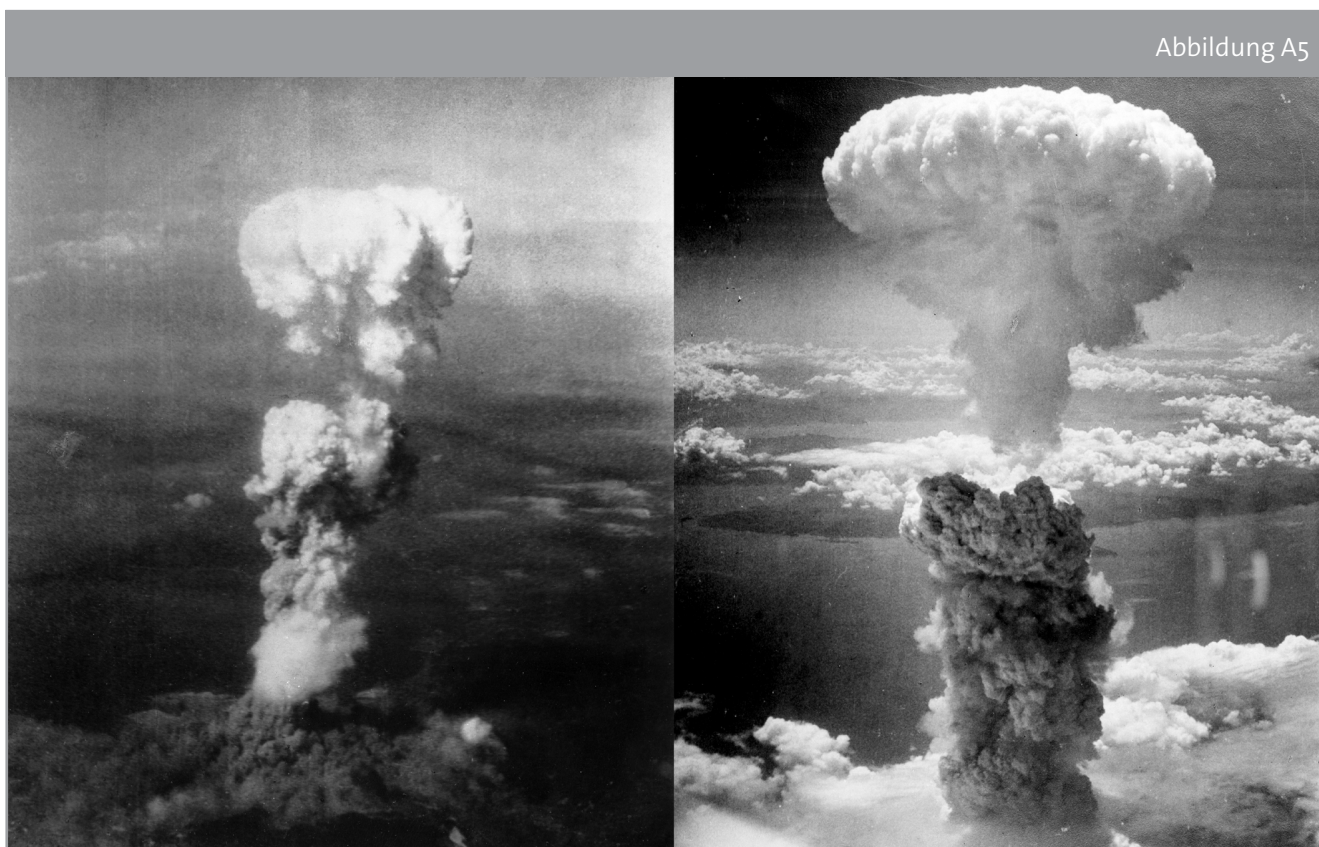
Wenn sich die flüchtigen Bestandteile eines Kometenkerns (wie Kohlendioxid und Wasser) bei seiner Annäherung an die Sonne zu erhitzen beginnen, kann das Ausgasen einen Rückstoßeffekt erzeugen. Das ausgestoßene Gas übt eine gleich große und entgegengesetzte Kraft (drittes Newtonsches Gesetz) auf den Kometen aus und verleiht ihm so einen leichten Schub. Dies kann dazu führen, dass sich die Umlaufbahn des Kometen und auch seine Umlaufzeit um die Sonne leicht verändern, da der Kern von seiner vorhergesagten Bahn abgelenkt wird. Da sich die meisten Kometenkerne auch noch drehen (vielleicht um mehrere Achsen und sowohl vorwärts als auch seitwärts taumelnd), können die Abweichungen von Komet zu Komet sehr unterschiedlich sein.

Erweiterung der Diskussion –

Können Kometen oder Asteroiden jemals die Erde treffen?

Anhand der Erkenntnisse, die bei den von verschiedenen Nationen seit 1945 durchgeführten Nuklearexplosionen gewonnen wurden, und der Gleichung der kinetischen Energie ist es möglich, die Größe des Impaktors, der den Meteoritenkrater verursacht hat, annähernd zu bestimmen.

Die Energie von Kernwaffen wird in Kilotonnen (kt) gemessen, wobei 1 kt der Energieausbeute von 1000 Tonnen TNT entspricht. $1 \text{ kt} = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ J}$. 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: Atombombenabwurf auf Nagasaki.

Um einen Krater von der Größe des Meteoritenkraters zu erzeugen, bräuchte man bei der Art von Gestein, die in diesem Gebiet gefunden wurde, etwa 2,5 Mt (2500 kt) oder etwa 125 Hiroshima-Bomben. Ein mathematisches/Computersimulationsmodell legt nahe, dass der Impaktor mit einer Geschwindigkeit von etwa $12,8 \frac{km}{s}$ auf die Erde traf. Dies liefert genügend Informationen, um die ungefähre Größe des Impaktors zu berechnen.

Es gibt viele Fragmente des Impaktors, die den Meteoritenkrater gebildet haben, die über die umliegende Landschaft verstreut sind. Die Analyse dieser Fragmente zeigt, dass der Impaktor zu 92 % aus Eisen und zu 7 % aus Nickel bestand (die restlichen 1 % enthielten Silikateinschlüsse und andere Spurenelemente). Der Impaktor hatte eine mittlere Dichte von etwa $7000 \frac{kg}{m^3}$.

