

Rätselhafte Kometenentstehung

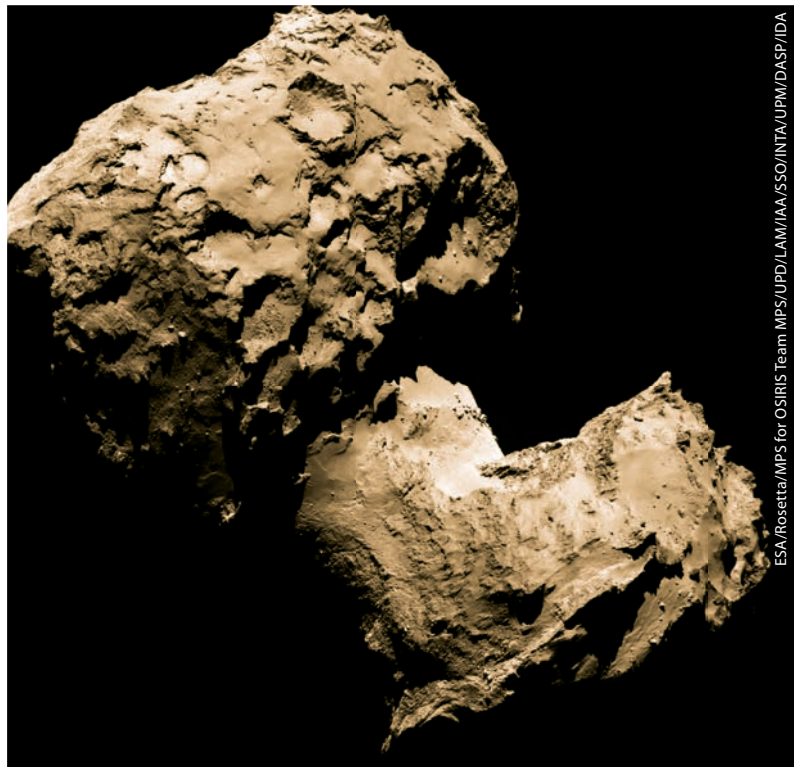
Was kann uns Komet 67P/Tschurjumow-Gerassimenko über seine Bildungsprozesse verraten?

Jürgen Blum, Bastian Gundlach, Carsten Güttler und Holger Sierks

Schon immer haben Kometen mit ihrem langen Staubschweif die Menschheit begeistert. Dank moderner Beobachtungstechniken und himmelsmechanischer Rechnungen wissen wir heute sehr viel mehr über sie als in historischer Zeit, in der sie als Unheilsbringer galten. Heutzutage betrachten wir Kometen als Teil des Inventars und der Geschichte unseres Sonnensystems. Aus ihrer Erforschung können wir viel über die Entstehung unserer Heimatwelt lernen. Die Rosetta-Mission zum Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko hat einen reichen Schatz an Daten geliefert.

Kometenkerne sind wenige Kilometer große Himmelskörper, die bei Annäherung an die Sonne aufgrund der Sublimation volatiler Eise lange Staub- und Gasschweife ausbilden (Abb. 1). Sie zählen zu den ursprünglichsten Bausteinen des Sonnensystems, weil sie zum einen so klein sind, dass das Material weder durch sein Eigengewicht wesentlich verdichtet noch durch den Zerfall radioaktiver Isotope aufgeschmolzen wurde. Zum anderen hielten sie sich die meiste Zeit seit ihrer Entstehung vor etwa 4,6 Milliarden Jahren so weit entfernt von der Sonne auf, dass hochflüchtige Substanzen in ihnen konserviert wurden und kaum Kollisionen mit anderen Himmelskörpern stattgefunden haben. Diese Bedingungen machen die Kometen zu einem einzigartigen Modellsystem für die Entstehungsphase unseres Sonnensystems.

Werden Kometen beispielsweise durch gravitative Wechselwirkung mit Jupiter ins innere Sonnensystem gestreut, sind sie dort nur eine kurzzeitige Erscheinung, denn sie verlieren pro Umlauf um die Sonne erheblich an Material oder gelangen durch gravitative Wechselwirkung mit einem Planeten wieder in die schwer zugänglichen Außenbereiche unseres Sonnensystems. Bisherige kurze Vorbeiflüge von Raumsonden an Kometenkernen lieferten erste Bilder dieser bizarren Welten, erlaubten aber keine systematischen Untersuchungen der Physik und Chemie, der Aktivitätsquellen, des inneren Aufbaus, der Entstehung und der zeitlichen Entwicklung von Kometen. Erst die ehrgeizige ESA-Mission Rosetta versprach tiefere Einblicke in die Frühzeit unseres Sonnensystems (Infokasten). Die Rosetta-Sonde begleitete den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko (kurz 67P genannt) zwei Jahre lang auf seiner Bahn ins innere Sonnensystem und über den sonnennächsten Punkt hinweg wieder



ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

hinaus in die Tiefen des Weltalls. Dieser Artikel fasst die Erkenntnisse zusammen, die sich bislang über die Entstehung von 67P gewinnen ließen.

