



## Kometen

**Kometen sind bereifte  
Zeugen aus der Zeit vor  
4,6 Milliarden Jahren,  
als aus dem solaren  
Nebel unser Sonnen-  
system entstand.**

**Die modernen Mittel  
der Weltraumforschung  
ermöglichen, ihre viel-  
fältigen Geheimnisse zu  
entziffern.**



Es ist ein alter Traum der Menschheit, in die Zukunft sehen zu können. In der griechischen Antike hat es Delphi zu Berühmtheit gebracht, wo Eingeweihte den aus Felsspalten aufsteigenden Dämpfen Hinweise über Krieg und Frieden, Hochzeiten in Königshäusern und andere wesentliche Ereignisse zu entnehmen wussten. Kometen haben in allen Kulturen als Boten der Zukunft wichtige Dienste geleistet. Ihr während langer Zeit nicht vorausgbares Erscheinen wurde mit Bevorstehendem in Zusammenhang gebracht und als Zeichen überirdischer Mächte gedeutet. Computersimulationen haben heute die alten Dämpfe weitgehend ersetzt; doch geblieben ist das Bedürfnis, in die Zukunft zu sehen.

Auch die Bedeutung der Kometen hat sich mittlerweile geändert. Ihre Bahnen sind berechenbar geworden, und wir wissen heute, dass sie Materie in ursprünglicher Zusammensetzung aus der Entstehungszeit unseres Sonnensystems vor etwa 4,6 Milliarden Jahren aufbewahrt haben. Im Gegensatz dazu ist die Materie, aus welcher sich damals Planeten und Monde bildeten, durch vielfältige Prozesse so weit umgeformt worden, dass sie keine Spuren ihrer ursprünglicher Eigenschaften mehr besitzt. Kometen sind damit zu Boten der Vergangenheit geworden.

Frau PD Dr. Kathrin Altwegg-von Burg ist Experimentalphysikerin. Sie arbeitet am Physikalischen Institut der Universität

Bern und am International Space Science Institute. Wir freuen uns, mit dieser vorliegenden vierten Nummer des Spatium wieder eine prominente Persönlichkeit unseren Lesern vorstellen zu dürfen, die weit über unsere Landesgrenzen hinaus Ansehen erlangt hat.

*Bern, im Oktober 1999*  
**Hansjörg Schlaepfer**

## Impressum

SPATIUM  
Publikationsorgan des  
Vereins Pro ISSI  
erscheint ein- bis zweimal jährlich



**INTERNATIONAL  
SPACE  
SCIENCE  
INSTITUTE**

Verein Pro ISSI  
Hallerstrasse 6, CH-3012 Bern  
Tel. ++41 31 631 48 96  
Fax ++41 31 631 48 97

### **Präsident**

Prof. Hermann Debrunner,  
Universität Bern

### **Herausgeber / Quästor**

Dr. Hansjörg Schlaepfer,  
Contraves Space, Zürich

### **Layout**

Marcel Künzi,  
Contraves Space, Zürich

### **Druck**

Drucklade AG, CH-8008 Zürich

### Titelbild

Der Komet Hale-Bopp, 1997  
(A. Dimai und D. Ghirardo,  
Col. Druscie Obs.)

# Von Giotto bis Rosetta –

## Kometen als Schwerpunkt der europäischen Weltraumforschung

PD Dr. Kathrin Altwegg, *Physikalisches Institut der Universität Bern*

Vortrag für den Verein Pro ISSI am 24. März 1999

### **Kometen: unheimliche Boten des Himmels**

Kometen haben die Menschheit schon immer fasziniert. Ihr plötzliches Auftreten am Nachthimmel, ihre ungewöhnlichen Bahnen und das Erscheinungsbild mit dem langen Schweif, das sie so sehr von Sternen und Planeten unterscheidet, haben die Phantasie der Leute angeregt. Sie tun es noch heute, wie das Auftreten von Komet Hale-Bopp 1997 (Titelblatt) einmal mehr gezeigt hat. Schon im alten China, lange vor Christi Geburt, wurden Kometen wissenschaftlich genau registriert. Ihre Bahnen, die Länge des Schweifes und ihre Helligkeit wurden gewissenhaft aufgeschrieben. Kometen

galten gegen den englischen König Edward vorausahnt. Manchmal galten aber Kometen auch als besondere Glücksbringer wie in der **Figur 2**, einem Gemälde des italienischen Malers Giotto di Bondone, 1321, wo der gleiche Komet Halley als Stern von Bethlehem dargestellt ist. Heute wissen wir, dass Kometen keineswegs bedrohliche Boten sind, dass sie vielmehr zu unserem Sonnensystem gehören und wir können auch den langen Schweif durchaus erklären. Wir wissen aber auch, dass Kometen zwar nicht direkt unser Leben beeinflussen, dass auch grosse politische Ereignisse nicht von Kometen vorausgesagt wer-

den, dass sie aber durchaus eine Botschaft in sich tragen, die sich zu erforschen lohnt. Sie können uns etwas über die Vergangenheit unseres Sonnensystems und damit unserer Erde erzählen, über die Entstehung der Sonne und der Planeten und über eine längst verschwundene dunkle Molekülwolke, aus der unser Sonnensystem entstanden ist. Damit können sie uns letztendlich auch Hinweise geben über den Ursprung des Lebens. Dies möchte ich im folgenden erläutern und damit erklären, warum Kometen im Zentrum des Wissenschaftsprogramms der Europäischen Weltraumagentur ESA stehen.



**Figur 1**  
Der Teppich von Bayeux, Schlacht von Hastings (British Museum)

ten galten lange Zeit als Boten einer überirdischen Macht. Meist verkündeten sie ein kommendes Unheil, den Untergang eines Königreiches, den Tod eines Herrschers, sie waren Vorboten einer Naturkatastrophe. Auf dem Teppich von Bayeux (**Figur 1**) ist z.B. der Normannenkönig Harold dargestellt, wie er beim Erscheinen des Kometen Halley 1066 die kommende Niederlage bei Has-

**Figur 2**  
Die Anbetung der Weisen, Giotto di Bondone, 1321



# Der Stammbaum unseres Sonnensystems

## Die Kinder

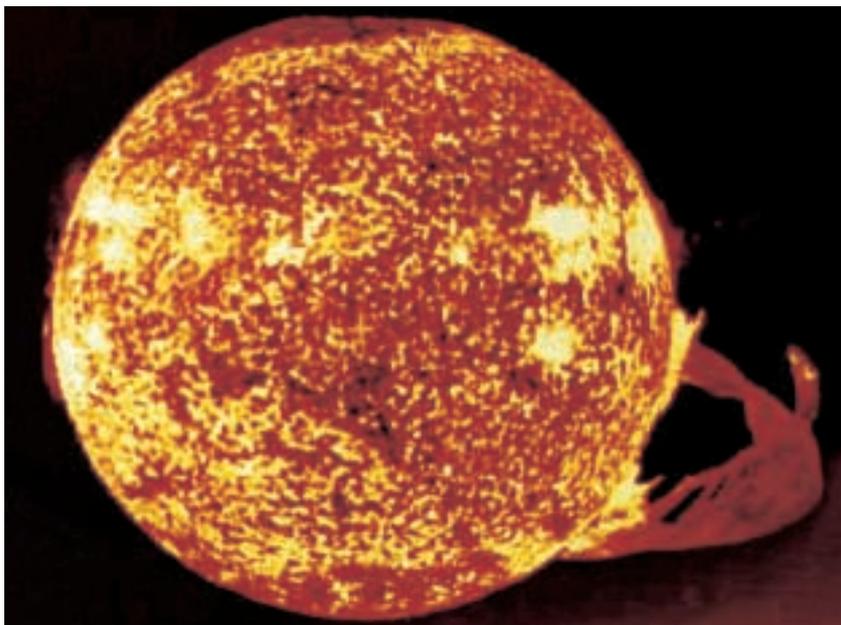
Betrachten wir unser Sonnensystem einmal als Familie und beginnen wir mit den Kindern. Die Sonnenfamilie hat viele verschiedene Kinder. Alle Kinder sind gleich alt, nämlich rund 4,6