Mit diesen Informationen lassen sich die folgenden Berechnungen anstellen, wobei davon ausgegangen wird, dass die gesamte kinetische Energie des Impaktors in Sprengenergie umgewandelt wurde, um den Krater zu bilden:

1. Zusammenfassung der Parameter:

Kinetische Energie $E_{kin} = 2500kt$

Eintrittsgeschwindigkeit $v = 12,8 \frac{km}{s}$

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

Dichte des Eisenmeteoriten $\rho = 7000 \frac{kg}{m^3}$

2. Rechnen Sie die Energie, die benötigt wird, um den Krater auszusprengen, in Joule um.

$$E_{kin} = 2500kt = 2500 \cdot 4,2 \cdot 10^{12}J = 1,05 \cdot 10^{16}J$$

3. Berechnen Sie mit Hilfe der Gleichung der kinetischen Energie die Masse des Impaktors.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Umstellung nach m:

$$m = \frac{2 \cdot E_{kin}}{v^2}$$

$$m = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{16}J}{(12,8 \cdot 10^3 \frac{m}{s})^2} = 128 \cdot 10^6 kg = 128000t$$

4. Berechnen Sie mit Hilfe der Dichtegleichung das Volumen des Impaktors.

Da Dichte = Masse pro Volumen ist, folgt:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{128 \cdot 10^6 kg}{7000 \frac{kg}{m^3}} = 1,83 \cdot 10^4 m^3$$

5. Unter der Annahme, dass der Impaktor kugelförmig ist, ist der Radius des Impaktors mit Hilfe der Kugelgleichung zu berechnen. Alternativ kann man den Impaktor auch als Würfel

modellieren. Und da das Volumen einer Kugel $V = \frac{4}{3}r^3\pi$

ist, ergibt sich durch das Umstellen nach r:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{V}{\pi}}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{1,83 \cdot 10^4 m^3}{\pi}}$$

$$r = \sqrt[3]{4368,803 m^3}$$

$$r = 16,3 m$$

Die Schüler*innen können dann die Beschränkungen/Unsicherheiten der bei der Modellierung getroffenen Annahmen untersuchen, z. B:

- die Annahme einer 100%igen Umwandlung der kinetischen Energie. Die Energie wäre auch in anderen Formen verloren gegangen, z. B. durch Schall und thermische Erwärmung der Atmosphäre.
- die Unsicherheit bei der Aufprallgeschwindigkeit. Dieser Wert wurde aus Beobachtungen eines alten Einschlagskraters abgeleitet und könnte daher ungenau sein und zu einer falschen Größenberechnung führen.
- die Auswirkung des Einschlagswinkels. Die Gesteinsmenge, die verdampft/ausgeschleudert wird, hängt vom Einschlagswinkel ab. Da viele der ursprünglichen Faktoren aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden, hat der Eintrittswinkel einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Das Experimentieren mit verschiedenen Einschlagswinkeln für denselben Impaktor unter Verwendung des Down2Earth-Einschlagssimulators (siehe unten und Abschnitt Links) könnte dazu beitragen, diesen Punkt zu vertiefen.

Online-Impaktsimulator – 'Down2Earth'

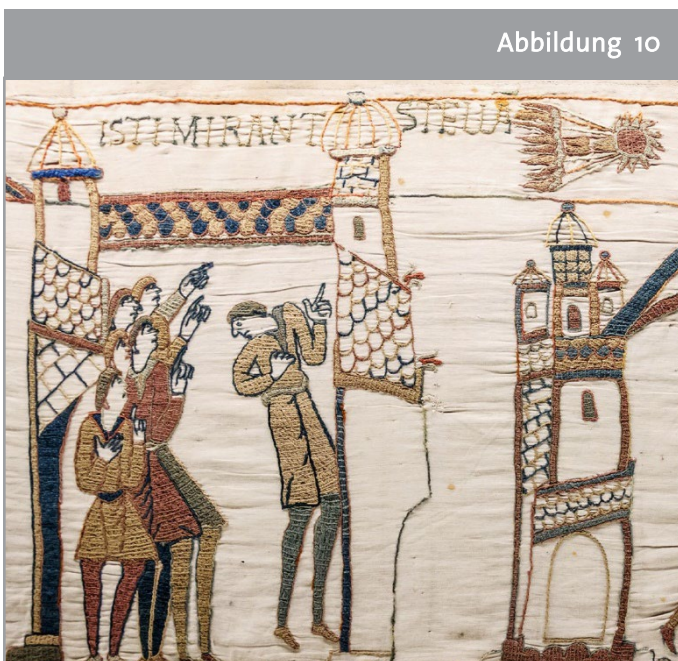
Down2Earth (siehe Abschnitt "Links") ist ein webbasierter Einschlagssimulator für Bildungszwecke, der es den Schüler*innen ermöglicht, Parameter für einen Einschlag festzulegen, z. B. die Zusammensetzung des Impaktors (Asteroid oder Komet), den Einschlagswinkel, die Größe, die Art des Gesteins an der Einschlagstelle und den Einschlagsort. Die Schüler*innen können die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Kratergröße vorhersagen und diese mit den Energieübertragungen beim Einschlag in Verbindung bringen. Die Schüler*innen können ihre Vorhersagen dann in einer virtuellen Umgebung testen.

→ FAZIT

Kometen bieten einen interessanten Rahmen für die Vermittlung vieler verschiedener Unterrichtsthemen, von Gravitationsfeldern und Umlaufbahnen über kinetische Energie und Energieübertragung bis hin zur Kometenspektroskopie und den Voraussetzungen für Leben. Unsere Faszination für diese gefrorenen Welten bietet eine Fülle von spannenden Lernmöglichkeiten.

