

**WIS** wissenschaft  
in die schulen!

# Alles klar zur Landung

## Das furiose Finale der europäischen Kometenmission Rosetta

*Mehr als zwei Jahre lang begleitete die Raumsonde Rosetta den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko auf seiner Bahn um die Sonne und untersuchte ihn aus nächster Nähe. Nun steht am 30. September 2016 das Ende der Mission bevor – Rosetta selbst soll auf der Oberfläche von 67P aufsetzen.*

Von Harald Krüger

**E**in kleiner eisiger Himmelskörper ohne Atmosphäre weit jenseits der Umlaufbahn des Mars: Am kohlschwarzen Himmel wird ein Lichtpunkt nach und nach immer heller und bewegt sich, schließlich lässt sich eine längliche Form erkennen. Sie kommt langsam immer näher, und es zeigen sich zwei lange rechteckige Ausleger und ein schwarzer Quader in der Mitte. Das Gebilde wird immer größer, schließlich berührt einer der beiden Ausleger den schwarzen Boden des Himmelskörpers. Dabei verbiegt er sich und der zentrale Quader schlägt wie in Zeitlupe auf.

Was wie eine Katastrophe aussieht, ist in Wirklichkeit das geplante spektakuläre Ende der Mission Rosetta. Das Datum ist der 30. September 2016, und der Ort ist die Oberfläche des Kerns des Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko.

Rund zwei Jahre zuvor, am 6. August 2014, herrschte großer Jubel bei den Missionskontrolleuren im Europäischen Weltraum-Operationszentrum ESOC in Darm-

stadt. Nach mehr als zehn Jahren Flug war die Raumsonde Rosetta erfolgreich in eine 100 Kilometer hohe Umlaufbahn um den nur etwa vier Kilometer großen Kern des Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko eingeschwenkt – eine Premiere in der Raumfahrt (siehe SuW 10/2014, S. 28). Nur wenige Monate später, am 12. November, gelang ihr ein zweiter Meilenstein: Die Tochtersonde Philae setzte als erster von Menschen gemachter Raumflugkörper auf dem Kometenkern auf (siehe SuW 1/2015, S. 28). Die Muttersonde Rosetta tritt nun in die Fußstapfen von Philae und soll in der Region Ma'at niedergehen.

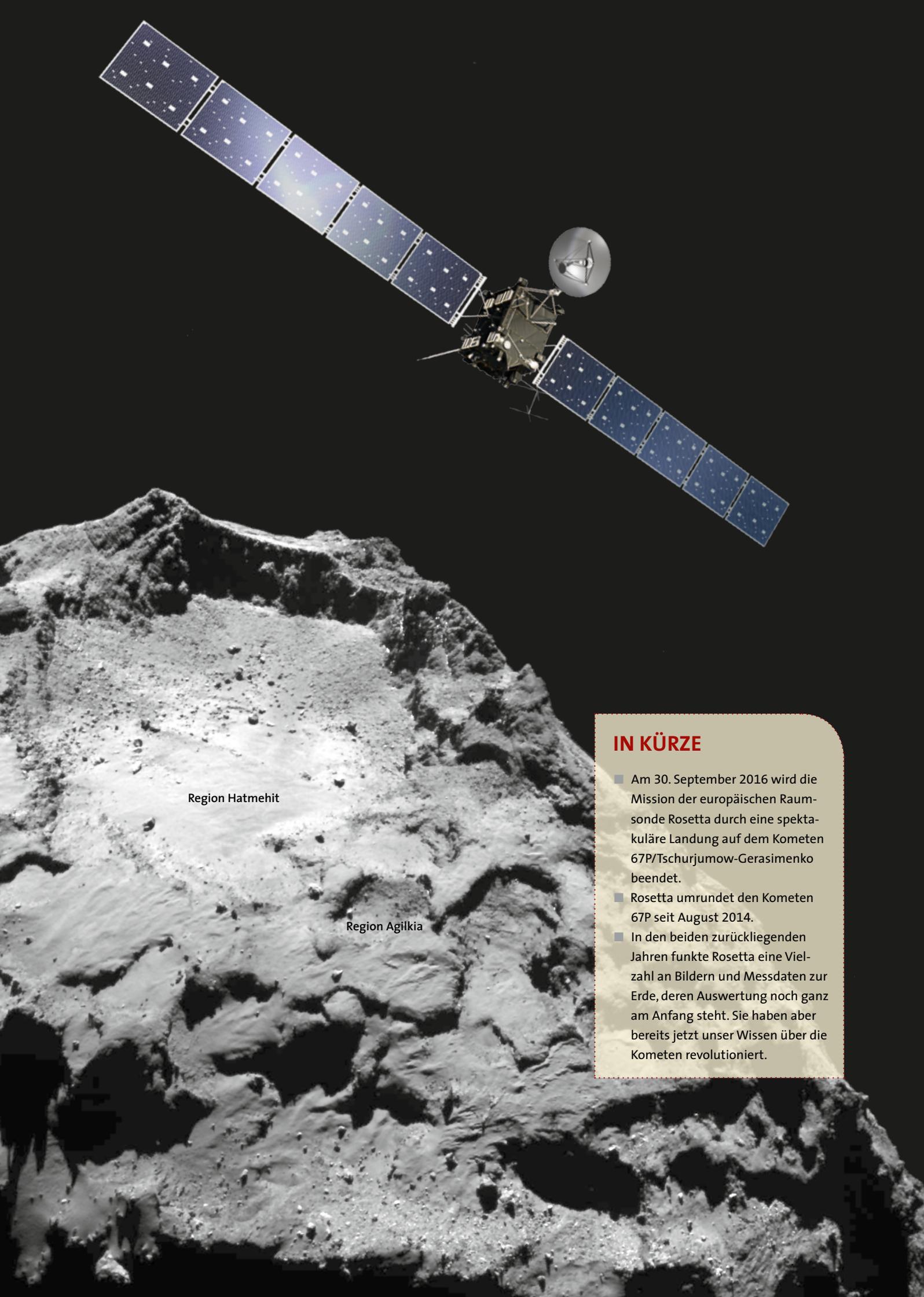
Rosetta untersuchte seit der Ankunft den Kometenkern nahezu ununterbrochen mehr als zwei Jahre lang aus nächster Nähe und schickte eine Fülle von Bildern und Messdaten zur Erde. Allerdings würde die Vielzahl der bisher gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse den Rahmen dieses Artikels bei Weitem sprengen. Einige Resultate wurden bereits in früheren Ausgaben dieser Zeitschrift vor-

Ein eindrucksvolles Ende: Die europäische Raumsonde Rosetta setzt am 30. September 2016 zum Schluss ihrer Mission auf dem Kern des Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko auf.

ESA / Rosetta / MPS for OSIRIS Team MPS / UPD / IAA / SSO / INITA / UPM / DASP / IDA; Sonde: ESA – C. Carreau / ATG medialab



angestrebtes  
Landegebiet  
von Rosetta



Region Hatmehit

Region Agilkia

## IN KÜRZE

- Am 30. September 2016 wird die Mission der europäischen Raumsonde Rosetta durch eine spektakuläre Landung auf dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko beendet.
- Rosetta umrundet den Kometen 67P seit August 2014.
- In den beiden zurückliegenden Jahren funkte Rosetta eine Vielzahl an Bildern und Messdaten zur Erde, deren Auswertung noch ganz am Anfang steht. Sie haben aber bereits jetzt unser Wissen über die Kometen revolutioniert.



Stark überbelichtete Bilder des Kerns von Tschurjumow-Gerasimenko lassen zahlreiche Strahlen aus Gas und Staub erkennen, die aus dem Inneren hervorbrechen (links). Zu dieser Zeit befand sich der Schweifstern kurz vor dem Erreichen der größten Sonnennähe. Gelegentlich wurden Strahlen aus Gas und Staub beobachtet, die kurz nach dem lokalen Sonnenaufgang aus dem Kern von 67P ausströmten (unten). Wenige Minuten später waren sie schon wieder inaktiv.



gestellt. Wir wollen uns deshalb hier auf drei Hauptfragenkomplexe der aktuellen Kometenforschung konzentrieren. Diese sind:

- Wie funktionieren die Kometen, und was treibt ihre Aktivität an?
- Unter welchen Bedingungen entstanden die Kometenkerne im frühen Sonnensystem, und wie haben sich die Schweifsterne seitdem entwickelt?
- Woher stammt das irdische Wasser, brachten die Kometen die Grundbausteine des Lebens auf unseren Heimatplaneten?

