

## Kometen und die Ursprünge des Planetensystems

Forschungsinfo 9/2005

### Einleitung

Kometen erlangen in Abständen von einigen Jahren bis Jahrzehnten besonders große Aufmerksamkeit, wenn ein heller Komet der Sonne nah kommt und den Sternenhimmel überstrahlt (Abb. 1). Natürlich ist ein solcher spektakulärer Komet auch Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Für die Forschung sind Kometen allerdings besonders interessant, weil Sie die meiste Zeit ihrer Existenz als unscheinbare Eisbrocken weit entfernt von der Sonne verbringen. Durch ihren großen Abstand von der Sonne bleiben Sie weitgehend unverändert. Daher kann man aus ihrer Zusammensetzung und ihrem Aufbau Schlüsse über die Entstehung und Entwicklung des Sonnensystems ziehen.

### Die Entstehung des Sonnensystems und Kometenreservoirs

Die Sonne entstand vor etwa 4,6 Milliarden Jahren aus dem Kollaps einer Staub- und Gaswolke. Überreste der Wolke, die nicht in die Sonne gefallen waren, bildeten eine Scheibe, die schnell um die Sonne rotierte. Allmählich klumpten die Staubteilchen in der Scheibe zu „Planetesimalen“ zusammen, kleinen

Körpern mit einigen 100 m oder maximal ein paar Kilometern Durchmesser. Aus diesen Objekten bildeten sich die Planeten.

Die Überbleibsel der Planetenentstehung sind die kleinen Körper im Sonnensystem:

Zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter konnte sich durch den Einfluß der Schwereanziehung von Jupiter kein Planet bilden. Dort befindet sich der Asteroidengürtel. Asteroiden sind zwischen weniger als einem km und mehreren Hundert Kilometern groß.

Im äußeren Sonnensystem außerhalb der Jupiterbahn bildeten sich die Kometen. Einige von ihnen entstanden im Bereich der großen Planeten aufhielten (zwischen Jupiter und Neptun). Sie wurden bei nahen Begegnungen mit den Riesenplaneten aus dem Sonnensystem heraus oder an seinen Rand geschleudert. Kometen, die dem Sonnensystem dabei nicht verloren gingen, befinden sich in der Oortschen Wolke am Rande des Einflußbereichs der Sonne

Andere Kometen entstanden außerhalb des Einflußbereichs der großen Planeten. Diese Kometen befinden sich noch immer in etwa an ihrem Entstehungsort außerhalb der Bahn des Neptuns. Diese Region bezeichnet man als Kuiper Belt.



Abb. 1: Komet Hale-Bopp, fotografiert von W. Pacholka im Josua Tree National Park in Kalifornien. Der Plasmaschweif (blau) und Staubschweif (weiss) des Kometen sind deutlich zu unterscheiden.