Giotto

Der Komet 1P/Halley hat eine Umlaufzeit von etwa 75,5 Jahren (die Zahl schwankt leicht von Umlauf zu Umlauf aufgrund von Ausgasungen aus seinem Kern und Gravitationsstörungen). Dieser Komet wurde von der Erde aus (mit bloßem Auge) regelmäßig beobachtet, und seit etwa 240 v. Chr. wurden Sichtungen aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen dieser Beobachtungen haben es den Astronom*innen ermöglicht, die Umlaufbahn des Kometen 1P/Halley auf einige Monate um das Perihel einzugrenzen. Eine berühmte Aufzeichnung der Sichtbarkeit des Kometen 1P/Halley von der Erde aus wurde auf dem Wandteppich von Bayeux gemacht, der die Schlacht von Hastings im Jahr 1066 darstellt (Abbildung 10).



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



↑ Giotto bereit für den solaren Simulationstest. © ESA

In jüngerer Zeit, im Jahr 1986, näherte sich der Komet 1P/Halley zum ersten Mal seit Beginn des Welt-
raumzeitalters der Sonne. Die ESA-Raumsonde Giotto (Abbildung 11) flog in weniger als 600 km Entfernung an seinem Kern vorbei und lieferte die ersten Nahaufnahmen eines Kometenkerns (Abbildungen 12 und 13). Diese Beobachtungen veränderten das Verständnis der Wissenschaftler*innen für diese eisigen Objekte.

Giotto beobachtete, dass die Oberfläche des Kometenkerns sehr dunkel war, schwärzer als Kohle: Dies deutete darauf hin, dass er von einer Staubschicht bedeckt war. Die Daten zeigten, dass die Häufigkeit bzw. das Verhältnis der leichten Elemente (Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff) im Kometen 1P/Halley derjenigen der Sonne ähnelt, was bedeutet, dass er aus dem ursprünglichen Material besteht, aus dem sich das Sonnensystem gebildet hat.

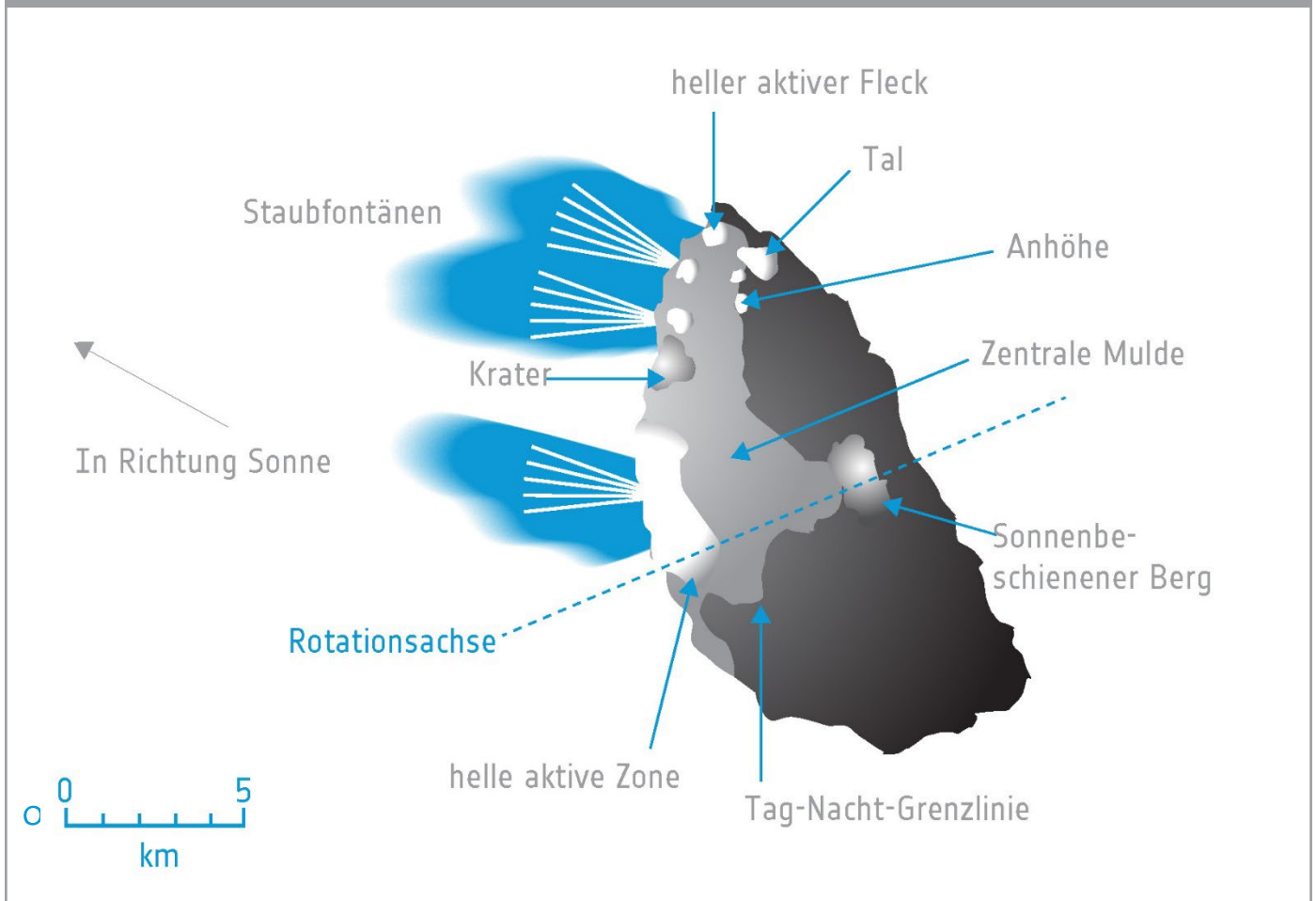
Die Bildmontage in Abbildung 12 zeigt weitere Merkmale, die sichtbar wurden, als sich das Raumschiff dem Kern näherte.



↑ Der Kern des Kometen 1P/Halley, wie er von Giotto bei seiner nächsten Annäherung gesehen wurde.



↑ Bild des Kerns des Kometen 1P/Halley, wie er von Giotto gesehen wurde.



↑ Die wichtigsten Merkmale auf den von der ESA-Sonde Giotto gelieferten Bildern des Kometen 1P/Halley.