Milliarden Jahre. Das prominenteste Kind ist sicher die Sonne (Figur 3). Sie hat mehr als 99% aller Materie in sich vereinigt und ihren Geschwistern nur sehr wenig übriggelassen. Die Planetengeschwister variieren in der Grösse und in ihrem Abstand zur heissen Sonne. Je nach Abstand und Grösse hat sich ihr Material in den 4,6 Milliarden Jahren ihres Daseins stark verändert. Dies gilt natürlich vor allem für die inneren Planeten, wie Erde, Merkur, Venus und Mars (Figur 4). Die übrigen

Geschwister, die Meteoriten, Asteroiden und Kometen (Figur 5) haben eine unbedeutende Grösse. Während die Asteroiden zwischen Mars und Jupiter beheimatet sind, haben Kometen von den 4,6 Milliarden Jahren praktisch die gesamte Zeit tiefgekühlt ausserhalb des äussersten Planeten, des Pluto, verbracht. Darum konnten sie ihre Geheimnisse bis auf den heutigen Tag bewahren.

## Die Mutter

Alle diese Körper sind aber aus derselben Urmasse entstanden, nämlich aus dem solaren Nebel (in unserem Stammbaum also die Mutter). Dieser solare Nebel hat sich längst aufgelöst. Kometen entstanden einerseits zwischen Uranus und Neptun. Durch Gravitationskräfte wurden die kleinen Körper gestreut. Ein Teil ging dabei verloren, ein Teil aber findet sich am Rande unseres Sonnensystems, in der sogenannten Oort'schen Wolke wieder. Aus der Häufigkeit von Kometenbeobachtungen schätzt man, dass die Oort'sche Wolke ungefähr  $10^{13}$  Kometen enthält. Die Wolke befindet sich zwischen 300 und 10 000 astronomischen Einheiten



Figur 3  
Die Sonne (NASA)



Figur 4a  
Der Mars (HST, NASA / ESA)



Figur 4b  
Die Erde (NASA)



**Figur 5a**  
Der Asteroid Ida mit dem Mond Dactyl (NASA)

(1 Astronomische Einheit entspricht dem Abstand Sonne-Erde). Die Wolke ist nicht nur in der Ekliptik (Ebene, in der sich die Planeten bewegen) zu finden, sondern umspannt unser Sonnensystem mehr oder weniger isotrop. Oort'sche Kometenbahnen haben deshalb häufig einen relativ grossen Winkel zur Ekliptik und der Orbit kann durchaus auch retrograd sein (z.B. Halley), also umgekehrt verlaufen als die Planetenbahnen. Andere Kometen wurden vermutlich zwischen Jupiter und Saturn gebildet. Ihre Streuung erfolgte vorwiegend in der Ekliptik und die Kometen befinden sich heute im sogenannten Kuiper-Gürtel bei etwa 300 astronomischen Einheiten, immer noch weit ausserhalb von Pluto.



**Figur 4c**  
Der Saturn (HST, NASA / ESA)



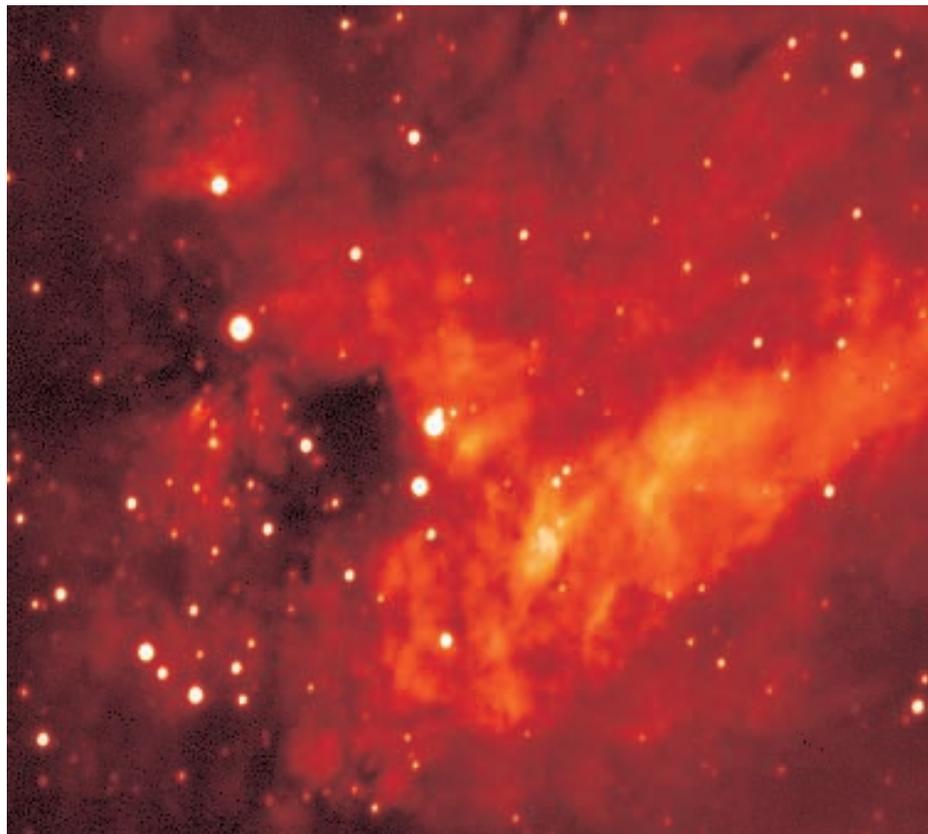
**Figur 5b**  
Der Komet Hyakutake (R. Scott und J. Orman in the Night of the Comet)

### Die Grossmütter

Gehen wir jetzt eine Generation zurück. Über den solaren Nebel, die Mutter unseres Sonnensystems, ist recht wenig bekannt. Insbesondere wissen wir wenig über

**Figur 6**

Dunkle Molekülwolke, wie der hier abgebildete Schwan-Nebel, sind die Geburtsstätten neuer Sterne. Von einigen der sichtbaren Sterne vermutet man auf Grund ihrer ungewöhnlichen Farben, dass es sich um ganz junge Sterne handelt, die (noch) von der Gaswolke abgeschirmt werden, aus welcher sie entstanden sind. (B. Wallis und R. Provin, HST NASA / ESA)



**Figur 5c**  
Der Mars-Mond Deimos (HST, NASA / ESA)

die chemischen und physikalischen Randbedingungen, wie z.B. Temperaturen und Moleküldichten. Geburtsstätten solcher solarer Nebel und damit in unserem Bild Grossmütter sind sogenannte dunkle Molekülwolken (**Figur 6**).



Diese Wolken enthalten sehr viel Staub. Das Licht wird in der äusseren Schicht deshalb absorbiert. Im Innern dieser Wolken herrschen ungewöhnliche Bedingungen: grosse Kälte und Dunkelheit. Durch Kollaps gewisser Teile einer solchen Wolke entstehen Gebiete, eben solare Nebel, die dicht genug sind, um ganz zu kollabieren und dabei Sterne und Planeten zu bilden.

### **Die Vorfahren**

Wer liefert den Staub, der die dunklen Molekülwolken bildet? Staub kann in Sternhüllen, Sternatmosphären und bei Supernovae Explosionen entstehen. Diese sind also ihrerseits die Vorfahren der Molekülwolke, aus der unser solarer Nebel und schlussendlich die Planeten und Kometen entstanden sind. In **Figur 7** sieht man als Beispiel die Gashülle eines Sterns, der seine Materie nach einer Explosion weit in den Weltraum schleudert. Dieser Zyklus wurde wahrscheinlich seit der Entstehung des Universums vor etwa 13 Milliarden Jahren mehrmals durchlaufen. Es entstanden und vergingen Sterne, die Staub produzierten, daraus entstanden dunkle Molekülwolken und daraus wiederum solare Nebel und neue Sterne, unter anderem auch unsere Sonne.