Um Antworten auf diese Fragen zu finden, wurde als Ziel für die Rosetta-Mission der Komet 67P ausgewählt, der sich nach unserem heutigen Kenntnisstand seit seiner Entstehung vor 4,56 Milliarden Jahren nur wenig verändert hat.

### Komet 67P – der Muster-Schweifstern

Eine wesentliche Aufgabe von Rosetta bestand darin, nach der Landung von Philae den Kometen 67P auf seiner Bahn um die Sonne zu begleiten. Dabei verfolgte sie mit ihren Kameras und Messinstrumenten aus der Nähe, wie sich die Aktivität seines Kerns in Abhängigkeit vom Abstand zur Sonne entwickelte. Wie erwartet, ist hauptsächlich die Tagseite von 67P aktiv, da sie die meiste Sonneneinstrahlung erhält. Die größte Aktivität konzentriert sich in der Regel auf Regionen in der Nähe des lokalen Mittags bis zum frühen Nachmittag (siehe Bildserie ganz oben). Die Sonde beobachtete aber auch Aktivitätsausbrüche, die nur einige Minuten dauerten (siehe Bildserie oben).

Das vom Kern freigesetzte Gas besteht überwiegend aus Wasserdampf. Aus der

gemessenen Wasserproduktionsrate ergab sich, dass beim Perihel, wenn der Kern am aktivsten ist, nur etwa sechs Prozent der Kernoberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt aktiv sind. Die Kernaktivität konzentriert sich somit auf kleine Gebiete, wobei die lokalen Beleuchtungsverhältnisse und die Morphologie der Oberfläche eine wichtige Rolle spielen. Besonders stark der Sonne ausgesetzt Bereiche werden intensiver erwärmt; sie erodieren somit schneller als Gebiete, die lange Zeit im Schatten liegen. An manchen Stellen ließen sich Veränderungen der Oberfläche innerhalb von einigen Tagen bis wenigen Wochen beobachten (siehe Bildserie unten).

Die mittlere Dichte von 67P beträgt etwa ein halbes Gramm pro Kubikzentimeter, rund die Hälfte der Dichte von Wassereis. Vergleichbare Werte fanden

24. Mai 2015

3. Juni 2015

5. Juni 2015

13. Juni 2015

18. Juni 2015



## Das Leben der Kometen

Unser Sonnensystem entstand vor 4,56 Milliarden Jahren aus einer interstellaren Wolke aus Gas und Staub. Die Kometenkerne gelten als »Botschafter« aus dieser frühen Phase. Sie sind nach unserem heutigen Kenntnisstand im äußeren Bereich des solaren Urnebels entstanden, in Regionen, in denen es kalt genug war, dass dort leicht flüchtige Substanzen wie Wasser, Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid kondensieren konnten. Die meiste Zeit seit ihrer Entstehung verbringen die Kometen in den kalten Regionen des Sonnensystems weit weg von der Sonne im Kuipergürtel oder in der Oort'schen Wolke. Von dort können sie in das innere Sonnensystem gelangen. Soweit wir wissen, stammt der Komet 67P aus dem Kuipergürtel.

Nähert sich ein Kometenkern auf einer exzentrischen Umlaufbahn der Sonne, so nehmen die Sonneneinstrahlung und damit die Oberflächentemperatur zu. Die Wärme dringt in das Kometenmaterial ein, so dass die leicht flüchtigen Substanzen sublimieren können. Das dabei freiwerdende Gas dringt durch das poröse Kometenmaterial an die Oberfläche, und der Kern wird aktiv. Feste, überwiegend aus Mineralen bestehende Partikel, der Staub, werden vom Gas mitgerissen. Das Gas und der Staub bauen die Koma des Kometen auf (siehe Grafik rechts). Das zunächst neutrale Gas wird anschließend durch die ultravi-

olette Strahlung der Sonne ionisiert und durch den Sonnenwind wegtransportiert, es bildet den Ionenschweif des Kometen, der stets vom Tagesgestirn wegweist. Die Staubteilchen werden durch den Strahlungsdruck der Sonne ebenfalls aus der Koma transportiert und werden schließlich zu dem meist gebogenen Staubschweif.



sich auch bei anderen Kometenkernen, die von Raumsonden aus der Nähe erkundet wurden. Die Planetenforscher gehen daher davon aus, dass Wassereis ein Hauptbestandteil von 67P ist. Dennoch fand sich nur vereinzelt freiliegendes Eis auf der Kernoberfläche. Der weitaus größte Teil der Oberfläche ist mit einer Schicht aus feinem Staub bedeckt; dieser besteht unter anderem aus dunklem organischem Material, wie es Messungen mit dem Infrarotspektrometer von Rosetta ergaben. Ein Bild vom ersten Aufsetzpunkt der Tochtersonde Philae in Agilkia zeigt Fußabdrücke der Sonde, woraus sich für die Staubschicht eine Dicke von mindestens 10 bis 20 Zentimetern ergibt. Darunter befindet sich eine sehr harte Schicht, die vermutlich aus gefrorenem Wassereis besteht.

Auf der übrigen Oberfläche kennen wir die Mächtigkeit der Staubschicht bisher

nicht, sie dürfte an manchen Stellen viele Meter dick sein. Die Aktivität des Kometen verteilt den Staub großflächig über die Kernoberfläche. Er beeinflusst aber auch die Aktivität des Schweifesterns, denn bereits eine dünne Staubschicht verhindert, dass sich leicht flüchtige Substanzen im darunter liegenden Kometenmaterial durch die Sonneneinstrahlung erwärmen und sublimieren – also direkt von Eis in Gas übergehen. Die Staubschicht lässt nämlich so gut wie keine Wärme durch.

Die Bilder früherer Missionen zu anderen Kometenkernen enthüllten zahlreiche nahezu kreisförmige Gruben mit mehreren hundert Meter Durchmesser und ähnlich großen Tiefen. Allerdings reichte die Auflösung dieser Aufnahmen nicht aus, um den Ursprung dieser Gruben zu erkennen. Einige Forscher vermuteten, dass es Einschlagkrater sein könnten, ähnlich

jenen auf dem Mond oder den Asteroiden (siehe SuW 7/2012, S. 42). Auch auf 67P findet sich eine Vielzahl solcher Gruben oder Schloten (siehe Bilder auf S. 30). Rosetta untersuchte sie nun erstmals im Detail, dabei zeigte sich, dass ihre Form und Häufigkeit nicht zu Einschlagkratern passen. Die Aufnahmen erlauben einen Blick unter die Oberfläche von 67P: Manche Grubenwände weisen auf einer Skala von einigen Metern

**Innerhalb von nur drei Monaten im Jahr 2015 wurden mit der wissenschaftlichen Kamera OSIRIS an Bord von Rosetta zahlreiche Veränderungen an der Oberfläche des Kometenkerns beobachtet, die durch Pfeile markiert sind. Hier heizte die Sonnenstrahlung das Kometenmaterial auf, so dass es zur Verdampfung von flüchtigen Stoffen wie Wassereis kam.**