Vor der Rosetta-Mission existierten zwei konkurrierende Entstehungsszenarien so genannter Planetesimale, also erster gravitativ gebundener Körper, aus denen sich die Planeten bildeten. Beide Modelle gehen davon aus, dass sich die Sonne und die an sie gebundenen planetaren Körper in einer protoplanetaren Scheibe

Komet 67P/Tschurjumow-Gerassimenko am Tag der Ankunft von Rosetta im August 2014

KOMPAKT

- Kometen könnten Aufschluss geben über die Entstehung unseres Sonnensystems. Doch noch ist ihre eigene Entstehung nicht vollständig aufgeklärt.
- Zwei verschiedene Szenarien könnten die Entstehung von Kometen erklären.
- Ergebnisse der Rosetta-Mission stimmen gut mit einem Szenario überein, das von einem gravitativen Kollaps einer Wolke zentimetergroßer Staubpartikel ausgeht.
- Die Rosetta-Mission hat viele wichtige Informationen über den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko geliefert, z. B. über seine hohe Porosität.

Prof. Dr. Jürgen Blum und Dr. Bastian Gundlach, Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, Technische Universität Braunschweig, Dr. Carsten Güttler und Dr. Holger Sierks, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen

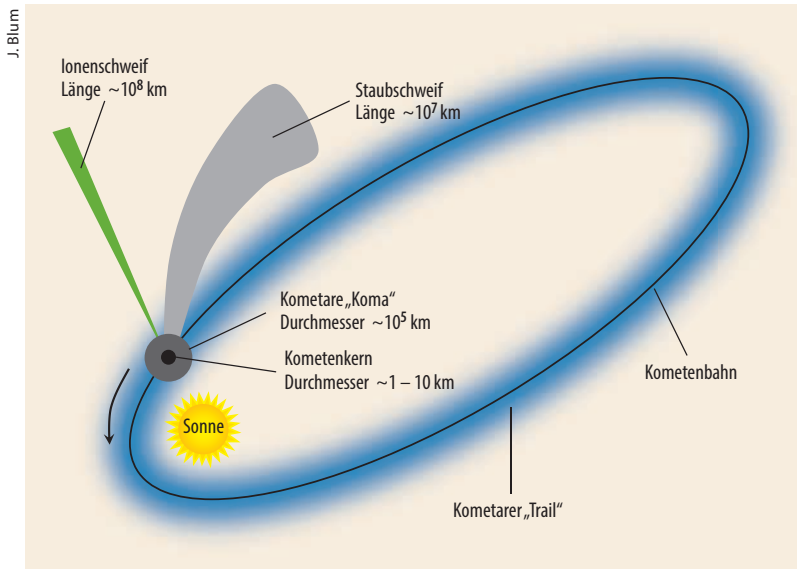


Abb. 1 Kometen bewegen sich auf hochelliptischen oder parabolischen Bahnen um die Sonne. Bei Annäherung an die Sonne verdampfen flüchtige Substanzen und bilden den Ionenschweif. Herausgerissene kleine Staubteilchen formen den durch den Strahlungsdruck gekrümmten

Staubschweif. Größere Staubteilchen verteilen sich auf der Kometenbahn als „Trail“. Der feste Kometenkern ist von der Erde aus unsichtbar, da die Staubteilchen in seiner Umgebung das Sonnenlicht reflektieren und ihn mit ihrer Helligkeit überdecken („Koma“).

vor rund 4,6 Milliarden Jahren bildeten. In solchen Scheiben beträgt das Gas-zu-Staub-Massenverhältnis meist etwa 100. Da der Anteil des Staubs an der Gesamtmasse nahezu vernachlässigbar ist und die Staubkörner anfangs mikroskopisch klein sind, folgen diese der teilweise turbulenten Gasströmung so gut, dass die Relativbewegung des Staubs nur zu Stößen zwischen den Staubpartikeln mit sehr kleinen Geschwindigkeiten führt. Haften die Staubteilchen bei solchen Stößen aneinander, wachsen sie zu immer größeren Agglomeraten an. Da die Stoßenergien mit zunehmender Größe immer weiter ansteigen, beginnen die Agglomerate ab einer gewissen Größe zu kompaktieren [1].

Entstehung im Modell

Durch diese Kompaktierung können sich die Aggregate besser von der Gasbewegung abkoppeln, wodurch die Stoßgeschwindigkeit mit zunehmender Teilchen-

größe steigt. Hier trennen sich die Wege der beiden Szenarien.

Szenario A

In diesem Modell stoppt das Wachstum der Staubaggregate, sobald die Stoßpartner voneinander abprallen, weil sie mit wachsender Agglomeratgröße nur noch bei immer kleineren Geschwindigkeiten haften. Wenn der Geschwindigkeitsbereich für Haftung hin zu größeren Teilchen fällt und gleichzeitig die mittlere Stoßgeschwindigkeit mit der Teilchengröße zunimmt, muss es einen größten Teilchendurchmesser geben [2].¹⁾ Laborexperimente und Rechnungen haben gezeigt, dass dieser Durchmesser für Stoßgeschwindigkeiten, die in den protoplanetaren Scheiben vorhergesagt werden, im Bereich von Millimetern in den Außenbereichen der Scheibe liegt und bei maximal wenigen Zentimetern in den Innenbereichen. Da in diesem Modell kein weiteres Wachstum durch direkte Stöße möglich ist, muss ein anderer Prozess für die Bildung der Planetesimale verantwortlich sein. Eine Besonderheit der protoplanetaren Scheiben ist die dort möglicherweise auftretende „Streaming Instability“ [3]. Hierbei können Raumbereiche mit einer gegenüber dem Hintergrund erhöhten Staubkonzentration durch den damit einhergehenden Rückkopplungseffekt auf das Gas weitere Staubaggregate an sich binden, bis die kollektive Gravitation aller Staubpartikel zum gravitativen Kollaps und zur Bildung von Planetesimalen führt.