#### **Figur 7**

Die Flügel des Schmetterlingsnebel sind durch eine Explosion der Gashüllen des Sterns M-29 entstanden. Er befindet sich etwa in 2100 Lichtjahren Entfernung. (B.Balick, Universität Washington, Hubble Space Telescope, NASA/ESA)

# Die Geschichte der Materie unseres Sonnensystems

## Die Kernsynthese

Woher stammt das Material, aus dem unser Sonnensystem besteht? Verfolgen wir einmal die Materie zurück zu ihrem Ursprung. Dabei müssen wir unterscheiden zwischen Elementen und Molekülen. Beim Urknall wurden die leichten Elemente Wasserstoff, Helium und Lithium geschaffen. Insbesondere für den Wasserstoff ist dies die einzige Quelle, d.h. jedes Wasserstoffatom, das es heute gibt, ist 12–13 Milliarden Jahre alt. Anders für schwerere Elemente, Kohlenstoff bis Uran. Diese stammen aus der Nukleosynthese in Sternen und Supernovae, können also jünger sein und werden unter anderem auch in unserer Sonne hergestellt. Die Nukleosynthese braucht sehr hohe Energien. Molekülbindungen hingegen verlangen nach tieferen Temperaturen, sonst sind sie nicht stabil.

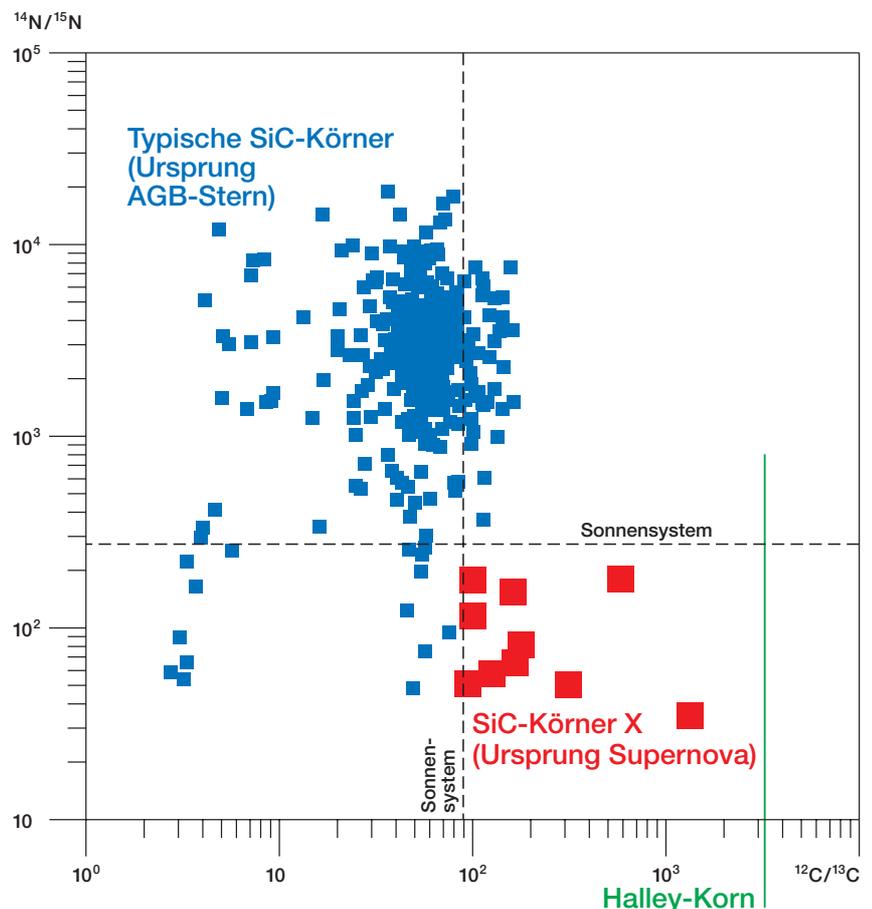
Wie oben erwähnt, entstand und entsteht Staub, d.h. sehr stabile, chemische Verbindungen wie z.B. Eisenoxyd oder Siliziumcarbid, in Sternhüllen, Sternatmosphären oder bei Supernovae-Explosionen. Dieser Staub hat zum Teil seit seiner Entstehung bis in unsere Zeit überlebt. Dies kann man an Meteoritenstaub zeigen. **Figur 8** zeigt dazu Isotopen-Messungen

an einem Meteoriten. Der Meteorit wurde im Labor in viele kleine Bruchstücke zerlegt. Misst man nun Isotopenverhältnisse in den einzelnen Bruchstücken, erwartet man eigentlich eine statistische Verteilung um den typischen Wert unseres Sonnensystems, da der Meteorit ja aus dem gleichen Material entstand wie die Sonne. Aus der Figur geht aber klar hervor, dass der Meteorit Körner aus zwei verschiedenen Populationen besitzt. Die eine Population hat ein erhöhtes  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ -Verhältnis, was typisch ist für einen Ursprung in einem älteren Stern. Die an-

dere Population hat ein erhöhtes  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Verhältnis, was auf einen Ursprung in einer Supernova hindeutet. Im gleichen Meteorit befinden sich also Staubkörner, die unterschiedliche Vorfahren haben. Das heisst, bei der Bildung des Sonnensystems wurden diese Körner nicht aufgebrochen und neu gebildet, sondern sie wurden im Originalzustand eingebaut.