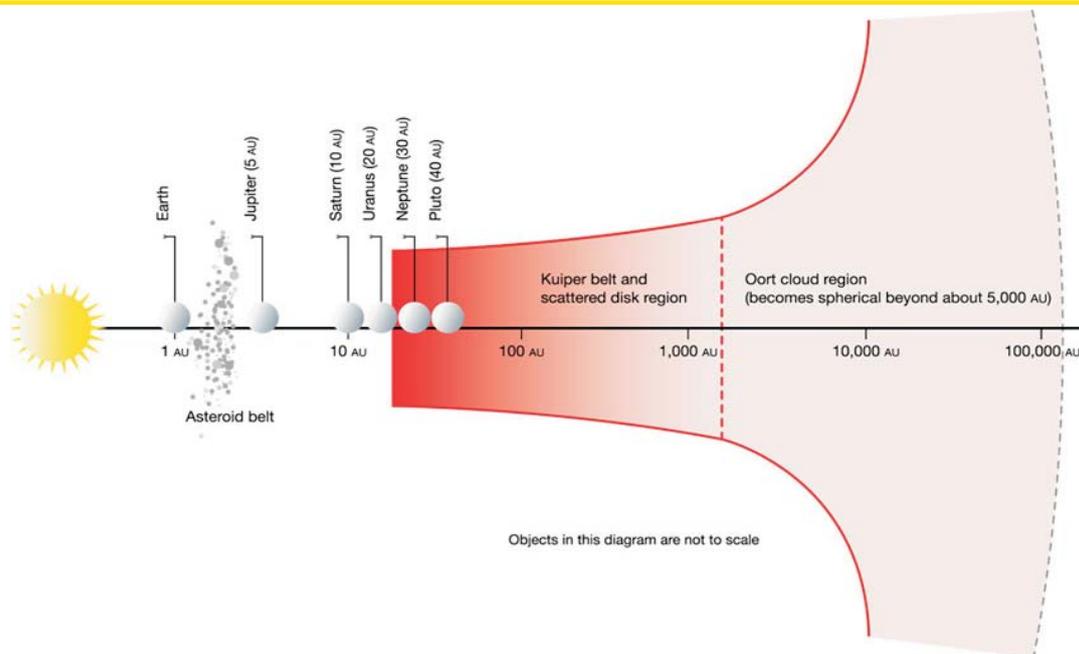


Abb. 2: Aufbau des Sonnensystems. Die Entfernungsskala ist stark gestaucht (logarithmisch). Die Größen der Planeten sind nicht maßstäblich. 1 AU ist die Astronomische Einheit (mittlere Entfernung der Erde von der Sonne). Entnommen von S.A. Stern, Nature 424, 639, 2003.

Abb. 2 zeigt schematisch den Aufbau des heutigen Sonnensystems. Von allen Körpern befinden sich die Kometen am weitesten von der Sonne entfernt und verbringen den überwiegenden Teil ihrer Lebensdauer in extremer Kälte. Daher befinden sie sich noch in etwa demselben Zustand wie zu Zeiten der Entstehung des Sonnensystems.

Natürlich sind die Oortschen Wolke und der Kuiper Belt nur sehr schwer zu studieren. Die Kometen der Oortschen Wolke können wir nicht direkt beobachten, wir erschließen die Existenz der Kometenwolke indirekt aus den Bahnen der Kometen, die das innere Sonnensystem erreichen. Das erste Objekt im Kuiper Belt wurde 1992 entdeckt, heute sind viele Hundert bekannt. Dennoch sind sie so lichtschwach, daß unser Kenntnisstand über den Aufbau der Kometen im Kuiper Belt noch begrenzt ist.

Gelegentlich werden Kometen durch nah am Sonnensystem vorbeiziehende Sterne oder eventuell auch Molekülwolken aus der Oortschen Wolke und dem Kuiper Belt ins innere Sonnensystem abgelenkt. Diese Kometen liefern spektakuläre Himmelschauspiele, wie z.B. Komet Hale-Bopp 1997. Sie erlauben es uns auch, Kometen als Boten aus der Frühzeit des Sonnensystems detaillierter zu studieren.

### Aufbau eines Kometen

Wenn sich ein Komet in großer Entfernung von der Sonne befindet, besteht er nur aus dem Kometenkern, einem „schmutzigen Schneeball“ von typischerweise einigen Kilometern Durchmesser. Er ist eine Mischung aus Eis (überwiegend Wassereis, aber auch  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , Methanoleis  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CS}_2$ ,...) und Staub. Wenn der Komet sich der Sonne nähert, erwärmt sich die Oberfläche des Kometenkerns und das Eis beginnt

zu sublimieren, d. h. es geht direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über. Das entstehende Gas bewegt sich vom Kometenkern weg und reißt Kometenstaub mit sich. Es bildet sich die Koma, eine Gas- und Staubbülle mit einer Ausdehnung von einigen 100000 km.

Das Gas in der Koma ist der ultravioletten Strahlung der Sonne und dem Sonnenwind, einem kontinuierlichen, von der Sonne ausgehender Strom geladener Teilchen, ausgesetzt. Das führt dazu, daß die Gasmoleküle dissoziiert (in ihre atomaren Bestandteile aufgespalten) und ionisiert werden. Im Fall des Wassereises führt die Dissoziation dazu, daß man in der Koma des Kometen außer  $\text{H}_2\text{O}$  auch das Molekül  $\text{OH}$  sowie atomaren Sauerstoff und Wasserstoff findet. Die Wasserstoffkoma ist besonders weit ausgekehrt (siehe Abb. 3).