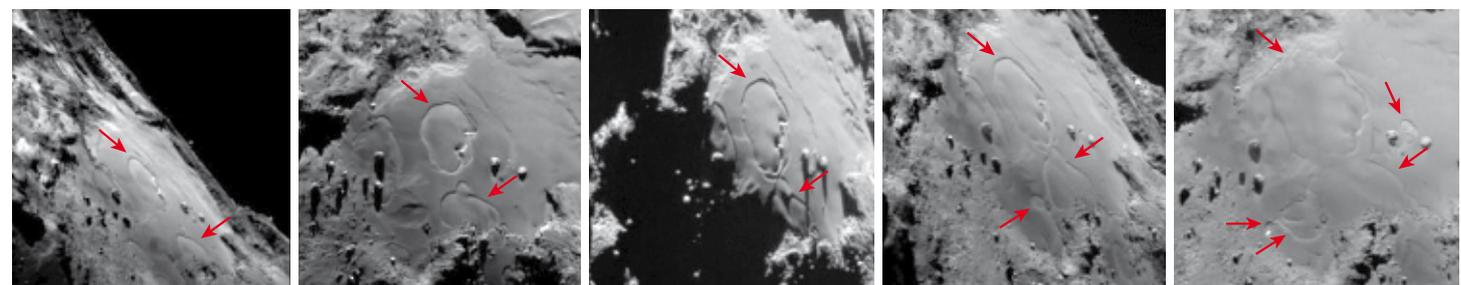
23. Juni 2015

27. Juni 2015

1. Juli 2015

2. Juli 2015

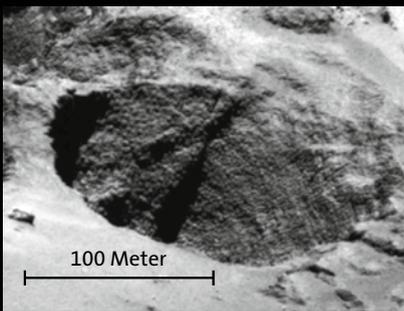
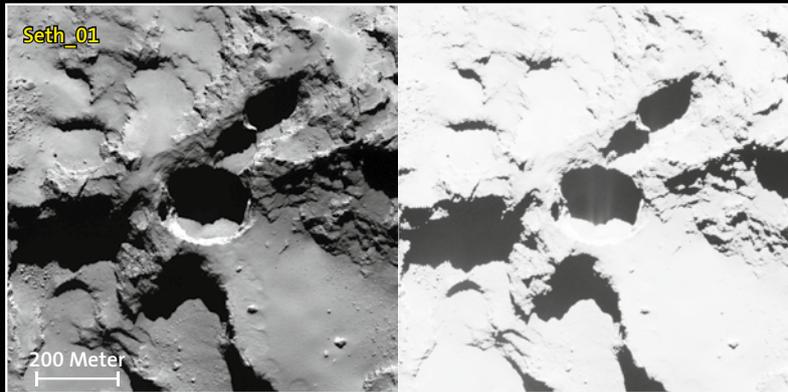
11. Juli 2015



# Gruben auf 67P/Tschurjumow-Gerasimenko

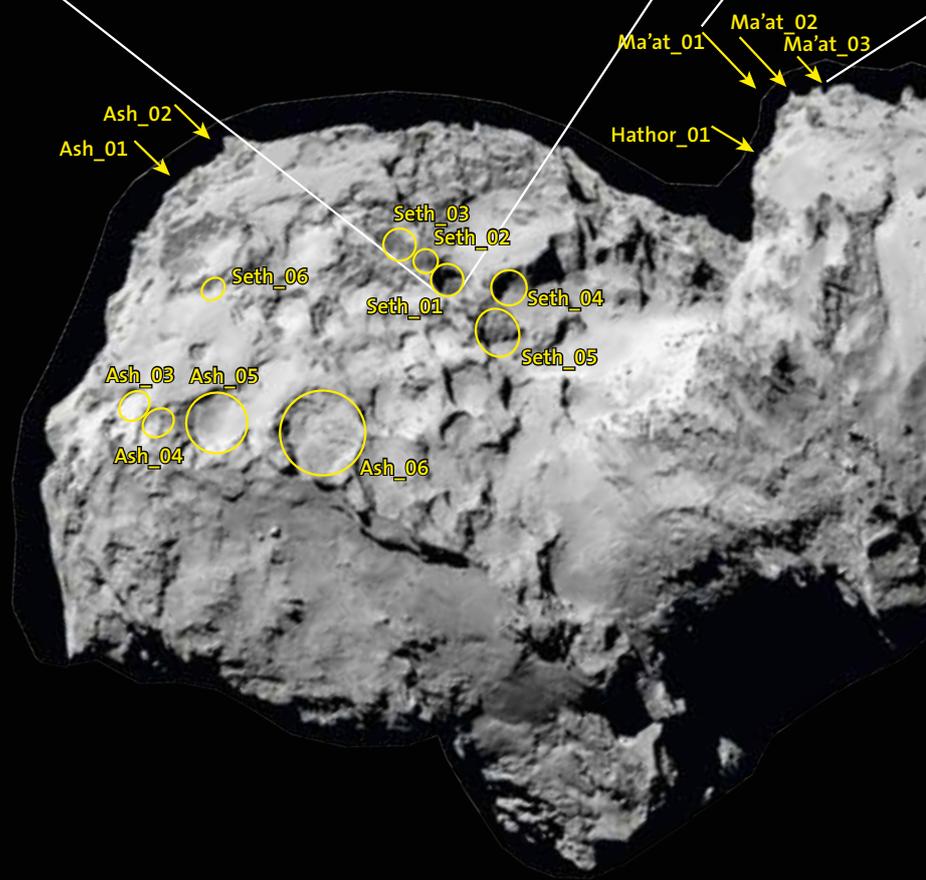
**A**uf der Oberfläche des Kerns von 67P lassen sich Dutzende von runden Gruben ausmachen, die einen großen Teil der Oberfläche einnehmen. Bei der Grube Seth\_01 konnten die Forscher den Durchmesser und die Tiefe ermitteln, sie betragen 220 Meter beziehungsweise 185 Meter. Durch eine starke Erhöhung der Bildhelligkeit zeigen sich bei dieser Grube auf 67P Strahlen aus Gas und Staub, die aus der Wandung strömen.

Die Gruben auf 67P sind offenbar stetigen Veränderungen während der Annäherungen an die Sonne unterworfen (rechts Mitte). Ma'at\_01 ist frisch und offenbar noch aktiv, während sich bei ihrer Nachbarin größere Geröllmassen finden, die schon einen Großteil des Volumens einnehmen. Ma'at\_03 ist schon weitgehend aufgefüllt und von Staub überdeckt, so dass nur noch eine sanfte Delle übrig ist.



## Eine Grube im Detail

An eine Gänsehaut fühlten sich die Wissenschaftler der Rosetta-Mission erinnert, als sie dieses Bild einer tiefen Grube auf 67P betrachteten. Die runden Gebilde an der Wandung sind jeweils mehrere Meter groß.