Dieser Prozess ist allerdings nicht für alle Aggregatgrößen möglich. Für Kometenkerne müssen diese bei 1 bis 10 mm liegen, um wirkungsvoll konzentriert zu werden. Interessanterweise endet genau dort das direkte Wachstum aufgrund haftender Stöße. Wenn das anwachsende Gravitationspotential der strömungsinstabilen Region so stark geworden ist, dass die Staubteilchen nicht mehr entkommen können, kollabiert das Gebiet, und es bildet sich ein gravitativ gebundener Körper [4]. Für kilometergroße Kometenkerne ließ sich dieser Entstehungsprozess aufgrund fehlender numerischer Auflösung noch nicht zeigen. Aber es ist zu erwarten, dass die bislang kleinsten Körper (mit ca. 50 km Radius), die mittels Computersimulation entstanden, keine physikalische Grenze darstellen. Sollten sich Kometen nach diesem Prozess bilden, müssten die

¹⁾ Die größte Geschwindigkeit, bei der mikrometergroße Silikatteilchen aneinander haften, beträgt etwa 1 m/s. Für zentimetergroße Agglomerate beträgt die Haftgrenze nur etwa 10⁻³ m/s. Gleichzeitig wächst die mittlere Stoßgeschwindigkeit von rund 10⁻³ m/s bei Mikrometerpartikeln auf etwa 1 m/s bei größeren Agglomeraten an. Betrachtet man alle möglichen Stöße und deren Ausgänge zwischen den wachsenden Agglomeraten für ein gängiges Modell des solaren Nebels, folgt als maximal erreichbare Agglomeratgröße 1 mm bis 1 cm [2].

DIE MISSION ROSETTA

Am 2. März 2004 startete die Raumsonde **Rosetta** vom europäischen Welt- raumbahnhof in Kourou (Französisch- Guayana). Nach nahen Vorbeiflügen an Erde, Mars und zwei Asteroiden kam sie nach über zehn Jahren Reisezeit am 6. August 2014 an ihrem Zielkometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko an. Ausgestattet mit elf wissenschaftlichen Instrumenten und der Landeeinheit **Philae** (Landung am 12. November 2014) war Rosetta die erste Mission, die einen Kometen über eine lange Zeit und durch das Perihel, d. h. die nächste

Annäherung des Kometen an die Sonne, begleiten und untersuchen konnte. Zur Fernerkundung aus dem Orbit war die Raumsonde mit einer Kamera (OSIRIS), einem Infrarot- und einem Ultraviolett-Spektrometer (VIRTIS und ALICE) sowie einem Mikrowellen-Instrument (MIRO) ausgestattet. Zudem befanden sich auf Rosetta und Philae Sender und Empfänger eines aktiven Radars (CONSERT), das den Himmelskörper durchleuchtete. Ein Massenspektrometer (ROSINA), drei Staubinstrumente (COSIMA, MIDAS und GIADA)

und ein Instrumentarium zur Untersuchung der Magnetfeld- und Plasma- umgebung (RPC) analysierten die Gas- und Stabumgebung am jeweiligen Ort der Raumsonde. Zudem ließ sich durch hochpräzise Bahnverfolgung von Rosetta (RSI) erstmals die Masse eines Kometen direkt bestimmen. Nach über zwei Jahren erfolgreicher Missionszeit stürzte Rosetta kontrolliert auf der Kometenoberfläche ab, wobei bis zu einem Abstand von wenigen Metern zur Oberfläche Daten aufgezeichnet wurden.

millimeter- bis zentimetergroßen Staubagglomerate aufgrund der extrem geringen Kollapseschwindigkeit von weniger als 1 m/s heute noch erhalten sein [5].

Szenario B

Das andere Modell beruht auf einem ebenfalls in Laborexperimenten nachgewiesenen Prozess, nämlich dem Massentransfer beim schnellen Stoß zwischen kleinen und großen Staubagglomeraten. Wenn nach Überschreiten der Haftgrenze einige Staubagglomerate etwas größer sind als der Durchschnitt bzw. einzelne Stöße zwischen den größten Staubteilchen und deutlich kleineren bei leicht erhöhter Geschwindigkeit stattfinden, können die kleinen Agglomerate beim Auftreffen zerbrechen und einen Teil ihrer Masse als kompakte Ablagerung auf dem größeren Staubagglomerat zurücklassen. Obwohl sich die Effizienz dieses Prozesses mit wachsender Agglomeratgröße wegen der ansteigenden Stoßgeschwindigkeit erhöht, müssen genügend viele kleine Stoßpartner vorhanden sein, damit in der verfügbaren Zeit – die Lebensdauer der protoplanetaren Scheiben beträgt nur einige Millionen Jahre – kilometergroße Körper entstehen [6].

Zudem existieren konkurrierende Prozesse, durch welche die größten Körper schrumpfen. Zu viele kleine Staubpartikel können die großen Körper nämlich wie beim Sandstrahlen erodieren. Zu viele große Körper führen zur Fragmentation der anwachsenden Planetesimale durch energiereiche Kollisionen. Nach diesem Szenario können sich Planetesimale also wohl nur in einem schmalen Parameterbereich bilden.