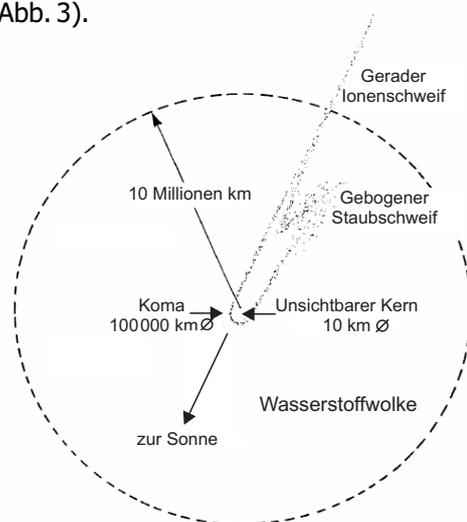


Abb. 3: Schematischer Aufbau eines Kometen.

Durch Ionisation entstehen geladene Teilchen in der Koma des Kometen. Diese Teilchen werden vom Sonnenwind mitgenommen und bilden den Plasmaschweif des Kometen, der radial von der Sonne wegzeigt. Er enthält Wasserionen ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ), seine charakteristische blaue Färbung entsteht aber durch ionisiertes Kohlenmonoxid ( $\text{CO}^+$ ).

Die dem Kometen auf seiner Bahn folgende Staubkoma wird durch den Druck der Sonnenstrahlung ebenfalls von der Sonne weg beschleunigt. Es entsteht die typische gebogene Struktur des Staubschweifes. Der Staub reflektiert das Sonnenlicht, daher ist der Staubschweif gelb.

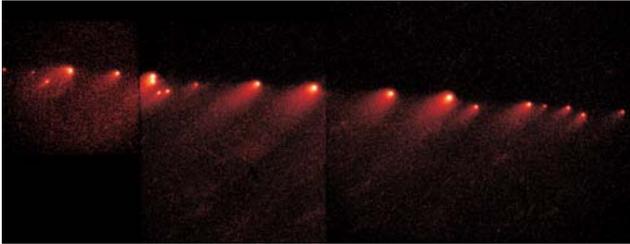


Abb. 4: Bild des Kometen Shoemaker-Levy im Januar 1994, aufgenommen vom Hubble Space Teleskop.

### Kometen und die Entstehung des Planetensystems

Die Untersuchung von Kometen liefert in verschiedener Weise Aufschluß über die Bedingungen, unter denen unser Sonnensystem entstanden ist:

- Die chemische und die Isotopenzusammensetzung der Kometen gibt Auskunft über die Temperatur und die Zusammensetzung des Materials, aus dem das Sonnensystem entstand.
- Der Aufbau des Kometenkerns (Stabilität, Dichte, Porosität) erlaubt Rückschlüsse über die Entwicklung der Planetesimale, der Bausteine der Planeten und großen Asteroiden. Zum Beispiel gibt es Indizien für eine geringe Stabilität von Kometen. Das läßt darauf schließen, dass sie (wie auch Planetesimale und kleine Körper im Sonnensystem im Allgemeinen) durch eine komplizierte Entwicklung aus Zusammenstößen und Re-Akkumulation von Fragmenten entstanden sind.

Während die Zusammensetzung eines Kometen zumindest teilweise auch aus Untersuchungen der Koma bestimmt werden kann, ist zum Verständnis des Aufbaus und der Entwicklung der Kometen die Erforschung des Kerns notwendig. Dies ist eine schwierige Aufgabe: Bei großer Entfernung von der Sonne ist die Helligkeit des Kerns sehr gering, wenn sich ein Komet der Sonne nähert, wird der Kern von der Koma überstrahlt.

Eine indirekte Möglichkeit zum Studium der Kometenkerne bietet sich, wenn ein Komet auseinanderbricht. Gelegentlich wird beobachtet, daß ein Komet in mehrere Teile zerfällt, häufig ist die Ursache dabei unbekannt. Ein spektakulärer Fall war Komet Shoemaker-Levy 9: Er kam 1992 sehr nah an Jupiter heran und wurde durch die Gezeitenkräfte von

Jupiter in mehr als 20 Fragmente zerrissen (Abb. 4). Im Juli 1994 stürzten die Fragmente dann in die Atmosphäre des Jupiter. Aus dem Zerfall des Kometenkerns und den Details der Explosion der Fragmente in Jupiters Atmosphäre konnten einige Eigenschaften des Kometenkerns (z. B. Größe, Stabilität und Dichte) abgeschätzt werden.