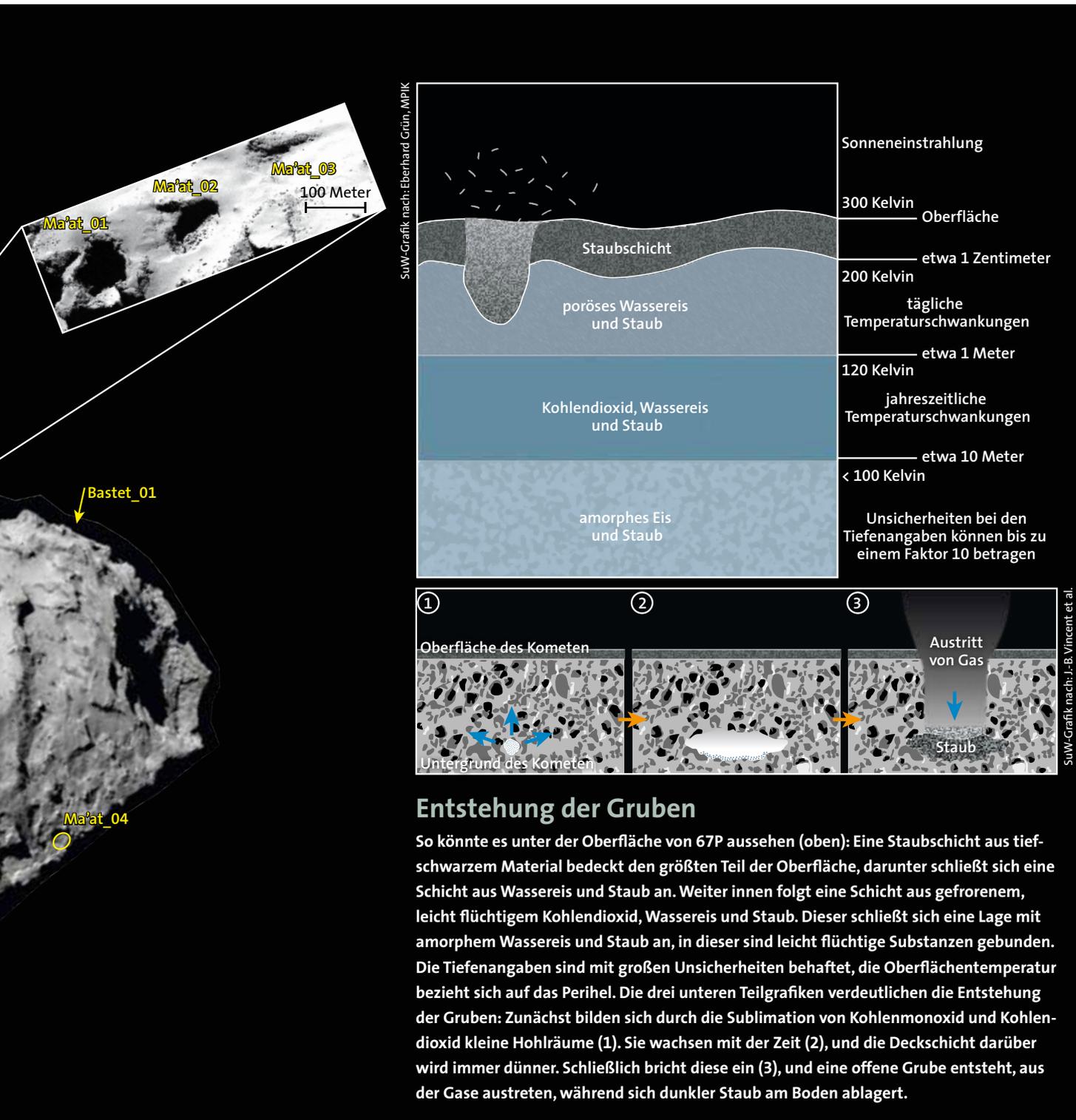
eine körnige raue Struktur auf, die manche Forscher mit einer Gänsehaut vergleichen (siehe Bild oben). Ob sie ein Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Kometenkerns sind oder erst durch dessen Aktivität entstanden, ist allerdings unklar. An einigen Stellen beobachteten die Wissenschaftler aus den Grubenwänden ausströmendes Gas und Staub, vereinzelt waren sie der Ursprung gerichteter Gas- und Staubströme, der so genannten Jets (siehe Bilder oben).

Modelle für die Erklärung der Gruben gehen davon aus, dass sie weitgehend von

innen heraus, also unterhalb der Kernoberfläche entstehen. Demnach bilden sich durch die Sublimation leichtflüchtiger Substanzen wie Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zunächst kleinere Hohlräume bis in Tiefen von mehreren hundert Metern. Wenn diese Hohlräume mit der Zeit wachsen, so wird die darüber liegende Deckschicht immer dünner, bis sie schließlich einbricht und eine offene Grube entsteht. Anschließend führt die Sonneneinstrahlung dazu, dass Material von den nun frei liegenden Wänden subli-

miert und die Grube weiter wächst. Sie entsteht vermutlich während vieler Umläufe des Kometen um die Sonne. Lässt dann die Aktivität nach, so wird sie möglicherweise durch Ablagerungen von anderen Stellen des Kometen wieder zugeschüttet (siehe Grafiken rechts oben).

Für den Ursprung der Hohlräume diskutieren die Forscher verschiedene Szenarien: Sie könnten bereits seit der Entstehung des Kometenkerns vorhanden sein. Alternativ könnten sie aber auch erst allmählich durch die Sublimation besonders



### Entstehung der Gruben

So könnte es unter der Oberfläche von 67P aussehen (oben): Eine Staubschicht aus tief-schwarzem Material bedeckt den größten Teil der Oberfläche, darunter schließt sich eine Schicht aus Wassereis und Staub an. Weiter innen folgt eine Schicht aus gefrorenem, leicht flüchtigem Kohlendioxid, Wassereis und Staub. Dieser schließt sich eine Lage mit amorphem Wassereis und Staub an, in dieser sind leicht flüchtige Substanzen gebunden. Die Tiefenangaben sind mit großen Unsicherheiten behaftet, die Oberflächentemperatur bezieht sich auf das Perihel. Die drei unteren Teilgrafiken verdeutlichen die Entstehung der Gruben: Zunächst bilden sich durch die Sublimation von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid kleine Hohlräume (1). Sie wachsen mit der Zeit (2), und die Deckschicht darüber wird immer dünner. Schließlich bricht diese ein (3), und eine offene Grube entsteht, aus der Gase austreten, während sich dunkler Staub am Boden ablagert.

flüchtiger Substanzen entstehen, die sich in Klumpen oder ähnlichen Ansammlungen im sonst weit gehend homogenen Kometenmaterial konzentrieren. In beiden Fällen liefert die Einstrahlung der Sonne die für die Sublimation nötige Wärme. Entscheidend für die Erwärmung sind möglicherweise Brüche und Verwerfungen, durch welche die Sonnenstrahlung tiefer eindringen kann (siehe Grafik rechts oben).

Zudem könnte es eine innere Wärmequelle im Kometenkern geben: Seit Jahren diskutieren die Kometenforscher die Um-

wandlung von amorphem in kristallines Wassereis. Sie findet bei einer Temperatur von etwa -140 Grad Celsius statt und setzt viel Energie frei. Eine weitere Wärmequelle könnten sehr langlebige Radionuklide sein, die sich bereits im Ursprungsmaterial des Kometen befanden und durch ihre Zerfallswärme das Kerninnere erwärmen. Unklar ist jedoch, ob Kometen überhaupt amorphes Eis und Radionuklide enthalten, und wenn ja, in welchen Mengen.