Abbildung 14 zeigt Merkmale, die aus einem Bild des Kometenkerns von 1P/Halley interpretiert wurden (Abbildung 13). Es sind Materialstrahlen oder Staubfontänen zu sehen, die aus der Oberfläche des Kerns austreten. Dies wird durch die schnelle Sublimation der flüchtigen Stoffe auf und nahe der Oberfläche des Kerns verursacht. Da der Druck dieser sich ausdehnenden flüchtigen Stoffe zunimmt, werden sie schließlich in einem Prozess freigesetzt, der als Ausgasen bekannt ist.

SOHO - Sonnen- und Heliosphärisches Observatorium

Das ESA/NASA Solar and Heliospheric Observatory, kurz SOHO, beobachtet die Sonne aus einer Entfernung von 1,5 Millionen Kilometern von der Erde (Abbildung 15). Hier hält die kombinierte Schwerkraft der Erde und der Sonne die Sonde auf einer Umlaufbahn, die mit der Linie Erde-Sonne verbunden ist. Von dieser Position aus hat SOHO einen ununterbrochenen Blick auf die Sonne und kann daher 24 Stunden am Tag Beobachtungen machen.

SOHO wurde entwickelt, um die innere Struktur der Sonne, ihre ausgedehnte äußere Atmosphäre (die Korona) und den Ursprung des Sonnenwindes zu untersuchen. Seit seinem Start im Jahr 1995 hat SOHO die Sonne über einen kompletten Sonnenzyklus hinweg beobachtet und den Wissenschaftlern wertvolle Daten geliefert, die zum Verständnis der Höhen und Tiefen des langfristigen Verhaltens der Sonne beitragen.

Von seinem einzigartigen Beobachtungspunkt aus hatte SOHO auch die Möglichkeit, Tausende von sonnenumlaufenden Kometen zu beobachten, darunter auch den Kometen 2012/S1 ISON, der sich 2013 dem Perihel näherte. SOHO ist einer der größten Kometenentdecker aller Zeiten und hat seit seinem Start mehr als 2700 Kometen entdeckt.

Abbildung 14



↑ Künstlerische Darstellung von SOHO.

Komet 103P/Hartley und Herschel

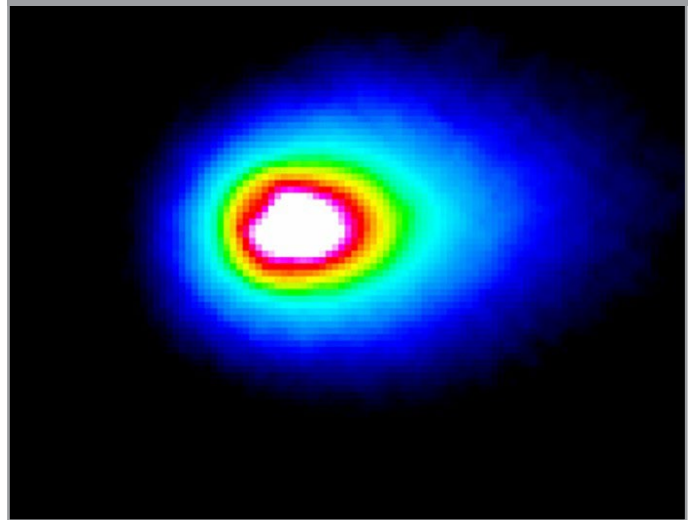
Das Herschel-Infrarot-Weltraumobservatorium der ESA (Abbildung 16) wurde 2009 gestartet und trug das größte und leistungsstärkste Infrarot-Teleskop, das jemals ins All geflogen ist. Es war das erste Observatorium, das den gesamten Bereich vom fernen Infrarot bis zum Submillimeterbereich abdeckte. Die Beobachtungen von Herschel reichten weiter in das ferne Infrarot hinein als alle vorherigen Missionen, indem sie ansonsten unsichtbare staubige und kalte Regionen des Kosmos sowohl in der Nähe als auch in der Ferne untersuchten.

Abbildung 16



↑ Künstlerische Darstellung des Infrarot-Weltraumobservatoriums Herschel.