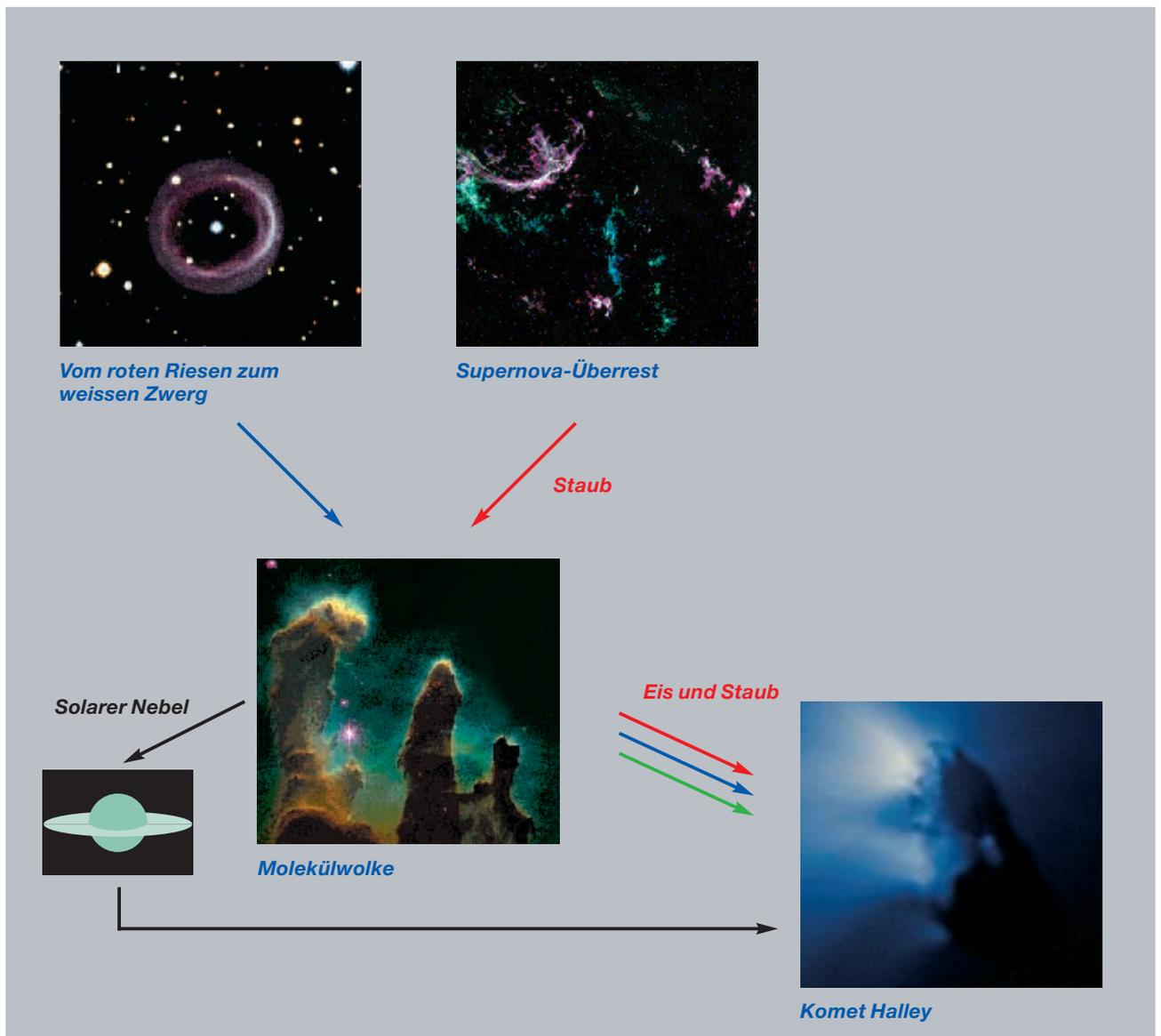
## Die Synthese der Moleküle

Etwas anders sieht es bei Molekülen aus, deren Bindung schwä-



**Figur 8**

Isotopenmessungen an Körnern des Murchinson Meteoriten (J. Hoppe et al. 1996)



**Figur 9**  
Der Ursprung der Moleküle, des Eises und des Staubes in den Kometen

cher ist, z.B. bei Wasser oder organischen Molekülen. In der Umgebung von Sternen oder Supernovae sind die Temperaturen viel zu hoch und solche Moleküle haben keinen Bestand. Wie oben schon erwähnt, sind die Temperaturen in den dunklen Molekülwolken so tief, dass keine «normale» Chemie mehr möglich ist. Trotzdem laufen chemische Prozesse ab, allerdings sehr langsam. Die Molekülwolken existieren mehrere Millionen Jahre. Mit Hilfe der Staubkörner, die katalytisch wirken, können in diesen Wolken flüchtige Moleküle entstehen. Aus den Elementen H, C, N und O kann an der Oberfläche der Staubkörner eine grosse Anzahl an Molekülen gebildet wer-

den wie z.B. Wasser, Formaldehyd ( $\text{H}_2\text{CO}$ ), Kohlenmonoxyd und -dioxyd ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), aromatische Kohlenwasserstoffe (siehe **Figur 9**). Viele dieser Moleküle wurden denn auch schon in dunklen Molekülwolken durch Radioastronomie identifiziert. Aus Laborexperimenten ist zudem bekannt, dass aus diesen Molekülen zusammen mit etwas Ultraviolettstrahlung sehr viel komplexere Moleküle bis hin zu Aminosäuren gebildet werden können. Die Frage ist nur: Können diese Moleküle dann die Bildung eines solaren Nebels, den Kollaps und die Bildung von Sonne und Planeten überleben? Wenn wir diese Frage beantworten wollen, müssen wir

charakteristische Moleküle und Isotope untersuchen, die darauf hinweisen können, ob das Molekül erst bei oder nach der Bildung des Planeten oder Kometen entstanden ist oder aus einer Zeit vor unserem Sonnensystem stammt.

### **Kometen: Zeugen der Vergangenheit**

Wie schon oben erwähnt, waren die Planeten immer in der Nähe der Sonne während den ganzen 4,6 Milliarden Jahren. Die Temperaturen selbst auf Saturn oder Neptun sind recht hoch. Das Material auf diesen Himmelskörpern hat sich somit chemisch verändert. Wenn wir also möglichst

ursprüngliches Material erforschen wollen, das uns Einblick in die Zeit vor der Entstehung der Sonne geben soll, müssen wir Himmelskörper untersuchen, die möglichst weit von der Sonne weg sind, wie z.B. den Pluto oder eben Kometen. Der Mars dürfte kaum mehr Originalmaterial haben, auch wenn Marsforschung heute sehr populär ist. Die Kometen hingegen, die praktisch die ganze Zeit ihres Bestehens weit weg von der Sonne in der kalten Oort'schen Wolke oder im Kuiper-Gürtel verbracht haben, und die praktisch keine interne Heizung durch Radioaktivität besitzen, bieten sich als Reservoir für gut konserviertes Material an. Kometen besitzen zudem noch – im Gegensatz zu Pluto – die praktische Eigenschaft, dass sich hier und da durch Gravitationsstöße einer von ihnen in die Nähe der Sonne, und damit der Erde, verirrt, wo wir ihn mit nicht allzu grossem technischen Aufwand erforschen können.

Dies führt dazu, dass Kometen in der Weltraumforschung trotz ihrer geringen Grösse einen sehr wichtigen Platz einnehmen. Die Europäische Weltraumforschung trug diesem Umstand Rechnung mit der erfolgreichen Giotto-Mission zum Kometen Halley und zu Grigg-Skjellerup, aber auch mit der sich im Bau befindlichen Rosetta-Mission.

Im folgenden Abschnitt möchte ich zeigen, wo man heute in der Kometenforschung steht, und was wir von der zukünftigen Kometenforschung noch lernen möchten.

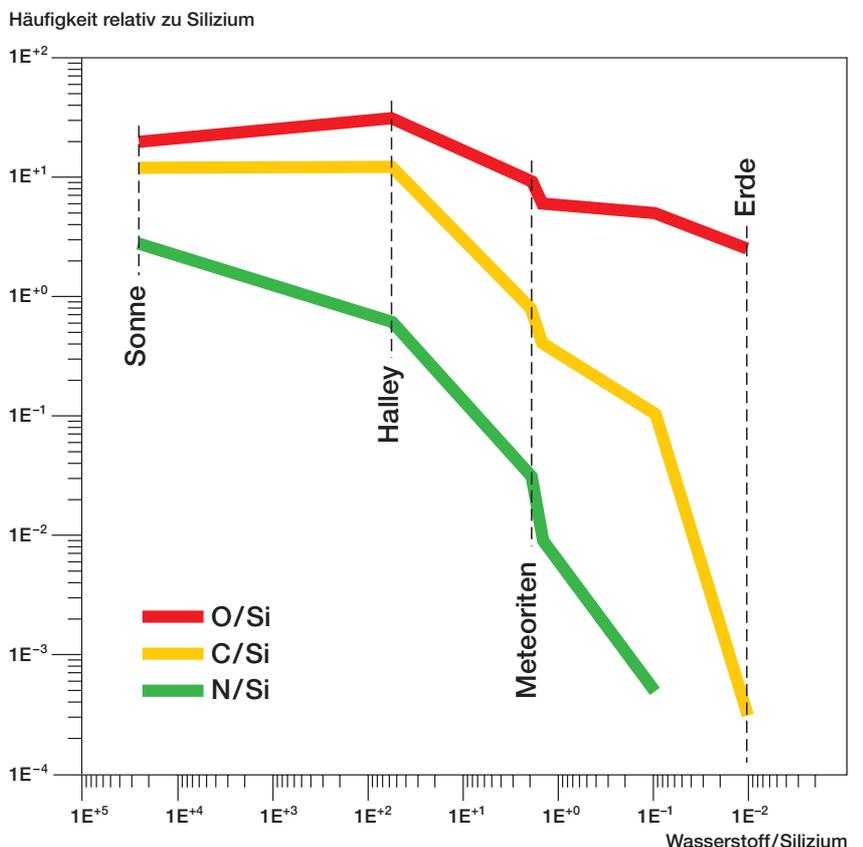
## Resultate aus der Kometenforschung



### Was wir wissen

In **Figur 10** ist die Elementhäufigkeit von Sauerstoff O, Stickstoff N und Kohlenstoff C im Verhältnis zu Silizium für einige Körper unseres Sonnensystems dargestellt. Da die Sonne 99% der Materie des Sonnensystems besitzt, repräsentiert sie die ursprüngliche Elementhäufigkeit des solaren Nebels. Von