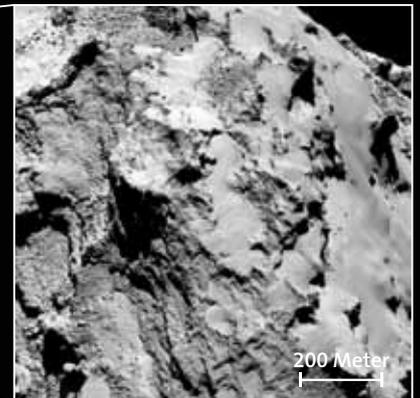
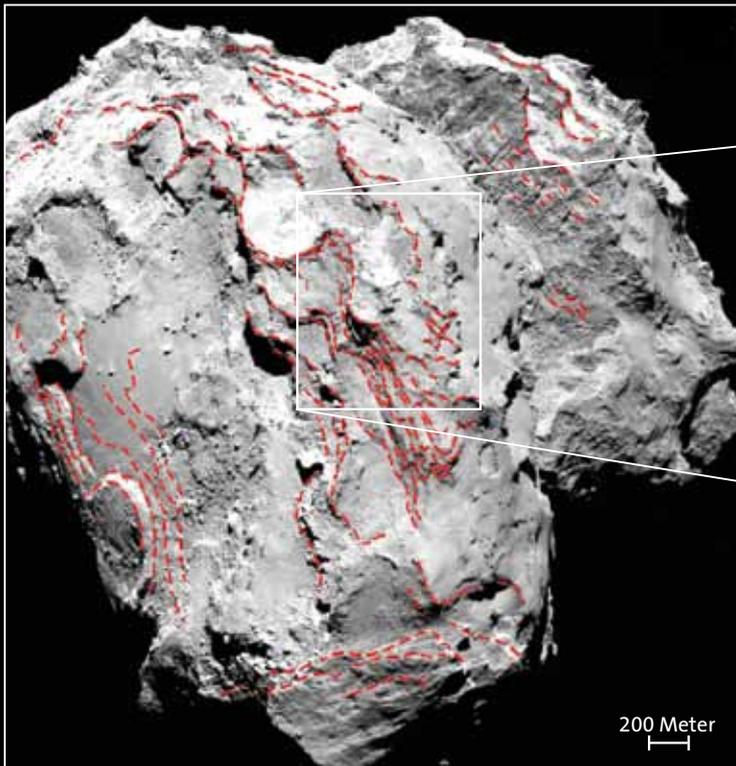
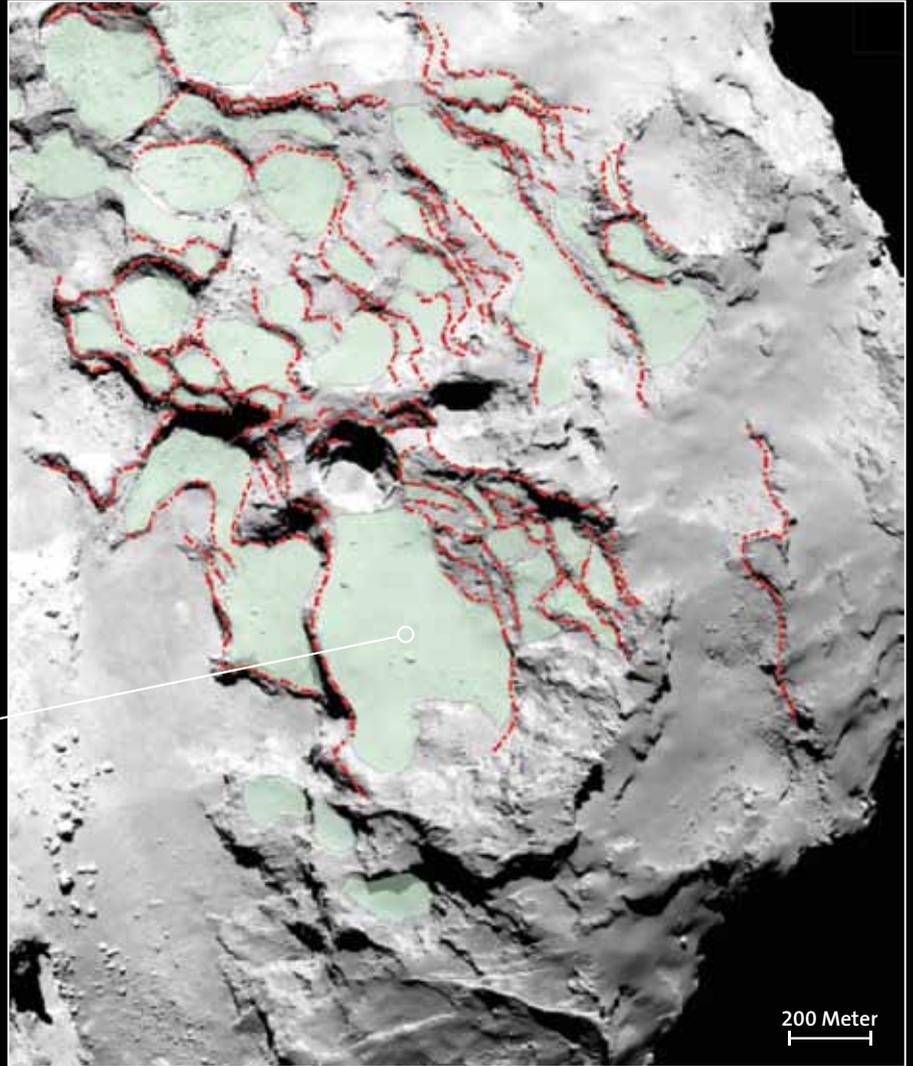
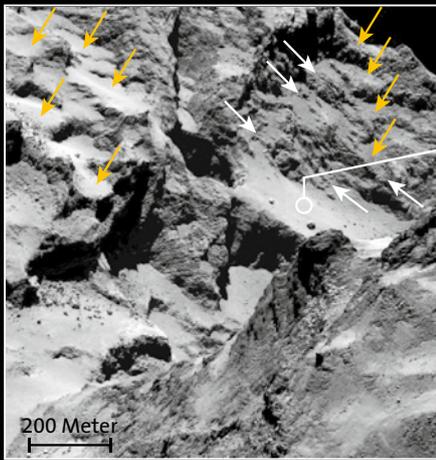
Die Forscher vermuten, dass der Kern von 67P mindestens bis in eine Tiefe von

mehreren 100 Metern inhomogen ist. Die Messungen verschiedener Rosetta-Instrumente ergeben übereinstimmend eine Porosität von 70 bis 80 Prozent, somit bestehen etwa vier Fünftel des Kernvolumens aus Hohlräumen. Zudem ist das Material des Kometen auch auf kleineren Skalen sehr porös, die meisten der von den Staubinstrumenten gemessenen weniger als einen Millimeter großen Staubteilchen weisen ähnlich hohe Porositäten auf. Die geringe mittlere Dichte von etwa einem halben Gramm pro Kubikzentimeter lässt

# Terrassen und Ebenen auf 67P/Tschurjumow-Gerasimenko

Auf der Oberfläche des Kerns von 67P lassen sich zahlreiche Schichten erkennen. Sie zeigen scharf begrenzte Übergänge zueinander, und ihre Genese ist unklar. Auf dem Bild rechts sind wichtige Terrassen hellgrün markiert, während die roten Linien die Ränder von frei gelegten Schichten des Kometenkerns verdeutlichen. Im Detailfoto unten sind sie durch Pfeile verdeutlicht, die gelben zeigen Terrassen an, die weißen Schichtgrenzen.

Auf den beiden unteren Bildern sind ebenfalls Schichtungen im Material des Kometenkerns hervorgehoben.



sich ebenfalls nur durch eine hohe Porosität erklären.

Sollten die Hohlräume von Anfang an vorhanden gewesen sein, deutet das darauf hin, dass sich 67P aus kleineren Körpern mit Durchmessern von etwa 10 bis 100 Metern gebildet haben müsste. Dies führt uns zur zweiten Frage: Was wissen wir über die Entstehung des Kometenkerns?

### Ein unerwarteter Doppelkörper

Eine der größten Überraschungen der Rosetta-Mission waren die unregelmäßige Form des Kerns von 67P und seine vielfältige Morphologie. Auf Grund früherer erdgebundener Beobachtungen erwarteten die Kometenforscher einen regelmäßig geformten, etwa vier Kilometer großen kartoffelförmigen Himmelskörper (siehe SuW 4/2014, S. 32). Rosetta enthüllte jedoch schon beim Anflug einen hantelförmigen Kern, dessen Form unter anderem mit einem Quietsche-Entchen oder einem alten Stiefel verglichen wurde. Er scheint aus Schichten zu bestehen, die mindestens 800 Meter tief reichen und auf der Oberfläche zum Teil als Terrassen hervortreten (siehe Bilder links). Ähnliche Schichtungen fanden sich auch bei den Kometen Tempel 1 und Wild 2, jedoch reichte die Auflösung der Raumsondenbilder nicht aus, um ihren Ursprung zu untersuchen.

Mittels der Bilder von Rosetta wurden dreidimensionale Modelle des Kometenkerns erstellt, welche die Ausrichtung der Schichten in Bezug auf das lokale Schwerfeld auf der Kernoberfläche zeigen. Die Schichten bilden eine Art Zwiebschalenstruktur. Daraus ergab sich, dass 67P möglicherweise aus zwei Einzelkörpern be-

steht, welche die beiden Enden der Hantel darstellen und die durch ihre Schwerkraft aneinander gebunden sind. Allerdings ist unklar, ob die Schichtungen eine Folge der ursprünglichen Entstehungsbedingungen des Kometen sind oder ob sie erst später entstanden. Rosetta wies auch Unterschiede in der Zusammensetzung der beiden Hantelenden nach, zudem gibt es Hinweise auf einen Dichteunterschied der beiden Teilkörper von etwa zehn Prozent. Beides deutet auf zwei verschiedene Ursprungskörper hin.