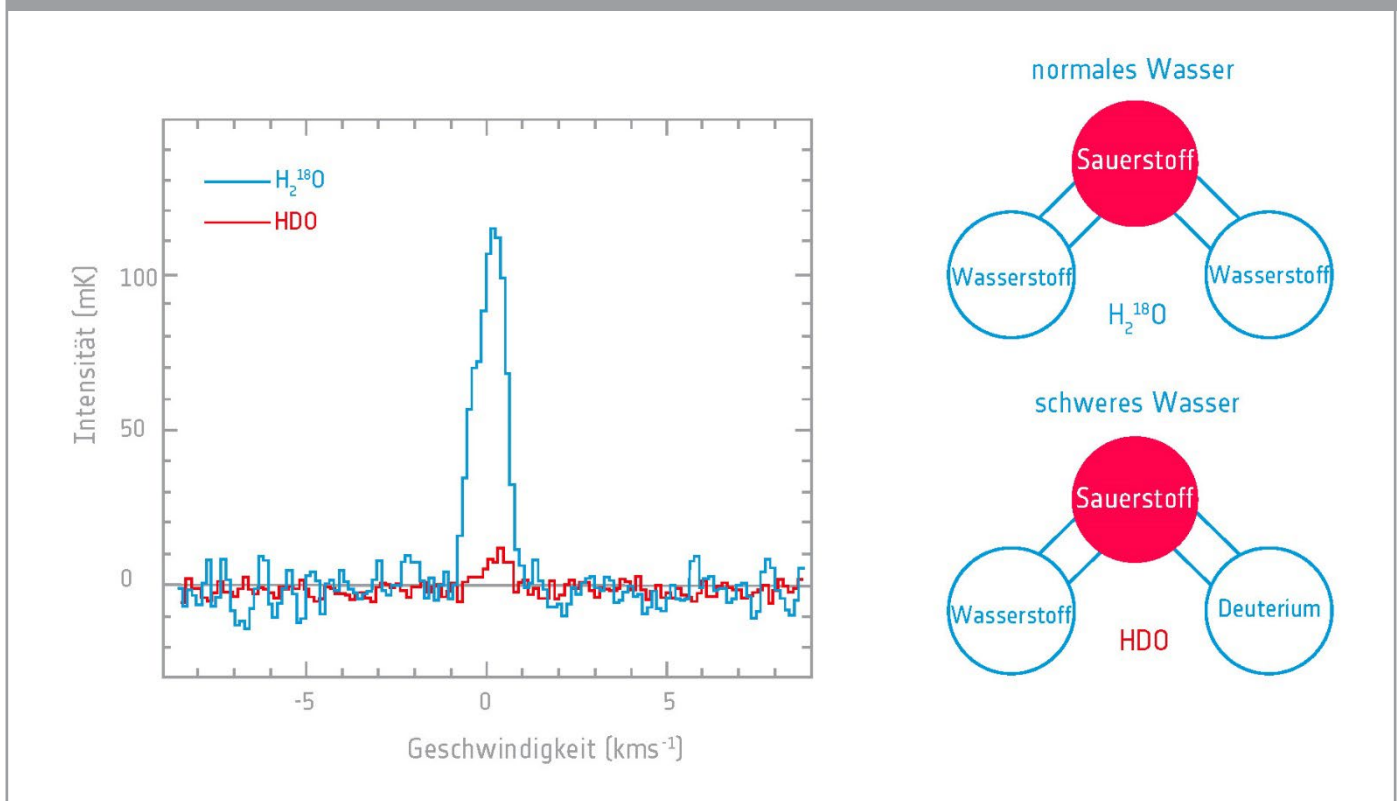
Abbildung 17



↑ Der Komet 103P/Hartley, gesehen vom PACS-Instrument des Herschel-Infrarot-Weltraumobservatoriums.

Im Jahr 2010 führte Herschel spektroskopische Beobachtungen des Kometen 103P/Hartley im fernen Infrarot durch und beobachtete die Emission großer Mengen von Wasser aus seinem Kern, wie in Abbildung 17 rot und weiß dargestellt. Diese Beobachtungen wurden in der Nähe des Perihels des Kometen (der größten Annäherung an die Sonne) durchgeführt.

Die mit dem HIFI-Instrument an Bord von Herschel durchgeführten Infrarot-Spektroskopie-Messungen ermöglichten Schätzungen des Verhältnisses von Deuterium ("schwerer Wasserstoff" - Wasserstoffatome, die neben einem Proton auch ein Neutron in ihrem Kern haben) zu Wasserstoff in dem vom Kometenkern abgegebenen Wasser (d. h. das Verhältnis von normalem Wasser zu Deuterium; Abbildung 18). Es wurde festgestellt, dass der Wassergehalt dieses speziellen Kometen im Gegensatz zu anderen beobachteten Kometen ein identisches Verhältnis zum Wassergehalt der Ozeane der Erde aufweist. Dies war der erste direkte Beweis für die Theorie, dass der ursprüngliche Wassergehalt der Erde aus der gleichen Quelle stammt wie einige Kometen.



↑ Mit einem zusätzlichen Neutron in einer der Wasserstoffkomponenten des Moleküls erzeugt schweres Wasser einen kleineren Spektralpeak.

Rosetta

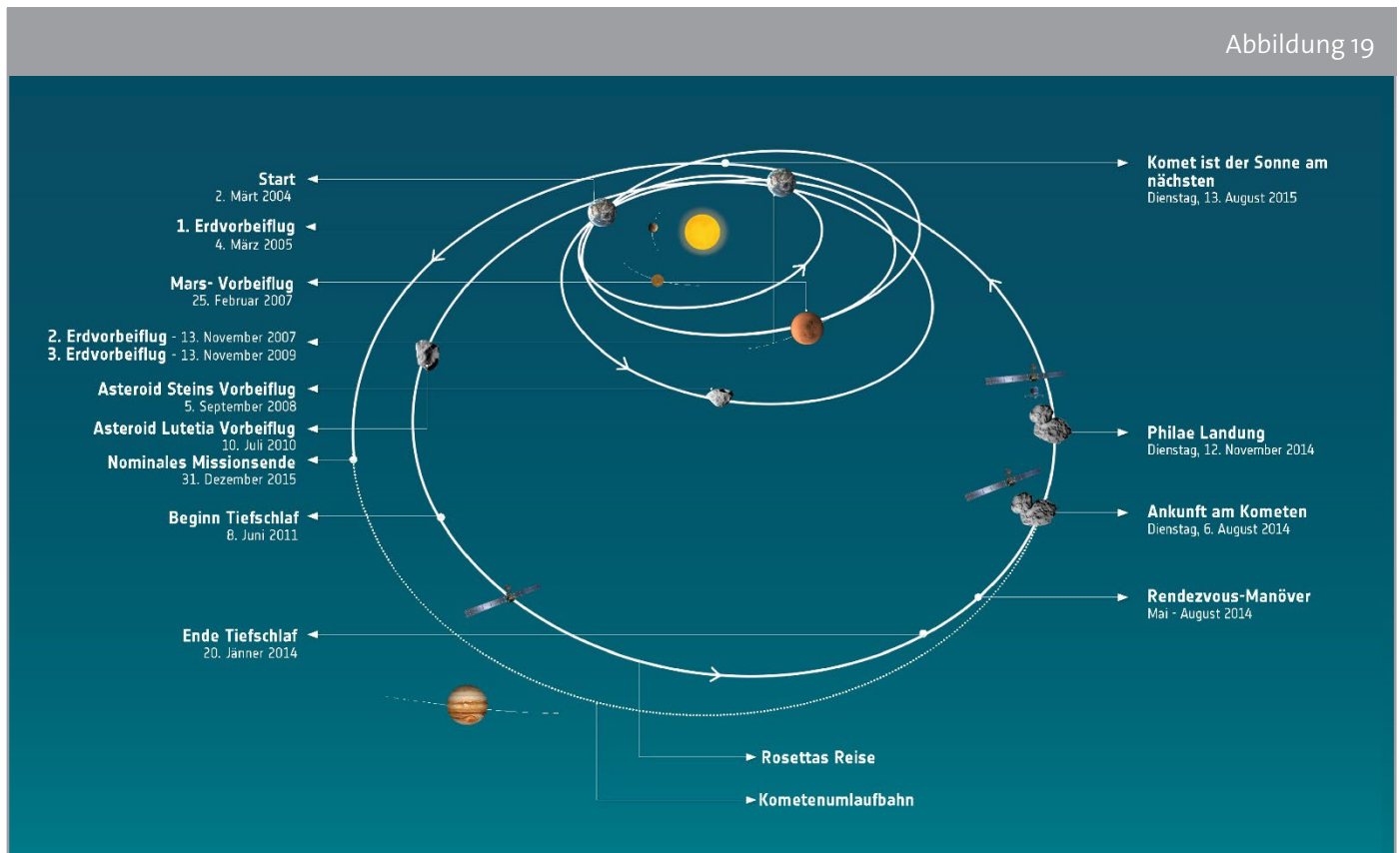
Die ESA-Mission Rosetta zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko wurde 2004 zu einer zehnjährigen Reise gestartet, um ein Rendezvous mit einem Kometenkern zu erreichen und auf diesem zu landen.