Ergebnisse der Rosetta-Mission

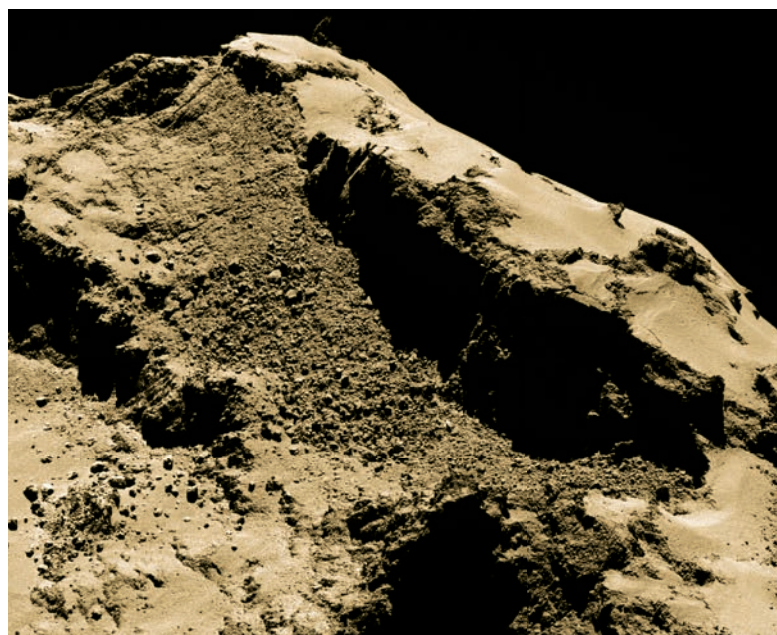
Mit der Rosetta-Mission ist die Kometenforschung in ein neues Zeitalter eingetreten, in dem es möglich ist, Modelle zur Entstehung und Entwicklung von Kometen mit einer Fülle von Daten zu testen und weiter zu entwickeln. Die elf Instrumente auf der Rosetta-Sonde und weitere zehn Instrumente auf der Landeeinheit Philae untersuchten Komet 67P auf verschiedenste Weise (Infokasten) [7]. Schon die ersten Bilder des Kometen, der aus zwei unterschiedlich großen Körpern besteht, die durch einen relativ dünnen Hals verbunden sind, enthielten aufschlussreiche Informationen [8]. Der Vergleich mit numerischen Simulationen deutet darauf hin, dass der Kometenkern in seiner jetzigen Form nur durch eine sehr langsame Kollision zweier Körper entstanden sein kann. Ein aufwändiges 3D-Modell, das aus tausenden von Bildern konstruiert wurde, ermöglichte es, das Volumen zu bestimmen. Zusammen mit der Masse, die sich aus Radio-Dopplermessungen bestimmen ließ, folgt eine globale Massendichte von nur 532 kg/m³ [9]. Unter der Annahme der erwarteten Materialzusammensetzung ergibt sich eine hohe Porosität von 69 bis 75 Prozent. Wie die zahlreichen Porenräume zwischen Eis- und Staubteilchen verteilt sind, konnte Rosetta allerdings nicht beobachten, sodass hier Modelle zum Einsatz kommen müssen.

Das poröse Kometenmaterial ist extrem fragil und nur aufgrund der sehr geringen Schwerkraft im Kometenkern stabil. Die Festigkeit leitet sich indirekt aus Kamerabildern von intakten Steilhängen, Überhängen und Schuttbrocken ab (Abb. 2). Unter Berücksichtigung von Strukturen, die bereits kollabiert oder abgerutscht sind, deren Festigkeit also durch Zug- oder Scherkräfte überwunden wurde, resultieren realistische Werte für die Zug- und Scherfestigkeit von etwa 1 bis 100 Pa [10].²⁾ Die Fußabdrücke des Philae-Landers nach dem ersten Abprallen können dazu dienen, die Kompressionsfestigkeit des Oberflächenmaterials zu bestimmen, welche um einen Wert von wenigen kPa streut.³⁾ Form, Porosität und Festigkeit sind Randbedingungen für jedes Entstehungsmodell und ein starkes Indiz dafür, dass der Komet während seiner gesamten Entstehungs- und Evolutionsphase keiner großen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt war.

Die Massenspektroskopie der aus dem Kometenkern in Sonnennähe emittierten Gasmoleküle erlaubt es, die Herkunft des Kometen auf Gebiete mit sehr tiefen Temperaturen einzuschränken [11]. Wird der Komet durch Sonneneinstrahlung aktiv, zeigt die Ausgasungsrate flüchtiger Gase wie H₂O, CO₂ oder CO einen unterschiedlichen Tagesverlauf. Wäre aber CO₂ als Gas im Wassereis eingefroren, müssten die Ausgasungen der beiden flüchtigen Substanzen miteinander korreliert sein. Da dies nicht der Fall ist, müssen die Moleküle als eigenständige Eise unter der Kometenoberfläche vorliegen. Aus dem Vorhandensein von CO-, O₂-, N₂- und Ar-Eis folgt eine Temperaturobergrenze über die Lebenszeit des Kometenkerns im äußeren Sonnensystem von unter 25 K – Wasser ist demnach niemals flüssig. Die Abwesenheit der Eisenoxid-Absorptionsbande bei 700 nm (und damit von Phyllosilikaten) in spektroskopischen Messungen bestätigte dies.

2) Die meisten technischen Materialien besitzen Zugfestigkeiten von 10⁷ bis 10¹⁰ Pa.

3) Hier liegen die meisten technischen Materialien bei 10¹⁰ bis 10¹¹ Pa.



ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team/MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

Abb. 2 Eine typische Klippe auf dem Kometen 67P. Am rechten Rand ist ein sich bildender Riss zu erkennen. Aus Bildern wie diesem kann man die Zugfestigkeit des kometaren Materials ableiten. Das Bild misst ca. 700 m in der Breite.

Die Mikrowellen-Antenne MIRO auf der Raumsonde Rosetta detektierte die thermische Emission des Kometen bei Wellenlängen im Millimeterbereich. Dies gab Aufschluss über die Wärmeleitungseigenschaften der oberflächennahen Schichten. Ein Modell zur Erklärung dieser Daten zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit des Kometenmaterials in den obersten Zentimetern bei rund $10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ liegt [12]. Das ist weniger als bei gebräuchlichen technischen Dämmstoffen und spiegelt die hohe Porosität des Kometenmaterials wider. Bei einer Wellenlänge von 3,3 m arbeitete das Radargerät CONSERT: Der Empfänger auf Philae detektierte die Radiowellen, welche die Rosetta-Sonde aussendete, und maß Ankunftszeit und Amplitude der Wellen als Funktion der relativen Position zwischen Orbiter und Lander. Trotz der geringen Lebensdauer von Philae lieferte dieses Experiment wichtige Erkenntnisse über den Kometenkern. Ein Ergebnis ist, dass das Kometenmaterial auf Längenskalen von einigen Metern und mehr homogen ist und keine größeren Hohlräume bzw. Dichtekontraste besitzt [13]. Allerdings deuten die Messungen darauf hin, dass die oberflächennahen Schichten geringfügig dichter sein könnten als das Innere des Kerns. Die von CONSERT ermittelte dielektrische Leitfähigkeit des Kometenmaterials kann dazu dienen, die Materialzusammensetzung zu ermitteln.

Die mikroskopische Struktur des Kometenmaterials ist für die Rosetta-Sonde in Form von Staub in der inneren Koma des Kometen zugänglich. Drei unabhängige Staub-Instrumente fingen während der Mission kleine Staubteilchen auf und analysierten diese mittels optischer Mikroskopie, Lichtstreuung, Sekundärionen-Massenspektroskopie und Rasterkraftmikroskopie.

Größere Teilchen in der inneren Koma waren für die Kameras sichtbar. Die Struktur dieser Staubaggregate ist porös bis hin zur kleinsten gemessenen Skala im Sub-Mikrometerbereich. Ein geringer Teil der Staubteilchen besitzt eine Porosität von über 99 Prozent. Das könnte darauf hindeuten, dass es sich hierbei um Überreste der ersten Generation von Staubteilchen handelt, die bei der Entstehung der Kometen eingefangen und danach nicht mehr verdichtet wurden.

Eine einheitliche Größenverteilung aller nachgewiesenen Staubteilchen liegt bisher nicht vor, da jede Methode systematische Fehler und Auswahlereffekte mit sich bringt. Teilchengrößen unterhalb eines Millimeters sind jedoch für die gesamte Massenbilanz des ausgestoßenen Staubs unwichtig. Damit bestätigte Rosetta frühere Vermutungen, dass die teils mit bloßem Auge sichtbaren Kometenschweife und die mit kleinen Teleskopen nachweisbaren Komae zwar durch die mikrometergroßen Teilchen die Helligkeit eines Kometen in Sonnennähe dominieren, aber für unser Verständnis der Kometenaktivität, also des Massenausstoßes von Staub und Gas, nur größere Staubagglomerate wichtig sind. Diese lassen sich astronomisch aufgrund ihrer thermischen Emission als Kometen-„Trails“ im Infraroten nachweisen (Abb. 1). Noch leichter gelingt das, wenn die Erde einen Kometenorbit kreuzt. Dann nämlich treten die millimeter- bis zentimetergroßen Staubteilchen mit hoher Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre ein, verglühen dort und sind mit bloßem Auge als Meteorschauer sichtbar. Eine Überraschung war das große Staub-zu-Eis-Massenverhältnis von sechs, d. h. Wassereis macht nur etwa 15 Prozent der Kometenkernmasse aus. Frühere Modelle gingen von etwa gleichen Anteilen von Staub und Eis aus.

Wie entstand Komet 67P?

Wie können die Erkenntnisse der Rosetta-Mission dabei helfen, die Entstehung der ersten festen Körper im jungen Sonnensystem zu verstehen? Geht man davon aus, dass beide eingangs dargestellten Szenarien zu kilometergroßen Gebilden im jungen Sonnensystem geführt haben können, lassen sich Beobachtungsgrößen für die möglicherweise einzig verbliebenen Planetesimale – die Kometen – finden, um das zutreffende Entstehungsszenario zu identifizieren. Beginnen wir mit den Staubagglomeraten: Szenario A liefert bevorzugte Agglomeratgrößen von 1 bis 10 mm, wohingegen Szenario B keine Größenpräferenz hat. Mehrere Beobachtungen passen zu Szenario A wie die direkte Abbildung zentimetergroßer Strukturen am Landeplatz von Philae. Zudem lassen sich die Ergebnisse des Mikrowellenexperiments MIRO, das Informationen über die Temperaturschichtung lieferte, am einfachsten durch eine Granularität des Kometenmaterials von etwa 1 cm erklären. Die Kometen-„Trails“ bestehen ebenfalls aus millimeter- bis zentimetergroßen Staubagglomeraten.