Eine wichtige Größe für die Zusammensetzung des Kometenkerns ist seine Entstehungstemperatur. Diese ließ sich aus den gemessenen Häufigkeiten einiger leicht flüchtiger Substanzen eingrenzen. Beispielsweise wurde mit dem Gasmassenspektrometer von Rosetta bei 67P erstmals molekularer Sauerstoff ( $O_2$ ) in der Koma eines Kometen nachgewiesen. Das Auftreten von Sauerstoff ist an sich nicht überraschend. Die Kometen bestehen unter anderem aus Wassereis und organischen Substanzen, und bei der Vielzahl an chemischen Reaktionen im Kometengas entsteht zwangsläufig auch Sauerstoff als Reaktionsprodukt. Rosetta registrierte jedoch mit einem mittleren Verhältnis von Sauerstoff zu Wasser von rund vier Prozent wesentlich mehr Sauerstoff als erwartet. Sauerstoff ist damit im Kern von 67P die vierthäufigste Substanz nach Wasser, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

Zudem wies die Sonde auch einige andere leichtflüchtige Substanzen wie Stickstoff ( $N_2$ ), Methan ( $CH_4$ ), Äthan ( $C_2H_6$ ) und Argon (Ar) nach. Dabei zeigten sich starke

Häufigkeitsunterschiede auf der Sommer- und der Winterhemisphäre des Kometenkerns. Aus der Zusammensetzung und den Häufigkeiten einiger der gemessenen Substanzen leiteten die Kometenforscher für 67P eine Entstehungstemperatur von maximal etwa 20 Kelvin oder  $-253$  Grad Celsius ab. Diese sehr niedrigen Temperaturen setzen im Wesentlichen reine kondensierte Substanzen voraus; bei einer Einlagerung in amorphes Eis wären wesentlich höhere Temperaturen bis etwa  $-140$  Grad Celsius möglich. In jedem Fall entstand der Kometenkern weit weg von der Sonne in einer sehr kalten Region des solaren Urnebels. Ein im Vergleich mit anderen Kometen hoher Anteil von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid deutet darauf hin, dass er sich seit seiner Entstehung nur wenig verändert hat – ein wichtiges Auswahlkriterium für 67P als Zielkomet von Rosetta.

Soweit wir wissen, entstanden die Kleinkörper, also die Kometen und Asteroiden, nahezu gleichzeitig mit den Planeten im frühen Sonnensystem vor 4,56 Milliarden Jahren in einer so genannten protoplanetaren Scheibe aus Gas und Staub. Neben Wasserstoffgas als Hauptbestandteil gab es dort auch kleine Staubteilchen von anfänglich weniger als einem Mikrometer Durchmesser. Das Gas und der Staub liefen in der Scheibe nahezu auf Kreisbahnen um die sich im Scheibenzentrum bildende junge Sonne. Dabei wurden ihre Bewegungen hauptsächlich durch die Schwerkraft und die Reibung mit dem Gas bestimmt. Stöße zwischen den Staubteilchen führten dazu, dass diese allmählich zu immer größeren Brocken heranwuchsen. Dieser als Koagu-

# SCHACH MAGAZIN 64



**Jeden Monat**  
das Neueste aus der Schachwelt  
+ Reportagen und Interviews  
+ Training mit GM Daniel King  
+ Veranstaltungs- und Turnierkalender  
+ Schachschule 64

**Bestellen Sie ein kostenloses Probeexemplar:**  
[www.schach-magazin.de](http://www.schach-magazin.de) oder **Telefon 0421/36903-25**



**SCHACH  
MAGAZIN 64**

Unerwartet, aber verdient wurde das Team der SG Solingen  
**Deutscher Mannschaftsmeister!**

Knoten geplatzt: Carlsen siegt endlich auch auf heimatischem Boden!

Gewinnsträhne beendet: Bundesliga-Rekordmeister diesmal ohne Meisterpokal

Entscheidungen gefallen: Meisterschaften auf drei Kontinenten

## Rosetta: Von der Ankunft bis zur Landung auf Komet 67P

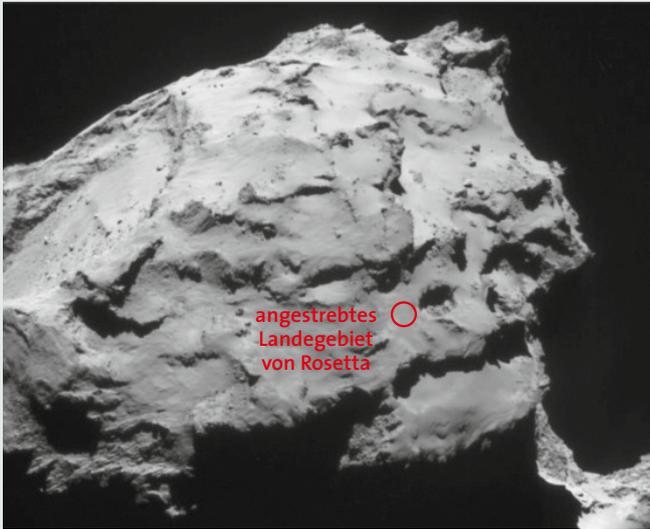
Im August 2014 erreichte die Raumsonde Rosetta nach rund zehn Jahren Flugzeit den Kometen 67P/ Tschurjumow-Gerasimenko, als dieser etwa 3,6 Astronomische Einheiten (AE) von der Sonne entfernt war. Um den Kometenkern möglichst genau zu kartieren und um einen geeigneten Landeplatz für die Tochtersonde Philae zu finden, wurde die Umlaufbahn von Rosetta von einer anfäng-

lichen Flughöhe von 100 Kilometern über der Kernoberfläche bis Oktober 2014 auf 10 Kilometer abgesenkt. Zum Zeitpunkt der spektakulären Landung von Philae am 12. November 2014 befand sich der Schweifstern in rund 3 AE Abstand zur Sonne.

Rosetta folgte anschließend dem Kometen auf seiner Umlaufbahn um die Sonne, und beide erreichten im August 2015 den sonnennächsten Punkt ihrer Bahn, das Perihel, mit einem Abstand von 1,24 AE. In dieser Phase zunehmender Aktivität musste sich Rosetta zwischenzeitlich bis auf mehr als 400 Kilometer vom Kern entfernen. Erst im Mai 2016 hatte die Aktivität wieder so weit nachgelassen, dass sich die Sonde bis auf weniger als zehn Kilometer an den Kern heranwagen konnte. Diese geringe Distanz wurde auch dazu genutzt, um erneut nach dem Landeplatz von Philae zu suchen, bisher jedoch ohne Erfolg. Bis Redaktionsschluss dieser Ausgabe war der Landeplatz nur bis auf eine Fläche von etwa  $34 \times 24$  Metern eingegrenzt.

Nach Philae will die ESA nun ein zweites Mal auf 67P landen, denn am 30. September 2016 soll Rosetta selbst auf der Oberfläche des Kometenkerns aufsetzen. Sie soll in der Region Ma'at

**In dem rot markierten Gebiet soll Rosetta zu ihrem Missionsende am 30. September 2016 um 12: 30 Uhr MESZ auf 67P aufsetzen.**



lition bezeichnete Prozess erklärt die geringe mittlere Dichte und die hohe Porosität des Kometenmaterials.

Auch wenn viele der hierbei ablaufenden Prozesse noch nicht im Detail verstanden sind, ist klar, dass auf diese Weise die Vorläuferobjekte, die Planetesimale, entstanden, aus denen sich schließlich die Planeten bildeten. Das Material, aus dem die Kometen bestehen, bildete sich hauptsächlich in den kalten äußeren Regionen der protoplanetaren Scheibe. Hier konnten die leicht flüchtigen Substanzen wie Wasser, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid zu Feststoffen kondensieren. Die felsigen erdähnlichen Planeten entstanden dagegen in den weiter innen liegenden wärmeren Bereichen der Scheibe.