Das Hauptziel von Rosetta war es, zum Verständnis der Entstehung und Entwicklung des Sonnensystems beizutragen. Die Zusammensetzung eines Kometen spiegelt die des präsolaren Nebels wider, aus dem die Sonne und die Planeten des Sonnensystems vor mehr als 4,6 Milliarden Jahren entstanden sind. Eine eingehende Analyse des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko durch Rosetta und seinen Lander wird wesentliche Informationen zum Verständnis der Entstehung des Sonnensystems liefern.

Es gibt überzeugende Beweise dafür, dass Kometen eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung der Planeten spielten, denn Kometeneinschläge waren im frühen Sonnensystem viel häufiger als heute. Kometen könnten zum Beispiel Wasser auf die Erde gebracht haben. Die Chemie des Wassers im Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko wird analysiert, um herauszufinden, ob es mit den Ozeanen der Erde vergleichbar ist. Neben Eis und Staub enthalten Kometen viele komplexe Moleküle, darunter auch organische Stoffe, die bei der Entwicklung des Lebens auf der Erde eine entscheidende Rolle gespielt haben könnten.

Um zum Kometen zu gelangen, musste Rosetta eine Reihe von Manövern durchführen, bei denen die Schwerkraft eines Himmelskörpers genutzt wird, um die Sonde zu beschleunigen (Abbildung 19). Um tiefer in den Weltraum vorzudringen, musste Rosetta vier solcher Manöver durchführen, darunter drei

nahe Vorbeiflüge an der Erde und einer am Mars. Jedes Schleudermanöver veränderte die kinetische Energie von Rosetta und damit die Geschwindigkeit der Raumsonde, wodurch sich die Abmessungen der elliptischen Umlaufbahn änderten.



↑ Die ESA-Raumsonde Rosetta führte eine Reihe von Manövern durch, um ihr Ziel zu erreichen.

Angesichts der langen Reise wurde Rosetta im Juni 2011 in den Tiefschlaf versetzt, um den Strom- und Treibstoffverbrauch zu begrenzen und die Betriebskosten zu minimieren. Fast alle elektrischen Systeme von Rosetta wurden abgeschaltet, mit Ausnahme des Computers und einiger Heizungen.

Im Januar 2014 weckte Rosettas vorprogrammierter interner "Wecker" die Raumsonde vorsichtig auf, um sie auf ihr Rendezvous mit dem Kometen 67P/Churyumov-Gerasimeko vorzubereiten. Nach dem Aufwachen wurden die 11 wissenschaftlichen Instrumente des Orbiters und die 10 Instrumente des Landers reaktiviert und für wissenschaftliche Beobachtungen vorbereitet. Anschließend wurde eine Reihe von zehn kritischen Bahnkorrekturmanövern durchgeführt, um die Geschwindigkeit der Raumsonde relativ zum Kometen zu verringern und so seine elliptische Umlaufbahn anzupassen.

Nachdem Rosetta am 6. August 2014 den Kometen 67P/Churyumov-Gerasimeko erreicht hatte, begann sie mit weiteren Manövern, um in eine "Umlaufbahn" um den Kometenkern zu gelangen. Von diesem Aussichtspunkt aus können die Instrumente von Rosetta eine detaillierte wissenschaftliche Untersuchung des Kometen vornehmen und die Oberfläche in noch nie dagewesener Detailtreue kartieren (Abbildung 20).

Abbildung 20



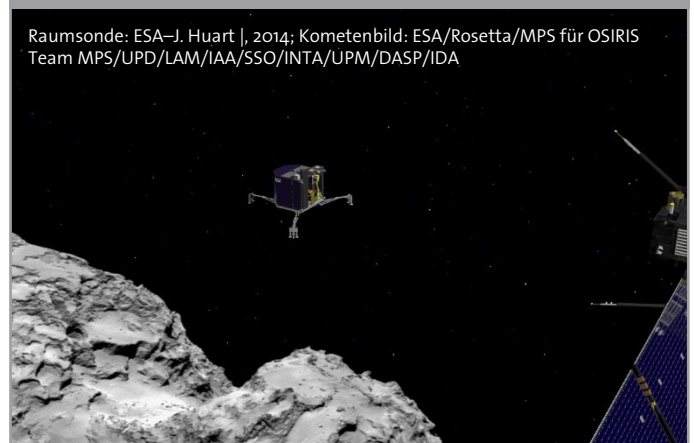
↑ NAVCAM-Mosaik aus vier Bildern des Kometen 67P/Churyumov Gerasimenko, aufgenommen am 19. September 2014, als Rosetta 28,6 km vom Kometen entfernt war.

Nach der Landung begleitet Rosetta den Kometen weiterhin auf seiner elliptischen Reise. Rosetta wird mit dem Kometen zurück in Richtung inneres Sonnensystem beschleunigen und weiterhin aus nächster Nähe beobachten, wie sich der eisige Kometenkern bei seiner Annäherung an die Sonne aufheizt.

Nachdem Rosetta den Kometenkern mehrere Monate lang kartiert und analysiert hat, setzt sie im November 2014 ihren Lander Philae aus, um die erste Landung auf einem Kometenkern zu versuchen. Da der Komet eine so geringe Schwerkraft hat, hat Philae Harpunen und Eisschrauben verwendet, um sich auf der Oberfläche zu befestigen. Abbildung 14 zeigt eine künstlerische Darstellung der Landung von Philae auf der Oberfläche.