den dargestellten Körpern sind ihr die Kometen am ähnlichsten. Der Sauerstoffgehalt und der Kohlenstoffgehalt sind praktisch gleich hoch. Nur Stickstoff scheint Komet Halley etwas verloren zu haben während seiner Existenz, oder er hat den Stickstoff von Anfang an nicht eingebaut. Meteoriten, die ebenfalls als sehr ursprüngliches Material gelten, sind schon deutlich abgereichert in allen Elementen, und die Erde scheint, was Kohlenstoff und Stickstoff anbelangt, den meisten Teil schon verloren zu haben. Kometen sind also, wie postuliert, bei weitem die ursprünglichsten Körper unseres Sonnensystems.



**Figur 10**  
Die Elementhäufigkeiten nach Geiss, 1991

Das Resultat des Vorbeifluges der europäischen Sonde Giotto am Kometen Halley, das am meisten Aufsehen erregte, war natürlich die Photographie des Kerns (**Figur 11**).



**Figur 11**  
Der Kern des Halley'schen Kometen (Giotto, ESA)

Verblüfft war man vor allem über die schwarze Farbe. Während bisher die Vorstellung vorherrschte, dass ein Komet aus flüchtigem Eis und solidem Staub besteht, weiss man jetzt, dass man es eigentlich mit drei verschiedenen Komponenten zu tun hat: nämlich mit flüchtigem Eis (Wasser, Methanol, Kohlendioxid, etc.), einer zähen Komponente, teerähnlich (evtl. polymerisiertes Formaldehyd; schwere Kohlenwasserstoffe?), die wahrscheinlich die schwarze Farbe ausmacht und einer festen Komponente, dem Staub (Eisenoxid, Siliziumkarbid). Die teerartige Komponente besteht aus den leichten Elementen C, H, N, O (sie wird deshalb auch CHON genannt), während beim Staub die schwereren Elemente wie Magnesium und Eisen überwiegen. In der Koma des Kometen beobachtet man relativ viel Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O), das langsam freigesetzt

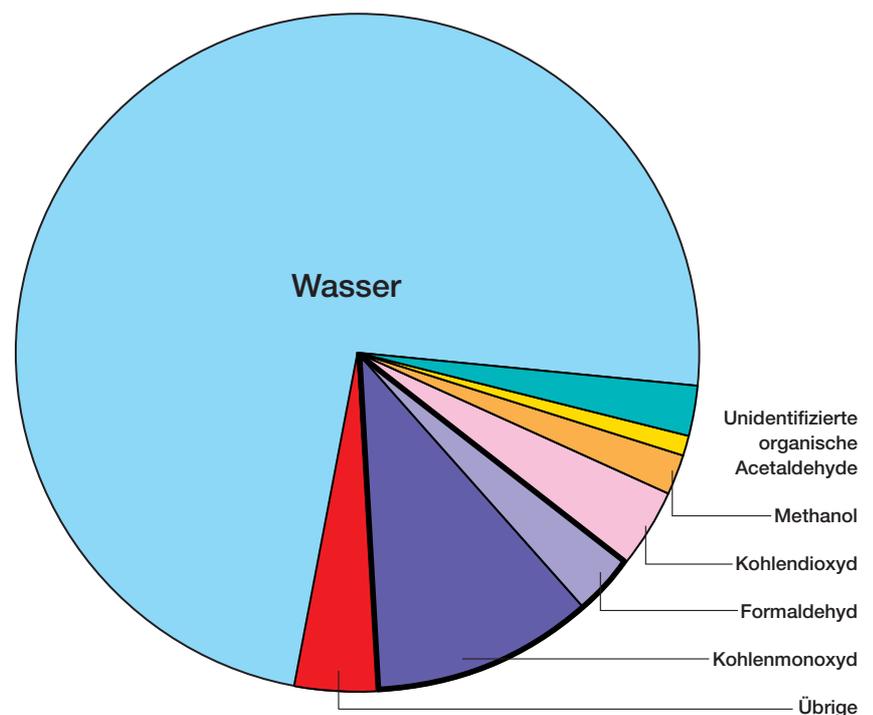
wird, und von dem man annimmt, dass es aus dieser teerähnlichen Substanz stammt. Ob die Oberfläche des Kometen aber wirklich aus polymerisiertem Formaldehyd besteht, oder ob die dunkle Farbe vom Staub stammt, wie dick diese Schicht ist und welche Mechanismen dahinter stecken, dass bei Halley nur ca. 5% der Oberfläche wirklich ausgasen, diese Fragen sind weiterhin offen.

### **Was wir noch wissen möchten**

Es wäre sehr interessant zu wissen, ob der Staub in den Kometen, der ja wahrscheinlich unverändert

die 4,6 Milliarden Jahre im Kometen überlebt hat, auch Isotopenunterschiede aufweist wie der im vorherigen Abschnitt gezeigte Meteorit. Leider hat man darüber nur Messungen eines einzigen Korns und damit natürlich keine signifikante Aussage. Immerhin scheint das Halley-Korn ein viel zu hohes <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C-Verhältnis zu haben und stammt deshalb eher aus einer Supernova.

Wenn wir uns jetzt den volatilen Teil der Kometenkoma anschauen (**Figur 12**), ist klar, dass Wasser das häufigste Molekül ist, wie bereits viel früher durch Whipple (1950) postuliert. Allerdings überrascht die Fülle an anderen Mo-



**Figur 12**  
Flüchtiges Material im Koma des Kometen Halley

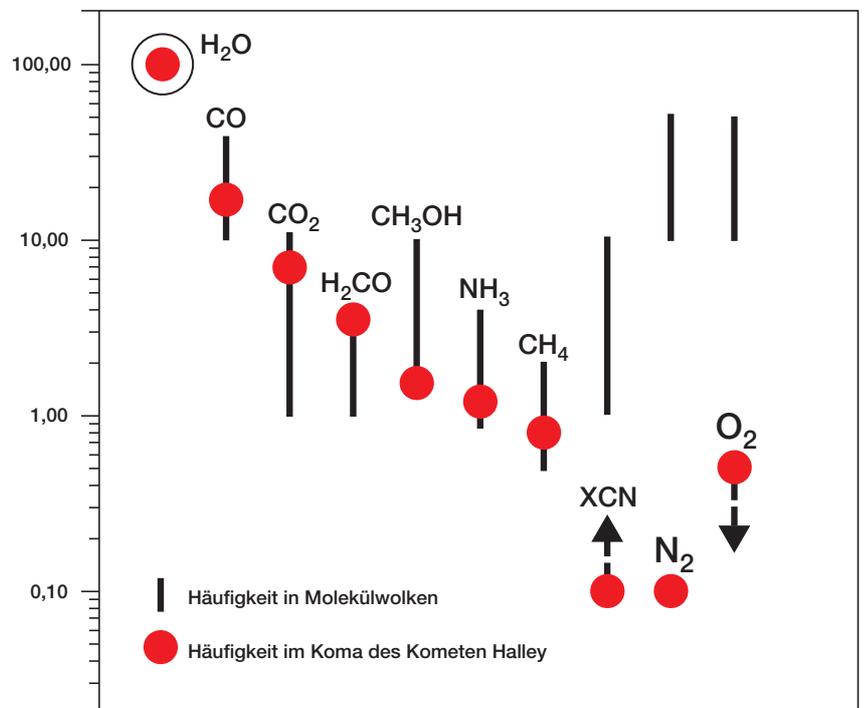
lekülen, vor allem natürlich an organischen Substanzen. Die Massenspektrometer bei Halley konnten nur Substanzen bis zu einem Molekulgewicht von 56 atomaren Masseneinheiten (amu) identifizieren. Man weiss aber, dass Molekulgewichte bis mehr als 100 amu vorkommen und eine der grossen Aufgaben für die zukünftige Kometenforschung wird die Identifikation dieser Moleküle sein. Eine äusserst wichtige Messung war die Bestimmung des Deuteriumgehaltes im kometären Wasser. Deuterium hat die gleichen chemischen Eigenschaften wie Wasserstoff, ist aber doppelt so schwer. Das Verhältnis D/H in einem Molekül kann deshalb Aufschluss geben über die physikalischen Bedingungen bei der Herstellung des Moleküls. Im heutigen Sonnensystem ist das Verhältnis von Deuterium zu Wasserstoff D/H etwa  $3 \times 10^{-5}$ . Auf der Erde ist dieser Wert etwa 5 mal höher. Die Messungen im Kometen Halley und vor kurzem ebenfalls in den Kometen Hale-Bopp und Hyakutake ergeben einen Wert von  $3 \times 10^{-4}$ , also rund doppelt so hoch wie auf der Erde. Ein so hohes Deuteriumverhältnis herzustellen, ist nicht einfach und kann nur durch Ionen-Molekülreaktionen bei tiefen Temperaturen geschehen. Dafür braucht man aber eine sehr hohe Iondichte, was im solaren Nebel sehr unwahrscheinlich ist, oder aber sehr viel Zeit. Die Sonne, Planeten und Kometen haben sich aus dem solaren Nebel in wenigen 100 000 Jahren gebildet. Diese Zeit reicht nicht aus, um das beobachtete Deuterium im Kometen-