Für den Ursprung der Kometenkerne gibt es mindestens zwei Szenarien: Eines geht davon aus, dass größere Objekte durch Stöße viele kleinere Objekte und Staub aufgesammelt haben und so zur Größe der Kometenkerne heranwuchsen, dies ist das hierarchische Modell. Der Prozess der Kometenbildung dauerte wohl nur wenige Millionen Jahre.

Alternativ könnten die Kometenkerne die Überreste ursprünglich größerer Objekte sein, die durch gegenseitige Stöße in eine Vielzahl kleinerer Trümmer auseinanderbrachen. Sie wären somit Überreste dieser Kollisionen, die wiederum weitere Bruchstücke aufgesammelt haben könnten. In beiden Fällen wäre die zwiebelschalenartige Schichtung von 67P vermutlich

eine Folge dieses Aufsammlerprozesses. Obwohl bereits zahlreiche Untersuchungen hierzu gemacht wurden, ist die grundlegende Frage, durch welchen dieser Prozesse 67P entstanden ist, bisher nicht beantwortet.

Der Bereich der protoplanetaren Scheibe, in dem sich die Kometen bildeten, war besonders in der Frühzeit des Sonnensystems derart stark mit Kleinkörpern angefüllt, dass sich dort häufig Stöße zwischen den Himmelskörpern ereigneten. Hiervon waren vor allem die kleineren Objekte mit weniger als etwa fünf Kilometer Durchmesser betroffen. Ihre Gestalt und Größe sowie möglicherweise ihre Zusammensetzung sollten die Spuren dieser Ereignisse zeigen.

**Mittels Computersimulationen lässt sich die Entstehung des Doppelkörpers von 67P modellieren, die beiden Objekte sind etwa einen Kilometer groß. Bei  $t = 0$  erfolgt die Kollision mit sehr geringer Relativgeschwindigkeit, die beiden Objekte verschmelzen zunächst miteinander, um sich fünf Stunden später wieder zu trennen. Die beiden Himmelskörper verbleiben aber in unmittelbarer Nähe und vereinigen sich rund einen Tag später endgültig zu einem hantelförmigen Doppelkörper.**



niedergehen, nicht weit entfernt vom ursprünglich geplanten Landeplatz von Philae in Agilkia.

Bis kurz vor dem Aufsetzen soll Rosetta noch Bilder und Messdaten zur Erde übertragen. Danach wird voraussichtlich kein Funkkontakt mehr möglich sein. Rosetta ist nicht für eine Landung ausgelegt, so dass mit gravierenden Schäden an der Sonde, insbesondere an den insgesamt 32 Meter langen Solarpaneelen, gerechnet werden muss. Außerdem müsste auf dem rotierenden Kometenkern die Hauptantenne der Sonde nach der Landung auf die Erde ausgerichtet werden, um eine Datenübertragung zu ermöglichen. Hierfür ist die Sonde ebenfalls nicht konstruiert worden.



Die Bahn von Rosetta durch das Sonnensystem von 2004 bis 2016: <https://youtu.be/5yoYZERieuQ>

Mit Computersimulationen untersuchten Kometenforscher solche Kollisionen zweier Himmelskörper von etwa einem Kilometer Durchmesser (siehe Grafik unten). Dabei nahmen sie typische Relativgeschwindigkeiten von wenigen Metern pro Sekunde an, die dort geherrscht haben dürften. Dies entspricht etwa der Fluchtgeschwindigkeit eines solchen Körpers. Es zeigte sich, dass unter diesen Bedingungen ein hantelförmiger Doppelkörper entstehen kann, der anschließend durch die eigene Schwerkraft zusammengehalten wird. Sind die Bedingungen bei dem Stoß so, dass sich zunächst kein Doppelkörper bilden kann, so können beide Einzelkörper durch ihre Schwerkraft auf Umlaufbahnen um ihren gemeinsamen

Schwerpunkt gebunden bleiben und ein System aus einem Kleinkörper mit einem Mond bilden.

Neben 67P haben auch andere Kometenkerne und manche der kleineren Asteroiden eine hantelförmige Gestalt, und es werden zunehmend auch Asteroiden mit Monden entdeckt. Im frühen Sonnensystem könnten somit derartige Stöße recht häufig gewesen sein.

In diesem Zusammenhang ist interessant, dass 67P besonders in der Halsregion, also zwischen den beiden Doppelkörpern, deutliche Bruchlinien zeigt, die auf starke Spannungen im Kometenkörper hindeuten (siehe SuW 3/2015, S. 26). Bei 67P wie auch bei anderen Kometen veränderten sich die Rotationsperioden deutlich innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiträume, wofür vor allem das Ausgasen durch die Aktivität in der Nähe des Perihels verantwortlich ist. Da diese an eng begrenzten Stellen auf der Oberfläche stattfindet, können die freigesetzten Gase wie eine Raketendüse die Rotation abbremsen oder beschleunigen. Die Rotationsperiode von 67P verkürzte sich beispielsweise durch die Aktivität beim vorherigen Periheldurchgang im Jahr 2009 um etwa 22 Minuten. Zur Zeit rotiert er in etwa 12,4 Stunden um seine Achse; wie sich seine Rotation in Zukunft entwickeln wird, ist jedoch schwer vorherzusagen.

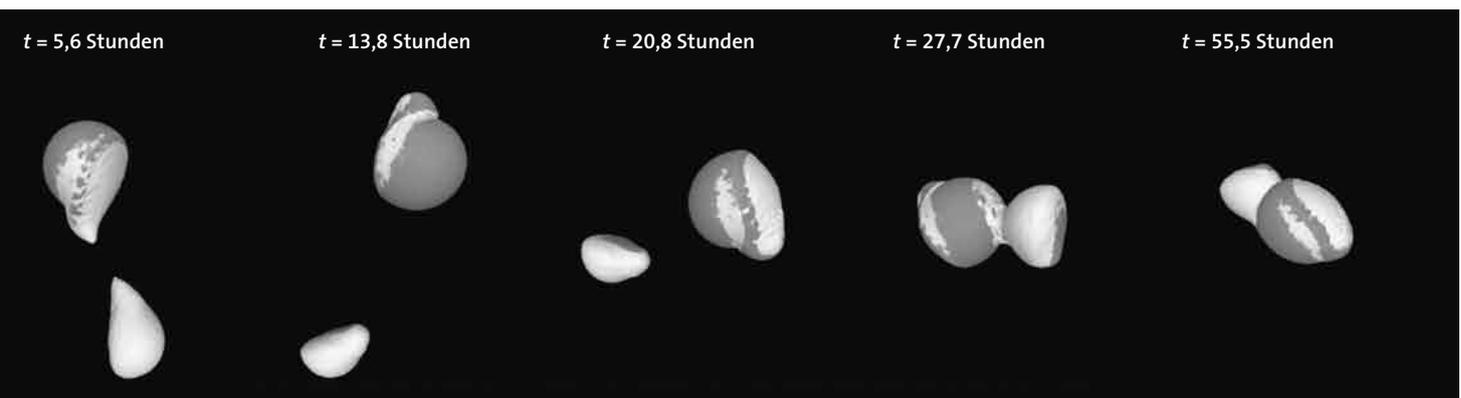
Mit Computersimulationen untersuchten die Wissenschaftler unter Einbeziehung der bruchmechanischen Eigenschaften des Kometenmaterials auch, bis zu welchen Rotationsgeschwindigkeiten solch ein Doppelkörper stabil ist: Bei einer Rotationsperiode von weniger als etwa sieben Stunden würden die Zentrifugalkräfte so stark, dass der Kern in der Halsregion auseinanderbricht. Die beiden freigesetzten Einzelkörper würden sich allerdings wahrscheinlich nicht endgültig voneinander trennen, sondern sich nach einiger

Zeit erneut zu einem Doppelkörper zusammenfinden. Auch andere hantelförmige Kometenkerne könnten solch eine Umorganisation ihrer Einzelkörper durchlaufen haben. Möglicherweise ist dies ein bislang wenig beachteter wichtiger Prozess für ihre Entwicklung. Dann wären die Kometenkerne jedoch nicht so unverändert, wie bisher angenommen. Die beobachteten Schichtungen könnten eine Folge dieses Prozesses sein, bei dem die Einzelkörper allmählich kleinere Bruchstücke und Staub wieder aufsammeln, die beim vorherigen Auseinanderbrechen freigesetzt wurden.