Der Lander Philae setzt dabei 10 Instrumente ein, darunter einen Bohrer zur Entnahme von Proben der Oberfläche und **Spektrometer**¹², um die Struktur und Zusammensetzung des Kometen direkt zu analysieren.

Abbildung 21



↑ Die Landefähre Philae wird noch nie dagewesene Informationen über die Oberfläche und den inneren Aufbau eines Kometen liefern.

¹² **Spektrometer:** Instrument zur Aufspaltung des Lichts in seine einzelnen Wellenlängen, mit dem die Eigenschaften der Lichtquelle gemessen werden können.

Glossar

Aphel: Punkt einer Umlaufbahn, der am weitesten von der Sonne entfernt ist.

Astronomische Einheit (AE): 1 AE ist die durchschnittliche Entfernung zwischen der Erde und der Sonne bzw. der Erdbahnradius, der etwa 150 Millionen km beträgt.

Bugstoßwelle: Oberfläche der Wechselwirkung zwischen den Ionen in der Kometenkoma und dem Sonnenwind. Die Bugstoßwelle bildet sich, weil die relative Umlaufgeschwindigkeit des Kometen und des Sonnenwinds Überschallgeschwindigkeit erreichen. Der Bugstoßwelle bildet sich stromaufwärts des Kometen in Strömungsrichtung des Sonnenwindes. In der Bugstoßwelle sammeln sich große Konzentrationen von Kometenionen an und belasten das solare Magnetfeld mit Plasma. Dies führt dazu, dass sich die Feldlinien um den Kometen herum biegen, die Kometenionen einschließen und den Gas/Plasma/Ionen-Schweif bilden.

Vorbeiflug: enger Vorbeiflug eines Raumfahrzeugs an einem Planeten oder einem anderen Himmelskörper. Nutzt das Raumfahrzeug das Gravitationsfeld des Planeten, um seine Geschwindigkeit zu erhöhen und seine Flugbahn zu ändern, spricht man von einem Swing-by Manöver.

Gravitationsstörungen: Änderungen der Bahn eines Himmelskörpers (z. B. Planet, Komet) aufgrund von Wechselwirkungen mit den Gravitationsfeldern anderer Himmelskörper (z. B. Riesenplaneten, andere Sterne).

Lagrange-Punkte: In jeder Bahnkonfiguration gibt es fünf Punkte, in denen ein Objekt, das nur von der Schwerkraft beeinflusst wird, stabil umlaufen kann. Weitere Informationen finden Sie im Video ESA teach with space - gravity wells | VPO4 (siehe Abschnitt „Links“).

Umlaufzeit: Zeit, die benötigt wird, um einmal den Zentralkörper (zB die Sonne) zu umrunden.

Perihel: Punkt auf einer Umlaufbahn, der der Sonne am nächsten ist.

Rückläufige Bewegung eines Planeten (retrograd): Scheinbare Bewegung eines Planeten am Nachthimmel in die entgegengesetzte Richtung zu dem, was normalerweise beobachtet wird (prograde Bewegung).

Sonnenwind: Ein Strom hochenergetischer Teilchen (Plasma), der von der oberen Atmosphäre der Sonne in alle Richtungen ausgestoßen wird. Er enthält hauptsächlich Elektronen und Protonen.

Sublimation: Wenn eine Substanz durch Erwärmung direkt von der festen in die gasförmige Phase übergeht und dabei den flüssigen Zustand umgeht. Wenn das Gas wieder abgekühlt wird, bildet es in der Regel eine feste Ablagerung (Resublimation).

Berechnung der Kometenmasse, Geschwindigkeit und Energie

In dieser Reihe von Fragen werdet ihr die Masse, die Geschwindigkeit und die Energie von Kometen anhand der Daten in der nachstehenden Tabelle untersuchen.

Masse der Sonne	$m_{\text{Sonne}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Dichte von Wassereis	$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Gravitationskonstante	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$

Fragen

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

$$v = 34 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Stellen Sie folgende Gleichung um, um m zu finden:

$$E_{\text{kin}} = \frac{m \cdot v^2}{2} = 4,5 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

$$m = \frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{v^2} = \frac{2 \cdot 4,5 \cdot 10^{13}}{(34 \cdot 10^3)^2} = 77.854,7 \text{ kg} \sim 78 \text{ t}$$

2. Ein großer Komet mit einer Masse von $5,2 \cdot 10^8 \text{ kg}$ hat einen Beinahezusammenstoß mit der Erde und streift die Atmosphäre. Zum Zeitpunkt der Messung betrug seine Geschwindigkeit $49,0 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Berechnung:

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

$$\begin{aligned} m &= 5,2 \cdot 10^8 \text{ kg} \\ v &= 49 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ E_{\text{kin}} &= \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{5,2 \cdot 10^8 \cdot (49 \cdot 10^3)^2}{2} = 6,24 \cdot 10^{17} \text{ J} \end{aligned}$$

- b. Wenn die Energie, die von 1 Kilotonne (1000 Tonnen) explodierender TNT freigesetzt wird, $4,2 \cdot 10^{12} \text{ J}$ beträgt, wie viele Kilotonnen Energie hätte dieser Komet gehabt, wenn er die Erde getroffen hätte?

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

$$E_{\text{impakt}} = \frac{E_{\text{kin}}}{1 \text{ kt}} = \frac{6,24 \cdot 10^{17}}{4,2 \cdot 10^{12}} = 147,6 \text{ kt}$$

- c. Nach dem Beinahezusammenstoß wurden die Masse und die Flugbahn des Kometen verändert. Nennt einen Grund dafür!

Der Komet glitt durch die Atmosphäre. Auf seinem Weg durch die Atmosphäre verliert der Komet durch thermische Effekte (durch Staudruck, obwohl die Schüler*innen oft denken, dass Reibung die Ursache ist) einen Teil seiner Masse, da das Eis sublimiert. Dadurch ändert sich seine Flugbahn.

Staudruck ist ein Druck, der auf einen Körper ausgeübt wird, der sich durch eine Flüssigkeit oder Gas bewegt. In diesem Fall bewirkt die Atmosphäre (Gas) eine starke Widerstandskraft, die auf den Körper ausgeübt wird.

$$p = \rho \cdot v^2$$

wobei p der Druck, ρ die Dichte der Flüssigkeit/des Gases und v die Geschwindigkeit des Körpers ist.