Ähnlich sieht es bei der Porosität des Kometenkerns aus. Szenario A erklärt die beobachtete Porosität von

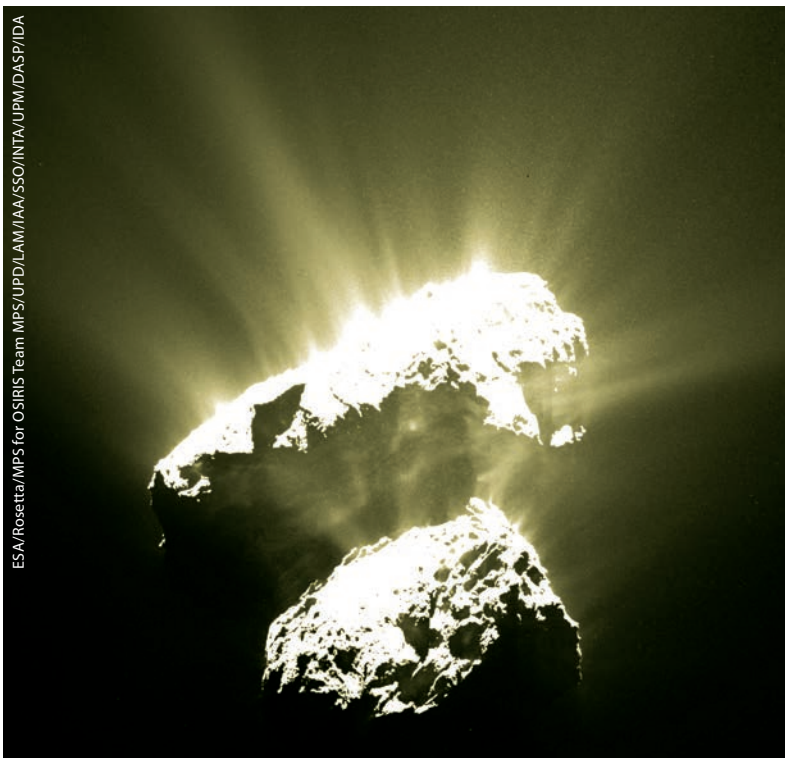


Abb. 3 Aufgenommen am 31. Juli 2015, zwei Wochen vor dem sonnennächsten Punkt, zeigt der Komet seine volle Aktivität. Jets schießen auf der Tagseite in den Weltraum. Auch auf der kalten Nachtseite ist der Komet weiterhin aktiv.

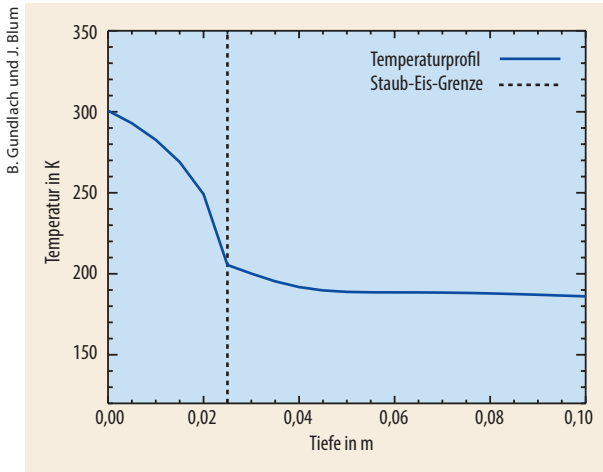


Abb. 4 Unterhalb der Staub-Eis-Grenze (gestrichelte Linie) in einer angenommenen Tiefe von 2,5 cm ist die Temperatur (durchgezogene Kurve) innerhalb des Kometen nahezu konstant. Die Staubagglomerate haben einen Durchmesser von 1 cm, und der Komet befindet sich in einer Entfernung von 2 AE zur Sonne. Für die Berechnung angenommen wurde eine Häufigkeit des Wassereises von 10 %.

69 bis 75 Prozent zwanglos: Eine solche Porosität bedeutet, dass der Kometenkern nur zu 25 bis 31 Prozent mit Materie gefüllt ist, d. h. einen Volumenfüllfaktor von 0,25 bis 0,31 besitzt. Für Staubagglomerate sollte er rund 0,4 betragen, da sie durch die abprallenden Stöße verdichtet wurden. Eine gravitativ gebundene Schichtung solcher Agglomerate besitzt je nach Entstehungsprozess und Größenverteilung üblicherweise einen makroskopischen Volumenfüllfaktor von 0,56 bis 0,68. Die Kombination der beiden ergibt einen totalen Volumenfüllfaktor zwischen $0,4 \cdot 0,56 = 0,22$ und $0,4 \cdot 0,68 = 0,27$. Dies passt gut zu den Messungen. Bei Szenario B wachsen die einzelnen Planetesimale aufgrund des Massentransfers zu immer größeren Objekten mit einer Porosität von rund 60 Prozent an. Ohne die Annahme einer späteren Zerstörung und Restrukturierung des Körpers mit einhergehender Makroporosität gibt es keine Übereinstimmung mit den Rosetta-Daten. Messungen des Radargeräts CONSERT zeigten, dass der Komet auf Längenskalen oberhalb einiger Meter homogen ist und keine Makroporosität aufweist. Für Szenario B bleibt somit nur ein schmaler Parameterbereich übrig.