## Das Wasser und das Leben auf der Erde

Es bleibt schließlich noch die dritte Frage nach dem Ursprung der irdischen Ozeane und der Grundbausteine des Lebens auf der Erde. Seit Längerem wird diskutiert, inwieweit die Kometen einen großen Teil des Wassers auf die Erde gebracht haben. Wegen der Entstehungsbedingungen im inneren Sonnensystem sollte nämlich unser Heimatplanet viel weniger Wasser enthalten, als das heute der Fall ist. Die Forscher vermuten deshalb, dass ein großer Teil des Wassers erst nach der Entstehung unseres Planeten hierhergelangte. Einschläge auf die frühe Erde waren wesentlich häufiger als heute, und da die Kometenkerne überwiegend aus Wassereis bestehen, gelten sie hierfür als gute Kandidaten. Unklar ist jedoch, in welchem Umfang sie zum irdischen Wasser beigetragen haben.

Eine zur Beantwortung dieser Frage herangezogene Größe ist die Häufigkeit von schwerem Wasserstoff (Deuterium) in den irdischen Ozeanen. Hierzu betrachten die Forscher das Verhältnis von schwerem zu normalem Wasserstoff, das D/H-Verhältnis. Es lässt sich in den Ozeanen, aber auch bei anderen Himmelskörpern bestimmen. Für einige Kometen aus der Oortschen Wolke ergeben sich Werte,



Nach: Jutzi, M., Asphaug, E., Science 348, S. 1355 – 1358, 2016 / SuW-Grafik

die deutlich höher liegen als die irdischen. Andererseits war das D/H-Verhältnis im protosolaren Urnebel wesentlich niedriger als in der Erde. Messungen mit Rosetta liefern für 67P ebenfalls einen höheren Wert, er liegt etwa dreimal so hoch wie der irdische. Die Kometen gelten daher nicht mehr als die Hauptquelle für das irdische Ozeanwasser.

Dies führt uns zu der Frage, ob die Kometen die Grundbausteine für die Bildung komplexer organischer Moleküle auf die Erde gebracht haben, aus denen schließlich das Leben entstanden ist. Die Massenspektrometer auf Rosetta und Philae stießen auf mehrere Dutzend organische Substanzen, die bisher nicht von Kometen bekannt waren (siehe SuW 10/2015, S. 24). Darunter befindet sich auch Glycin, eine einfache Aminosäure, die in der Koma von 67P in sehr geringen Mengen vorkommt und bisher nur in einem weiteren Kometen, Wild 2, gefunden wurde. Viele dieser Substanzen sind Schlüssel-moleküle für die Synthese der Grundbausteine des Lebens, wie wir es kennen. Interessant ist, dass die meisten dieser Moleküle auch in interstellaren Wolken vorkommen.

## Woher stammt die komplexe Chemie der Kometen?

Unklar ist jedoch, ob die komplexe interstellare Chemie weit gehend unverändert in die Kometenkerne eingebaut wurde oder ob ein großer Teil der gemessenen Substanzen erst in den Kometen entstanden ist. Die Oberfläche von 67P enthält eine komplexe Mischung aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, die sich jedoch im Einzelnen bisher nicht identifizieren ließen. Auch in den untersuchten Staubteilchen findet sich eine Vielzahl an organischen Molekülen, die Ähnlichkeiten mit den kohligten Chondriten aufweisen, einer Gruppe von wenig veränderten, urtümlichen Meteoriten. Bisher wurde jedoch keine einzige individuelle organische Verbindung in diesen Staubteilchen identifiziert.

Bereits jetzt lieferte die Rosetta-Mission Antworten auf viele Fragen der Kometenforschung und warf dabei, wie in der Grundlagenforschung üblich, auch viele neue auf. Obwohl bereits mehrere hundert Originalveröffentlichungen mit Ergebnissen in wissenschaftlichen Fachjournals erschienen sind, steht eine umfassende Interpretation des gesamten

Datenmaterials von 67P noch weit gehend aus. Es werden noch Jahre vergehen, bis die beteiligten Wissenschaftler alle Puzzle-teile zu einem Gesamtbild zusammenfügen können. Experimente mit künstlichen Kometen im Labor und Computersimulationen sind unerlässlich, um die Vielzahl der ablaufenden Prozesse im Detail zu verstehen. Das sich daraus ergebende Gesamtbild dürfte ganz erheblich zur Vorbereitung zukünftiger Kometenmissionen beitragen.

Die meisten Kometenforscher sind sich heute einig, dass der nächste große Schritt in der Erforschung dieser kleinen Himmelskörper darin besteht, eine Materialprobe von einem Kometenkern zu entnehmen und diese möglichst unverändert, das heißt auf Kometentemperatur tiefgekühlt, zur Erde zu transportieren. Sie kann dann anschließend mit den besten in irdischen Laboren zur Verfügung stehenden Techniken untersucht werden. Derzeit gibt es keine konkreten Pläne für solch eine ambitionierte Mission, unter anderem, weil die Verantwortlichen in den Weltraumagenturen weltweit zunächst die Ergebnisse und Erfahrungen von Rosetta nutzen wollen. Eine solche Weltraummission ist aber auch technisch eine große Herausforderung. Es bleibt abzuwarten, wann dieser nächste Meilenstein in der Kometenforschung realisiert werden wird.



**HARALD KRÜGER** arbeitet am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen und ist dort auch für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit zuständig. Seine wissenschaftlichen

Hauptarbeitsgebiete sind die Erforschung von Kometen und von kosmischem Staub. Harald Krüger lehrt als Privatdozent an der Universität Göttingen.

**AstroViews 11 – Rosetta – die historische Landung auf einem Kometen**  
[www.sterne-und-weltraum.de/astroviews11](http://www.sterne-und-weltraum.de/astroviews11)

## Literaturhinweise

- Althaus, T.:** Ein Komet wird entschleiert – Raumsonde Rosetta nimmt die Arbeit auf. In: *Sterne und Weltraum* 10/2014, S. 28–35
- Althaus, T.,:** Rosetta – In den Schluchten des Kometen. In: *Sterne und Weltraum* 3/2015, S. 26–32
- Hirabayashi, M. et al.:** Fission and Reconfiguration of Bilobate Comets as Revealed by 67P/Churyumov-Gerasimenko. In: *Nature* 534, S. 352–355, 2016
- Jutzi, M., Asphaug, E.:** The Shape and Structure of Cometary Nuclei as a Result of Low-Velocity Accretion. In: *Science* 348, S. 1355–1358, 2015
- Krüger, H.:** Komet Tempel 1 unter der Lupe. In: *Sterne und Weltraum* 7/2012, S. 42–45
- Krüger, H., Agarwal, J.:** Rosetta: Rendezvous mit einem Kometen. In: *Sterne und Weltraum* 4/2014, S. 32–42
- Krüger, H.:** Rosetta/Philae: Landung auf einem Kometen. In: *Sterne und Weltraum* 11/2014, S. 28–29
- Krüger, H.:** Einem Kometen hautnah sein – Philaes erste Tage auf 67P/Tschurjumow-Gerasimenko. In: *Sterne und Weltraum* 10/2015, S. 24–34
- Massironi, M., et al.:** Two Independent and Primitive Envelopes of the Nucleus of Comet 67P. In: *Nature* 526, S. 402–405, 2015
- Vincent, J.-B., et al.:** Large Heterogeneities in Comet 67P as Revealed by Active Pits from Sinkhole Collapse. In: *Nature* 523, S. 63–65, 2015
- Special feature on Rosetta Mission Results Pre-Perihelion:** In: *Astronomy & Astrophysics* 583, 2015

Dieser Artikel und Weblinks im Internet:  
[www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1417414](http://www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1417414)

**W I S** Didaktische Materialien:  
[www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1377456](http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1377456)

## Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.