wasser zu erklären. Man muss deshalb postulieren, dass das kometäre Wasser älter ist als unser Sonnensystem und schon in der dunklen Molekülwolke, der Grossmutter, entstanden ist.

Wenn aber das Wasser die Bildung und den Kollaps des solaren Nebels überstanden hat, können dann nicht auch organische Moleküle aus der Molekülwolke stammen? Und wenn wir wissen, dass in solchen Wolken komplexe organische Moleküle entstehen bis hin zu Vorläufern von Aminosäuren, den Grundsteinen der Or-

ganismen, könnte dann nicht auch der Ursprung des Lebens in solchen Molekülwolken zu suchen sein? Dies alles ist im Moment noch Spekulation. Noch wissen wir zu wenig über die Vorgänge während der Bildung unseres Sonnensystems, über die physikalischen und chemischen Bedingungen im solaren Nebel. Wenn wir allerdings die bis jetzt bekannte Zusammensetzung von Molekülwolken vergleichen mit der im Kometen Halley gemessenen Zusammensetzung, ist eine gewisse Verwandtschaft nicht abzuleugnen (Figur 13).

Häufigkeit in Prozent relativ zu Wasser



Figur 13

Vergleich der Häufigkeiten einiger Moleküle in Molekülwolken und im Koma des Kometen Halley

Dabei muss man noch wissen, dass Sauerstoffmoleküle sich nur in sehr kaltem, apolarem Eis einbetten, das sich nur im innersten Teil einer Molekülwolke befindet, und dass Stickstoffmoleküle erst bei sehr tiefen Temperaturen kondensiert werden, so dass sie in Kometen entweder nicht eingebettet wurden oder seither verloren gegangen sind. Die Häufigkeit der übrigen Moleküle ist in bemerkenswerter Übereinstimmung. Dies ist bei weitem kein Beweis, dass flüchtige organische Moleküle in Kometen älter sind als die Sonne, aber doch immerhin eine Möglichkeit. Mehr Untersuchungen an Kometen sind sicher nötig.

### Was geplant ist

Aus den vorherigen Erläuterungen sollte hervorgehen, weshalb Kometenforschung auf grosses Interesse stösst. Dies lässt sich auch aus der Zahl der Forschungsprojekte, die sich mit den physisch zwar sehr kleinen, aber von der Zusammensetzung her sehr wichtigen Himmelskörpern befassen, ablesen. In **Tabelle 1** ist eine Zusammenfassung der wichtigsten laufenden Projekte gegeben. Dabei planen sowohl die NASA wie auch die ESA Kometenmissionen. Stardust ist im Februar 1999 gestartet und soll im Schweif des Kometen Wild 2 Staubkörner sammeln und diese zur Erde zurückbringen. Allerdings werden sich diese Untersuchungen auf den steinigen Anteil des Kometen beschränken müssen. Organisches Material dürfte dabei nicht ent-

deckt werden, da es zu flüchtig ist und sich auf diese Art nicht einfangen lässt. Mit Contour plant NASA eine Mission, die gleich mehrere Kometen besucht, aller-

dings jeweils nur im Vorbeiflug. Sicher die grösste und vollständigste Mission wird aber die ESA-Rosetta Mission sein. Darüber im nächsten Abschnitt mehr.

**Tabelle 1**

### Zukünftige Kometenforschung

Beobachtung von vorbeiziehenden Kometen von der Erde aus und mit Satelliten-basierten optischen Instrumenten (Very Large Telescope [VLT], Hubble Space Telescope, etc.); z. B. ....	Hale-Bopp
Stardust, NASA: Start 1999, Einsammeln von Staubkörnern im Schweif des Kometen .....	Wild 2 2006
Contour (Comet Tour), NASA, Vorbeiflug an mehreren Kometen, .....	Encke 2003 Schwassmann-Wachmann-3 2006 d'Arrest 2008
Rosetta, ESA: Rendez-vous mit Komet Wirtanen, Begleitung des Kometen auf seiner Bahn zum Perihel, Absetzen eines Landers .....	2011–2013

# Rosetta

## Von Hieroglyphen und Kometen

Die Mission ist nach dem Rosetta-Stein benannt (**Figur 14**). Dieser Stein wurde 1799 durch die Truppen Napoleons in Ägypten gefunden. Eingemeisselt ist dreimal derselbe Text, nämlich in Hieroglyphen, in demotischer Schrift und in Griechisch. Dadurch wurde es möglich, Hieroglyphen zu entziffern und damit viele Geheimnisse der ägyptischen Kultur zu lüften. Dasselbe hofft man nun von der Rosetta-Mission. Sie soll ermöglichen, die Geheimnisse der Kometen zu entziffern und damit die Geschichte unseres Sonnensystems zu verstehen. Sie wird im Januar 2003 mit einer Ariane 5 von Kourou gestartet. Ihr Ziel ist der Komet Wirtanen, ein kurzperiodischer Kuiper-Gürtel-Komet, der alle 5 Jahre einmal um die Sonne kreist. Der Radius dieses Kometen ist nur ca. 600 m. Die Sonde soll den Kometen nahe beim sonnenfernsten Punkt, dem Aphel treffen und dann bis zum sonnennächsten Punkt, dem Perihel, begleiten. Wieso geht die Reise zu einem solch unbedeutenden Kometen? Die Bahn von Wirtanen ist gut bekannt, der Winkel zur Ekliptik relativ klein, und es ist im Gegensatz zu Halley, Hale-Bopp und Hyakutake ein Kuiper-Gürtel-Objekt. Die ersten beiden Bedingungen sind insbesondere wichtig, da die Raumsonde nicht sehr viel Brennstoff mitnehmen kann. Auch so dauert die Reise



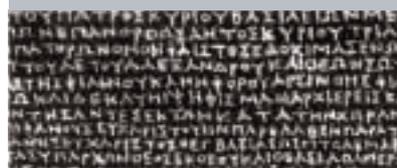
**Rosetta-Stein**  
(entdeckt 1799)