Die direkte Untersuchung von Kometenkernen ist nur mit Raumfahrtmissionen möglich. Abb. 5 zeigt das erste Bild eines Kometenkerns. Es ist der Kern des Kometen Halley, aufgenommen von der am MPS hergestellten Halley Multicolour Camera auf dem Satelliten Giotto. Es stellte sich heraus, daß nur ein Teil des Kometenkerns aktiv ist und ein großer Teil des Materials den Kern in „Jets“, relativ dünnen Strahlen, verläßt.

### Kometen und die Entwicklung der Erde

Auch auf die Entwicklung unseres Planeten und des Lebens haben Kometen entscheidenden Einfluß gehabt:

Wasser ist eine notwendige Voraussetzung für unsere Existenz. Abschätzungen zeigen, daß Kometen- und Asteroideneinschläge auf der Erde einen großen Teil des Wassers geliefert haben könnten. Allerdings stimmt das Verhältnis zwischen „normalem“ Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und schwerem Wasser ( $\text{HDO}$ ) in den Kometen, in deren Koma man es bisher gemessen hat, nicht sehr gut überein. Die Klärung dieser Frage ist ein wichtiger Gegenstand aktueller Forschungen.

Kometeneinschläge haben in der Vergangenheit wiederholt zu Artensterben geführt. Bekanntestes Beispiel ist das Aussterben der Dinosaurier vor etwa 65 Millionen Jahren, das wahrscheinlich durch einen Einschlag im heutigen Mexiko hervorgerufen wurde.

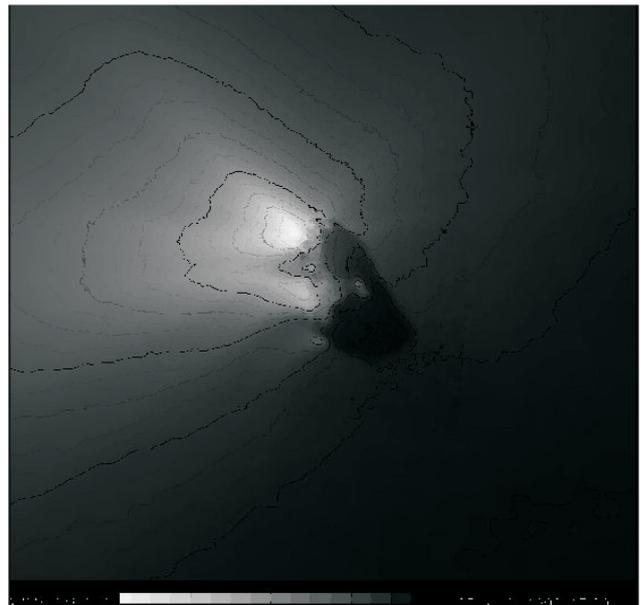


Abb. 5: Aufnahme des Kometen Halley mit der am MPS hergestellten Kamera HMC. Die Kamera schaut auf die Schattenseite (nicht von der Sonne beleuchtete Seite) des Kometenkerns. Die Größe des Kerns entlang der längsten Achse ist etwas mehr als 15 km.



Abb. 6: Das Landegerät von Rosetta (Philae), das 2014 auf dem Kometen Churyumov-Gerasimenko landen wird.

### Forschungen am MPS

Kometenforschung wird am MPS bereits seit den 70er Jahren betrieben. Ein früher Höhepunkt war die ESA-Mission Giotto, die im Jahr 1986 den Kometen Halley besuchte. Das Konsortium, das die Kamera herstellte, welche die ersten Bilder eines Kometenkerns aufnahm (Abb. 5) und den Staub in der inneren Koma untersuchte, wurde vom MPS geleitet. An anderen Instrumenten auf Giotto war das MPS ebenfalls beteiligt.

Die nächste Mission der ESA zu einem Kometen ist bereits unterwegs: Am 2. März 2004 wurde Rosetta gestartet. Rosetta wird nach mehreren Verbeiflügen an der Erde, dem Mars und zwei Asteroiden im Jahr 2014 den Kometen Churyumov-Gerasimenko besuchen. Der Satellit soll den Kometen über einige Jahre begleiten. Es besteht aus einem Orbiter, der dem Kometen bis auf 2 km nahe kommen wird, und einem Landegerät, das Messungen auf der Oberfläche von Churyumov-Gerasimenko durchführen wird.