3. Ein Komet befindet sich auf einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne. Seine geringste Annäherung an die Sonne erfolgt in einer Entfernung von $4,9 \cdot 10^{10} m$. Zu diesem Zeitpunkt beträgt seine Geschwindigkeit $8,9 \cdot 10^4 \frac{m}{s}$. Er stammt aus der Oortschen Wolke, weit jenseits der Umlaufbahn des Neptuns. Wie hoch ist seine Geschwindigkeit, wenn er $1,5 \cdot 10^{11} m$ von der Sonne entfernt ist (dies ist der Abstand der Erde von der Sonne)?

Hier gilt auch die Energieerhaltung, das heißt, Energie im Perihel ist gleich Energie in der Erdentfernung, bzw.

$$E_{\text{perihel}} = E_{\text{Erde}}$$

Die Energie ergibt sich aus der kinetischen und der potentiellen Energie (Gravitationspotential)

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_{\text{Komet}} \cdot v^2}{2}$$

$$E_{\text{pot}} = - \frac{G \cdot m_{\text{Komet}} \cdot m_{\text{Sonne}}}{r}$$

$$E_{\text{perihel}} = E_{\text{kin,perihel}} + E_{\text{pot,perihel}}$$

$$E_{\text{Erde}} = E_{\text{kin,Erde}} + E_{\text{pot,Erde}}$$

$$\frac{m_{\text{Komet}} \cdot v_p^2}{2} - \frac{G \cdot m_{\text{Komet}} \cdot m_{\text{Sonne}}}{r_p} = \frac{m_{\text{Komet}} \cdot v_E^2}{2} - \frac{G \cdot m_{\text{Komet}} \cdot m_{\text{Sonne}}}{r_E}$$

$$\frac{m_{\text{Komet}}}{2} \cdot (v_p^2 - v_E^2) = G \cdot m_{\text{Komet}} \cdot m_{\text{Sonne}} \cdot \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_E} \right)$$

Bei Division durch m_{Komet} fällt dieser Ausdruck auf beiden Seiten weg.

$$\frac{1}{2} \cdot (v_p^2 - v_E^2) = G \cdot m_{\text{Sonne}} \cdot \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_E} \right)$$

$$v_p^2 - v_E^2 = 2 \cdot G \cdot m_{\text{Sonne}} \cdot \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_E} \right)$$

$$v_E^2 = v_p^2 - 2 \cdot G \cdot m_{\text{Sonne}} \cdot \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_E} \right)$$

$$v_E = \sqrt{v_p^2 - 2 \cdot G \cdot m_{\text{Sonne}} \cdot \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_E} \right)}$$

Setzen Sie nun die Werte ein:

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

$$v_E = 6,52 \cdot 10^4 \frac{m}{s} = 65,2 \frac{km}{s}$$

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

Mögliche zu erwähnende Punkte:

- Kometen, die größtenteils aus Eis bestehen, könnten einen Großteil des Wassers auf die Erde gebracht haben.
- Es wurde auch festgestellt, dass Kometen organische Elemente wie Aminosäuren enthalten und einige der für das Leben erforderlichen Grundstoffe auf die Erde gebracht haben könnten.
- Großflächige Einschläge können enorme globale Auswirkungen haben, darunter:
 - Klimaveränderungen, da große Mengen an Material in die Atmosphäre geschleudert werden.
 - Verstärkte Erdbeben- und Vulkanaktivität aufgrund der durch den Einschlag erzeugten Schockwellen, die zur Freisetzung großer Mengen von CO₂ und SO₂ in die Atmosphäre führen.
 - Tsunamis und Flutwellen können durch großflächige Einschläge ausgelöst werden.
 - Aussterbeereignisse (wie der Einschlag vor 65 Millionen Jahren, der das Aussterben der Dinosaurier verursachte) können als Folge dieser Prozesse auftreten.

Links

Rosetta

Website der ESA Rosetta: www.esa.int/rosetta

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

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

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

Rosetta Factsheet, einschließlich Missionszeitplan: 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

Auf der Jagd nach einem 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 einen Kometen: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Wie man einen Kometen umkreist: www.esa.int/spaceinvideos/videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet

Kometen

ESA Kids-Artikel über Kometen: www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF_OurUniverse_o.html

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

Website der ESA Giotto: sci.esa.int/giotto/

ESA Rosetta: www.esa.int/rosetta

ESA Kids-Artikel über Kometen: www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_o.html

Giotto

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

Herschel

Website des ESA-Weltraumobservatoriums Herschel: www.esa.int/herschel

Kamen die Ozeane der Erde von Kometen? www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Herschel/Did_Earths_oceans_come_from_comets

SOHO

Überblick der ESA über SOHO: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO_overview2

Video der Begegnung des Kometen ISON mit der Sonne, aufgenommen vom ESA/NASA-Satelliten SOHO: sci.esa.int/soho/54346-soholasco-view-of-comet-ison-27-30-november-2013/

Erdeinschlag

Down2Earth-Aufprallsimulator: education.down2earth.eu/

Unterrichten Sie mit der Weltraumsammlung

ESA lehrt mit Weltraum - Gravity Wells Video | VPO4: https://www.esa.int/esatv/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_classroom_demonstration_video_VPO4

ESA lehrt mit Raum - Marmor-Ellipsen Lehrerhandbuch und Schüleraktivitäten | PO2: esamultimedia.esa.int/docs/edu/PO2_Marble-ous_ellipses_teacher_guide.pdf

ESA lehrt mit Raum - Marmor-Ellipsen Video | VPO2: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VPO2

ESA lehrt mit dem Weltraum - Kochen eines Kometenvideos | VPO6: https://www.esa.int/esatv/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VPO6

Teach with Space – einen Kometen kochen | Po6
www.esa.int/education

Entwickelt für die ESA von der National Space Academy,
UK Illustrations von Kaleidoscope Design, NL
Ins Deutsche übersetzt von ESERO Austria

Eine ESA-Bildungsproduktion
Copyright © Europäische Weltraumorganisation 2014