**Hieroglyphen**



**Demotisch**



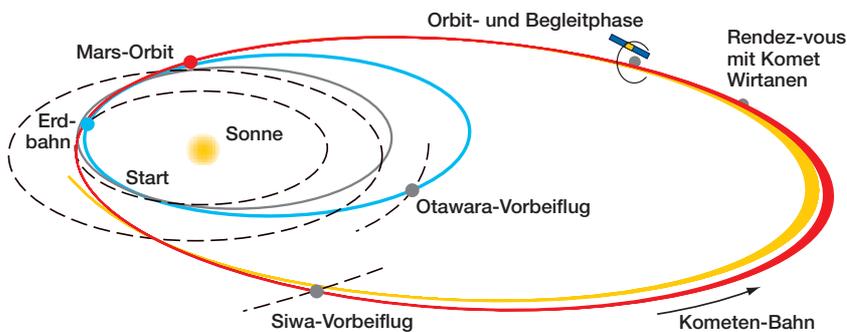
**Griechisch**

**Figur 14**  
Der Rosetta-Stein (British Museum)

zum Kometen acht Jahre und bedingt einen Ausflug zum Mars und dann zweimal zur Erde zurück, um genügend Schwung zu holen. In **Figur 15** ist die komplizierte Bahn der Raumsonde dargestellt. Auf dem Weg zum Kometen wird die Sonde zusätzlich zwei Asteroiden, den kleinen Otawara und den doch etwa 100 km grossen Siwa, besuchen. Die Sonde wird beim Start etwa 3000 kg wiegen. Davon ist ca. 250 kg für die Nutzlast reserviert. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Zusammensetzung und dem Ursprung der Materie. Sowohl der flüchtige Anteil wie auch der Staub sollen gründlich analysiert werden. Selbstverständlich will man aber auch wissen, wie der Komet von der Nähe aussieht, wie sich seine Aktivität als Funktion der Sonnennähe entwickelt, und nicht zuletzt will man auch ein Landemodul absetzen, das seinerseits 9 Experimente besitzt, die den Nukleus des Kometen bis in eine Tiefe von ca. 1 m erforschen werden. Ein Instrument auf der Sonde, das Gas Massenspektrometer, ist für die Universität Bern von besonderer Bedeutung. Nachdem Bern schon bei der Giotto-Mission massgeblich an den Massenspektrometern beteiligt war, liegt die Hauptverantwortung für das Massenspektrometer ROSINA wiederum bei Prof. Balsiger und seinem Team in Bern.

## Rosina

Das Instrument soll das Gas des Kometen vom Beginn der Akti-



**Figur 15**  
Die Bahn der Rosetta-Mission

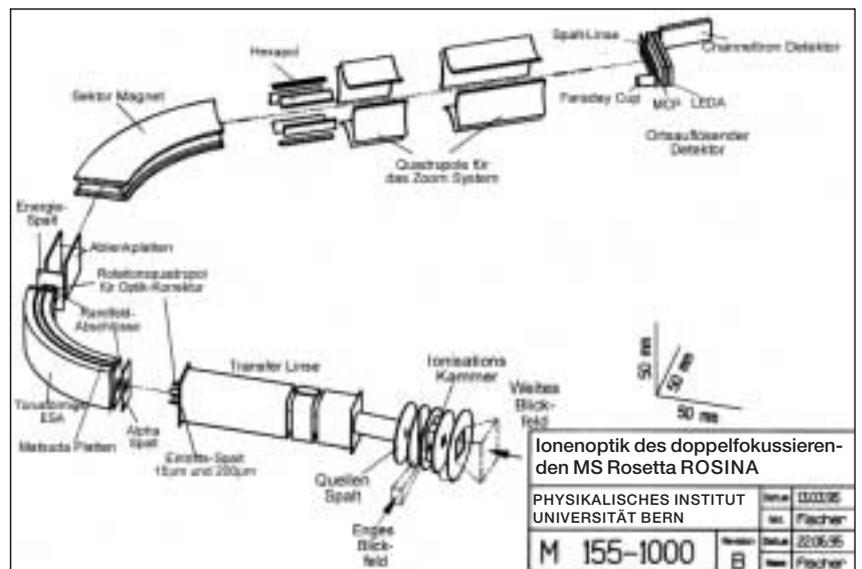
vität bei 3,5 Astronomischen Einheiten bis zum sonnennächsten Punkt untersuchen, und zwar im Hinblick auf die Elementzusammensetzung, die Moleküle hin bis zu schweren organischen Molekülen und die Isotopenverhältnisse. Damit sollte man der Frage nach dem Ursprung des Materials und der Geschichte des Sonnensystems einen grossen Schritt näher kommen. Dies alles kann nicht mit einem einzigen Sensor erreicht werden. Insbesondere schliessen sich der grosse Massenbereich und die verlangte Massenauflösung aus. ROSINA wird deshalb drei Sensoren enthalten, die sich ergänzen, die aber auch wegen der Länge der Mission zum Teil redundant sind.

In Bern steht ein Massenspektrometer, das genügend Massenauflösung besitzt, sehr empfindlich ist und auch zulässt, dass schwere Massen identifiziert werden können. In **Figur 16** ist die Ionenoptik dieses Instruments dargestellt. Das zu untersuchende Neutralgas wird in einer Elektronenstossquelle ionisiert und beschleunigt. Durch einen schmalen Spalt gelangt es in einen toroidförmigen, elektrosta-

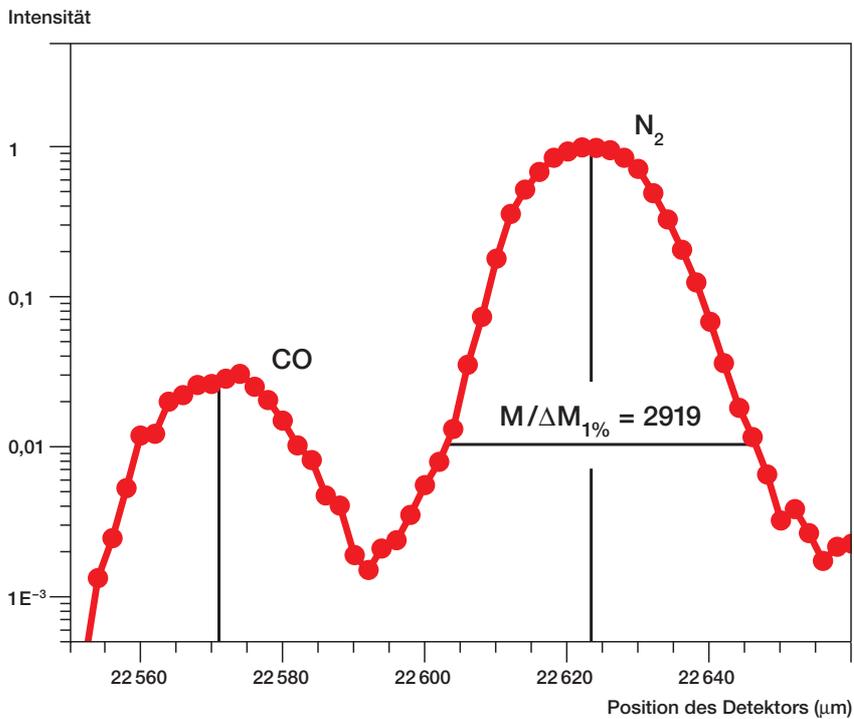
tischen Analysator. Dabei wird die Energie der Ionen separiert. Anschliessend gelangen Ionen gleicher Energie in einen Magneten, der den Impuls und damit die Masse der Ionen separiert. Eine Zoom-Optik hilft, die Massenspektren auf einen ortsauflösenden Detektor abzubilden.