Das MPS ist bei Rosetta wieder stark beteiligt: Es hat die Systemführerschaft beim Landegerät übernommen (Abb. 6) und steuert erneut die beiden wissenschaftlichen Kameras bei. Außerdem liegt die Leitung eines Gerätes zur Analyse des Kometenstaubs beim MPS. Zu mehreren anderen Instrumenten wurden Beiträge geleistet.

Neben den Beteiligungen an Weltraummissionen gibt es am MPS auch seit über 20 Jahren Programme zur Beobachtung von Kometen vom Erdboden aus. Dabei wurde am MPS auch ein eigenes Instrument entwickelt, das auf die Beobachtung großräumiger Strukturen spezialisiert ist. Forschungsgebiete sind der Plasmaschweif der Kometen, die Eigenschaften der Staubkoma, und die Entwicklung der Aktivität des Kometen auf seiner Umlaufbahn. Abb. 7 zeigt Bilder, die aufgenommen wurden, als die Aktivität von Komet Hale-Bopp über mehrere Jahre verfolgt wurde.

Michael Küppers

#### Internet Seiten:

<http://www.fg-kometen.de/> (Deutsche Webseite von Amateurastronomen)

<http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/comets/comets.html> (Englischsprachige Seite mit vielen Informationen über Kometen)

[http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/our\\_solar\\_system/formation.html](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/our_solar_system/formation.html) (Seite derselben Organisation (NCAR/UCAR) über die Entstehung des Sonnensystems)

[www.solarviews.com/germ/comet.htm](http://www.solarviews.com/germ/comet.htm) (Deutsche Übersetzung einer weiteren Seite mit Bildern und Informationen zu Kometen)

<http://www.esa.int/science/rosetta> (ESA Webseite der Rosetta-Mission)

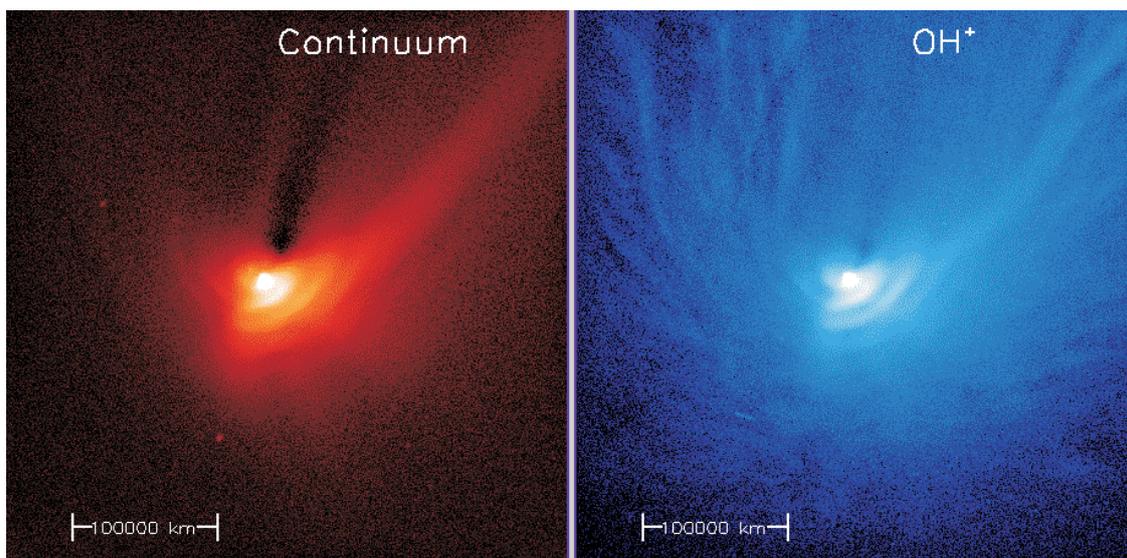


Abb. 7: Bilder des Kometen Hale-Bopp, aufgenommen mit der Weitwinkelkamera des MPS am 2m-Teleskop auf dem Pik Terskol im Kaukasus. Auf der linken Seite ist die Staubkoma zu sehen, für die rechte Aufnahme wurde ein Farbfilter verwendet, das außer Staub auch Emissionen des Ions  $\text{OH}^+$  abbildet. Beide Bilder wurden bearbeitet, um schwache Strukturen hervorzuheben.