Als empfindlichster Indikator für die Entstehung des Kometen könnten sich die Festigkeitsmessungen des Kometenmaterials erweisen. Laut Labormessungen sind die beobachteten Werte für größere homogene Körper mit 60 Prozent Porosität, wie sie Szenario B vorhersagt, nicht zu erhalten. Hier sollten die Zug- und Kompressionsfestigkeiten bei mehreren kPa bzw. 0,1 MPa liegen. Dahingegen sagt Szenario A Zug- und Kompressionsfestigkeiten von 0,3 bis 1,5 Pa bzw. 25 bis 50 Pa voraus, was gut mit den Messungen auf 67P übereinstimmt.

Nur eine extrem geringe Zugfestigkeit von weniger als 1 Pa kann die Staubaktivität des Kometen erklären (Abb. 3). Damit der Komet in Sonnennähe die beobachteten großen Mengen an Staub auswerfen kann, muss

er die Gravitations- und Haftkraft der Staubagglomerate überwinden. Zentimetergroße Staubteilchen üben aufgrund des kleinen Kometenkerns an dessen Oberfläche nur einen Druck von etwa 10^{-2} Pa aus. Das ist klein gegen die Zugfestigkeit der Staubagglomerate untereinander, die gemäß Theorie und Laborexperimenten bei etwa 0,3 Pa liegt. Kleinere Agglomerate besitzen höhere Zugfestigkeiten als große. Daher hält das Oberflächenmaterial bei Kometen nicht durch die Schwerkraft zusammen, sondern durch die Kohäsion zwischen den Staubpartikeln. Damit die Staubteilchen mit dem abfließenden Gas in den Weltraum gelangen können, muss der Komet also Gegenkräfte aufbringen, um diese Zugfestigkeiten zu überwinden.

Da Wassereis das bei weitem häufigste volatile Material in Kometen ist, wollen wir im Folgenden nur dessen Verhalten betrachten. Die Dampfdruckkurve zeigt, dass Wassereis einen Sublimationsdruck von 0,3 Pa bei einer Temperatur von rund 200 K erreichen kann. Ein thermophysikalisches Modell muss nun erklären, ob diese Temperaturen unterhalb einer eisfreien Staubschicht möglich sind. Sollte dies der Fall sein, könnten die Staubagglomerate durch die Druckdifferenz zwischen der eistragenden Schicht und dem Vakuum des Weltraums abgelöst und durch das abströmende Gas mitgerissen werden.

Thermophysikalisches Modell eines Kometen

Mithilfe der von Rosetta gewonnenen Daten sind wir in der Lage, ein tieferes Verständnis der Kometenaktivität zu gewinnen. Eine der wichtigsten Methoden, um die Aktivität von Kometen zu untersuchen, ist die thermophysikalische Modellierung der oberflächennahen Schichten des Kometenkerns. Aufgrund der nahezu perfekten Absorption des Kometenmaterials kann die Sonneneinstrahlung sehr effektiv die Kometenoberfläche erwärmen. Die so eingebrachte Energie gelangt ins Innere des Körpers, bis die Wärme-

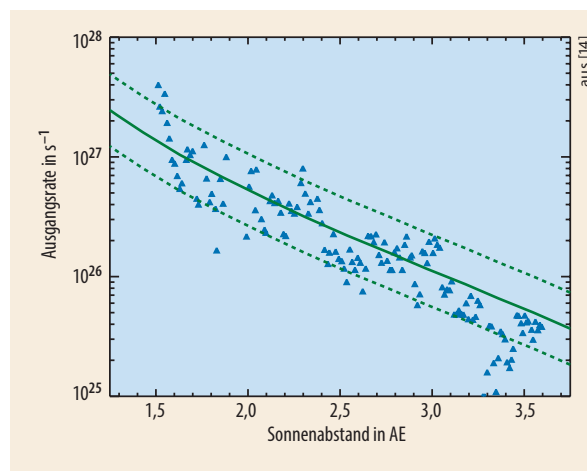


Abb. 5 Gemessene (Dreiecke) [15] und nach Szenario A modellierte H_2O -Ausgasungsrate (Kurven) des Kometen 67P abhängig vom Sonnenabstand. Die bei der Berechnung angenommene Tiefe der Staub-Eis-Grenze beträgt 1 cm, die Häufigkeit von Wassereis 5 % (bzw. 2,5 % und 10 % für die gestrichelten Kurven).

welle auf das tieferliegende Eis trifft. Die Temperaturerhöhung des Eises lässt den Sublimationsdruck ansteigen und verstärkt die Ausgasungsrate. Die dadurch entstehenden freien Wassermoleküle müssen durch die darüber liegenden Schichten diffundieren, bevor sie in den freien Weltraum austreten können. Die geringe Permeabilität des Kometenmaterials erschwert diesen Diffusionsprozess, wodurch sich unterhalb der Kometenoberfläche ein Druck aufbaut.