Das abgebildete Massenspektrometer füllt allerdings ein ganzes Zimmer, der Magnet allein ist etwa 150 kg schwer. Für eine Weltraum-

mission kann man jetzt zwar alles verkleinern, dabei werden dann aber auch die mechanischen Toleranzen entsprechend kleiner. Es braucht die ganze Erfindungskraft erfahrener Ingenieure, um ein Instrument zu fertigen, das wissenschaftlich ebensoviel leistet, dessen Gesamtgewicht aber nicht mehr als 15 kg ist, das zudem Hitze und Kälte überstehen kann und auch beim Start der Ariane 5 nicht auseinanderfällt. Dass das Prinzip funktioniert, sieht man in **Figur 17**. Dieses Massenspektrum wurde mit einem Prototypen aufgenommen. Man sieht ein Spektrum der Masse 28. Kohlenmonoxyd und Stickstoffmoleküle sind dabei ganz klar getrennt, obwohl sich die Massen nur um ca.  $1/3000$  unterscheiden. Damit sollte es möglich sein, beim Kometen den vorhandenen Stickstoff zu messen und zu entscheiden, ob er wirklich fehlt, oder ob er in einer anderen Form doch vorhanden ist.



**Figur 16**  
Das Prinzipschema des Rosina-DFMS-Instrumentes



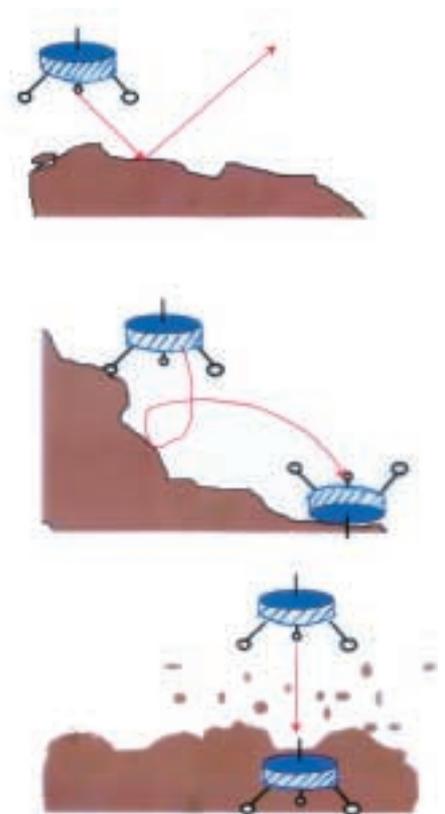
**Figur 17**  
Messungen mit dem Prototypen des Rosina-Instrumentes: Nachweis des massenspektralen Auflösungsvermögens an Hand von CO und N<sub>2</sub>

Ein weiteres faszinierendes Experiment ist sicher das Landemodul, das in deutsch-französischer Kooperation gebaut wird (**Figur 18**). Dabei sind ganz besondere Schwierigkeiten zu überwinden. Zum Beispiel schwanken die Einschätzungen der Festigkeit der Kometenoberfläche um mehrere Größenordnung je nach Modell. Die Landung auf dem Kometen dürfte dabei besonders schwierig und unsicher werden. In **Figur 18** sind verschiedene Szenarien gezeichnet. Da der Komet so klein ist, hat er praktisch keine Anziehungskraft. Ist die Oberfläche also hart, wird der Lander aufprallen und wie ein Gummiball gleich wieder wegfliegen. Diesem Umstand wird mit Harpunen Rech-

nung getragen, die bei der Landung ausgeworfen werden, um das Landemodul zu verankern. Die Oberfläche des Kometen ist wahrscheinlich alles andere als flach. Damit bleibt zu hoffen, dass die Landung nicht an einem zu steilen Abhang geschieht. Ist aber die Oberfläche, wie zum Teil vermutet wird, viel flaumiger als der leichteste Pulverschnee, könnte das Modul auch gleich vollständig im Kometen versinken. Es gibt Abschätzungen, die postulieren, dass das Modul eigentlich 17 m lange Füße haben müsste.

Zahlreiche Wissenschaftler und Ingenieure arbeiten zur Zeit intensiv an der Rosetta-Mission. Mit der Länge der Mission und den extre-

men Umweltbedingungen, der sie ausgesetzt wird, ist die Rosetta-Mission sicher eines der ambitionsesten Projekte der Europäischen Weltraumforschung. Sollte sie gelingen, und davon sind wir alle überzeugt, wird sie einen Meilenstein in der Erforschung des Sonnensystems darstellen. Sicher ist auch, dass uns einige spannende Augenblicke bevorstehen, bevor das Geheimnis der Kometen und damit ein weiteres Kapitel unserer Vergangenheit offen gelegt wird.



**Figur 18**  
Szenarien für die Landung auf dem Kometen Wirtanen

# SPATIUM

## Zur Autorin



Kathrin von Burg ist am 11. Dezember 1951 in Balsthal als Tochter eines Ärztepaares zur Welt gekommen. Sie hat dort die Primarschule besucht, später die Kantonsschule in Solothurn, wo sie 1970 die Maturität vom Typus A (mit Latein, Griechisch und Hebräisch) erworben hat. Nach einem Exkurs in praktische archäologische Arbeiten führte sie ihr weiterer Weg in ihre Vaterstadt Basel, wo sie sich an der Universität in Physik mit den Nebenfächern Mathematik und Chemie immatrikulierte. 1976 erhielt sie das Diplom in Experimentalphysik mit einer Arbeit über das Thema «Bau eines Wattmeters zur Leistungsmessung von Lichtquellen». Eine Arbeit auf dem Gebiet der Optik anorganischer Molekülkristalle trug ihr

1980 die Würde eines Doktors der Physik der Universität Basel ein. In den folgenden beiden Jahren arbeitete Kathrin von Burg als Research Assistant an der Universität New York auf dem Gebiet der Photoelektronenspektroskopie an Flüssigkeiten. Wieder in die Schweiz zurückgekehrt galt es, eine Stelle zu finden und zufälligerweise war beim Physikalischen Institut der Universität Bern eine Stelle frei, und so kam es, dass sie unter der Leitung von Prof. Johannes Geiss Arbeiten im Bereich der Erforschung von Kometen aufnahm. Damals wurde gerade das Massenspektrometer für die Sonde Giotto gebaut, welches später den Halley'schen Kometen und den Kometen Grigg-Skjellerup beobachtete. Ab 1996 übernahm sie die Projektleitung für eine neue Generation von Massenspektrometern für die Sonde Rosetta der europäischen Raumfahrtagentur, welche im Zeitraum 2011 bis 2013 den Kometen Wirtanen aus nächster Nähe beobachten wird. Die Universität Bern erteilte der inzwischen mit dem Physiker Laurencz Altwegg verheirateten Autorin 1996 die Venia Legendi auf dem Gebiet der Experimentalphysik, insbesondere in der Physik des Sonnensystemes. Parallel dazu arbeitet Kathrin Altwegg-von Burg

als Beraterin des International Space Science Institutes, wo sie Workshops zum Thema Kometen leitet.

Nicht nur Studenten an den verschiedenen Hochschulen ihres bisherigen Wirkens kamen in den Genuss des umfassenden Wissens von Kathrin Altwegg. Sie ist begeisterte Reiterin und manches junge Pferd hat sich von ihr in die hohe Kunst der Dressur einführen lassen. Im Weiteren erwandert sie gerne mit ihrem Mann und ihren beiden Töchtern die irdische Natur, sei es zu Fuss oder auf den Skiern.

Es ist Kathrin Altwegg-von Burg ein grosses Anliegen, dass Knaben und Mädchen den gleichen Zugang zur Berufsbildung haben. Meitschi und Giele sind gleich intelligent. Vor allem die Bilder, welche die Gesellschaft in unsere junge Generation projiziert, sind die Ursachen für die Absenz von Frauen in Technik und Wissenschaft. An der Astrophysik faszinieren sie die Freiräume des Denkens, die sich in den Tiefen des Alls noch finden lassen. Da ist der Weg zum Aufbau einer neuen Theorie auf Grund der erst in den Anfängen steckenden Grundlagen wesentlich weiter als in anderen Bereichen der Naturwissenschaften. Da ist Kreativität gefragt.