Das von uns favorisierte thermophysikalische Modell basiert auf einer Reihe experimenteller Ergebnisse zur Wärmeleitung und zum Gastransport in porösen Medien sowie zur Staubaktivität bei der Verdampfung von Wassereis unter kometaren Bedingungen. Daher enthält es nur wenige freie Parameter. Wenn wir basierend auf den Erkenntnissen von Rosetta annehmen, dass Kometenkerne aus zentimetergroßen Staubagglomeraten bestehen (Szenario A), können wir die Temperaturverteilung unterhalb der Kometenoberfläche berechnen (Abb. 4). Die Tiefe des Eises unterhalb der Staubschicht ist im Modell ein freier Parameter und bestimmt, wie groß der Druck ist, der sich durch die Sublimation von Wassereis aufbaut, und ob dieser ausreicht, um Staub von der Oberfläche abzulösen und in den Weltraum zu tragen. Zudem gelingt es mit unserem Modell, die Ausgasungsrate von Wasserdampf mit den von Rosetta gemessenen Werten während der Annäherung von 67P an die Sonne zu vergleichen [14]. Die Werte stimmen für vernünftige Parameter der Tiefe der Eis-Staub-Grenze und der Häufigkeit von Wassereis gut überein (Abb. 5). Im Gegensatz hierzu ist es aufgrund der deutlich geringeren Porengröße von nur einem Mikrometer in Szenario B und der entsprechend verminderten Gasdurchlässigkeit erforderlich, die Staub-Eis-Grenze nur wenige Mikrometer unter die Oberfläche zu legen, um die gemessenen Ausgasungsraten zu reproduzieren. Die von MIRO gemessene Temperaturschichtung scheint damit aber nicht in Einklang zu stehen.

Obwohl vieles dafür spricht, dass Kometen durch den gravitativen Kollaps einer Wolke zentimetergroßer Staubagglomerate entstanden sind, gibt es noch viele Probleme zu lösen, bevor ein endgültiges Urteil über die Entstehung von Kometen möglich ist. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass die gemessenen Zugfestigkeiten auf Komet 67P bei 3 bis 20 Pa liegen und damit deutlich über dem maximalen Druck, den das verdampfende Eis aufbauen kann. Lösungen für diesen Widerspruch könnten darin zu suchen sein, dass entweder die Messungen an inaktiven Orten des Kometen stattfanden oder aber der Druck unter der Staubschicht höher als der Gleichgewichtsgasdruck von Eis ist. Letzteres könnte beispielsweise durch ins Eis eingeschlossene „Supervolatile“ wie CO- oder CO₂-Eis zustände kommen, die bei der Temperatur des Wassereises einen viel höheren Dampfdruck besitzen und schlagartig freigesetzt werden, wenn das Wassereis verdampft.

Ein Schatz an Daten

Die einzigartigen Messungen der Raumsonde Rosetta und ihrer Landeeinheit Philae haben uns mit einem wissenschaftlichen Schatz an Daten versorgt, den vollständig zu heben viele Jahre in Anspruch nehmen wird. Erste Analysen legen nahe, dass Komet 67P vor etwa 4,6 Milliarden Jahren aus einer Wolke aus zentimetergroßen Staubteilchen entstanden ist, die unter ihrem eigenen Gewicht sanft kollabiert ist. Dieses Entstehungsszenario beschreibt viele der beobachteten Phänomene auf sehr einfache Weise, obwohl etliche Details noch zu klären sind.

Literatur

- [1] C. Güttler et al., *Astronomy & Astrophysics* **513**, A56 (2010)
- [2] A. Zsom et al., *Astronomy & Astrophysics* **513**, A57 (2010)
- [3] A. Youdin und J. Goodman, *The Astrophysical Journal* **620**, 459 (2005)
- [4] A. Johansen et al., *Nature* **448**, 1022 (2007)
- [5] K. Wahlberg Jansson et al., *The Astrophysical Journal* **835**, 109 (2017)
- [6] F. Windmark et al., *Astronomy & Astrophysics* **540**, A73 (2012)
- [7] K.-H. Glassmeier et al., *Space Science Reviews* **128**, 1 (2007)
- [8] H. Sierks et al., *Science* **347**, aal044 (2015)
- [9] M. Pätzold et al., *Nature* **530**, 63 (2016)
- [10] O. Groussin et al., *Astronomy & Astrophysics* **583**, A32 (2015)
- [11] K. Altwegg et al., *Science* **347**, 1261952 (2015)
- [12] S. Gulkis et al., *Science* **347**, aaa0709 (2015)
- [13] W. Kofman et al., *Science* **349**, aab0639 (2015)
- [14] J. Blum et al., *MNRAS* (eingereicht)
- [15] N. Fougère et al., *Astronomy & Astrophysics* **588**, A134 (2016)

DIE AUTOREN



Die Autoren im Watt vor der Hallig Hooge: (v. l.) Jürgen Blum, Holger Sierks, Bastian Gundlach, Carsten Güttler.

Jürgen Blum (FV Extraterrestrische Physik) ist seit 2003 Professor für extraterrestrische Physik an der TU Braunschweig. Seine Arbeitsgebiete umfassen die Entstehung der ersten festen Körper in jungen Planetensystemen sowie kleine Körper im Sonnensystem.

Bastian Gundlach (FV Extraterrestrische Physik, Tiefe Temperaturen) ist seit 2009 wissenschaftlicher Angestellter an der TU Braunschweig und arbeitet zusammen mit Jürgen Blum an dem Verständnis der Entstehung und der Aktivität von Kometen.

Carsten Güttler ist Projekt- und wissenschaftlicher Manager für das OSIRIS Kamerasystem auf Rosetta am MPI für Sonnensystemforschung in Göttingen. Bereits in seiner Doktorarbeit forschte er an der Entstehung kleiner Körper im jungen Sonnensystem.

Holger Sierks ist Wissenschaftler am MPI für Sonnensystemforschung in Göttingen. Er leitet das internationale Konsortium, das die Aufnahmen vom Kometen 67P/Tschurjumow-Gerassimenko gemacht hat.