

# Deep Impact – Einschlag auf einem Kometen

Harald Krüger

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, 37191 Katlenburg-Lindau

## Zusammenfassung

Am 4. Juli 2005, dem amerikanischen Unabhängigkeitstag, machte die Raumsonde Deep Impact ihrem Namen alle Ehre: sie feuerte ein 372 kg schweres Geschoss auf den Kern des Kometen Tempel 1. Kameras an Bord der Sonde und Teleskope rund um den Globus verfolgten die Kollision und beobachteten die ausgeworfene Materiewolke. Mit Deep Impact konnten viele neue Informationen über die Zusammensetzung der Oberfläche des Kometenkerns und seinen inneren Aufbau gewonnen werden.

Die Raumsonde Deep Impact wurde am 12. Januar 2005 gestartet und auf eine Bahn gebracht, die sie nach nur knapp sechs Monaten Flugzeit auf Kollisionskurs mit dem Kometen Tempel 1 führte. Die Sonde bestand aus dem "Mutterschiff", das zwei Kameras und ein Infrarotspektrometer an Bord hatte, sowie einem 372 kg schweren ebenfalls mit einer Kamera ausgerüsteten Projektil, das auf den Kometen abgefeuert wurde. Die Bahn der Sonde war dabei so gewählt worden, dass der Einschlag nur einen Tag vor dem Durchgang des Kometen durch seinen sonnennächsten Punkt (Perihel) erfolgte, um so eine möglichst hohe Einschlagsenergie zu erreichen (Abb. 1). Ein wichtiges Kriterium bei der Planung der Mission war außerdem, dass der Einschlag von der Erde aus beobachtbar sein sollte. Es war nämlich von vornherein klar, dass eine Vielzahl von Beobachtungen notwendig sein würde, um möglichst umfassende Informationen über die oberflächennahen Schichten des Kometenkerns zu bekommen.

## 1 Aufbau der Kometen

Die Kometen gehören zu den kleinen Himmelskörpern in unserem Sonnensystem. Im Gegensatz zu den Planeten bewegen sie sich auf stark elliptischen Bahnen um die Sonne. Befinden sie sich bei ihrem Umlauf weit weg von der Sonne, bestehen sie nur aus dem Kern, der typischerweise nur wenige Kilometer groß ist. Soweit wir heute wissen, bestehen die Kometenkerne zum großen Teil aus Wassereis mit Beimengungen von Gesteinsmaterial. Sie werden deshalb auch als schmutzige Schneebälle bezeichnet. Nähert sich der Kern der Sonne, wird seine Oberfläche von der Sonnenstrahlung erwärmt. Dadurch sublimiert Wassereis aus dem Kern und wird in die Umgebung freigesetzt. Das Gas reisst Staubteilchen mit sich. Gas und Staub bilden die Koma, die den Kern wie eine Atmosphäre umhüllt und mehrere hunderttausend Kilometer groß ist (Abb. 2).

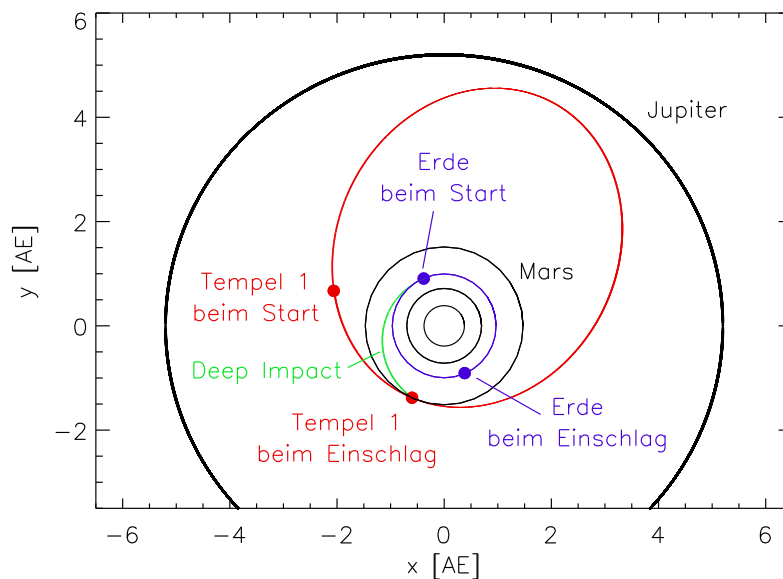


Abbildung 1: Die Bahnen des Kometen Tempel 1 und der Raumsonde Deep Impact im Sonnensystem.

Das in die Koma abgegebene Gas wird durch die Sonnenstrahlung dissoziiert und ionisiert, so dass ein Plasma entsteht. Der Sonnenwind nimmt die dabei entstehenden Ionen mit und transportiert sie vom Kern weg. Daraus bildet sich der bläuliche Ionenschweif, der vom Kometen weg in die der Sonne entgegengesetzte Richtung zeigt. Gleichzeitig werden die Staubteilchen in der Koma durch den Strahlungsdruck der Sonne ebenfalls vom Kometen weg in die der Sonne abgewandte Richtung transportiert. Sie sind jedoch wesentlich langsamer als die Ionen, so dass ihre Bahngeschwindigkeit nahezu konstant bleibt, ihre Winkelgeschwindigkeit jedoch abnimmt. Der Staubschweif erhält dadurch seine gebogene Form. Da die Staubteilchen das Sonnenlicht reflektieren und streuen, erscheint der Staubschweif weiss bis gelblich.

Der Verdampfungsprozess, bei dem Staub und Gas in den umgebenden Weltraum abgegeben werden, führt dazu, dass ein Komet bei jedem Umlauf um die Sonne einen geringen Teil seiner Masse verliert. Nach etwa 1000 Umläufen hat er den größten Teil seines Materials verloren. Übrig bleibt ein nicht mehr aktives Objekt, das einem Asteroiden gleicht. Manche Kometen zerbrechen und lösen sich in kleinere Bestandteile auf. Weiterhin können sie durch Zusammenstöße mit der Sonne oder den Planeten zerstört oder durch Jupiter so stark abgelenkt werden, dass sie das Sonnensystem verlassen.

## 2 Kometen und die Entstehung des Sonnensystems

Warum ist die Untersuchung von Kometen überhaupt interessant für die Astronomen? Als unser Sonnensystem vor rund 4,6 Milliarden Jahren aus einer rotierenden Scheibe aus Gas

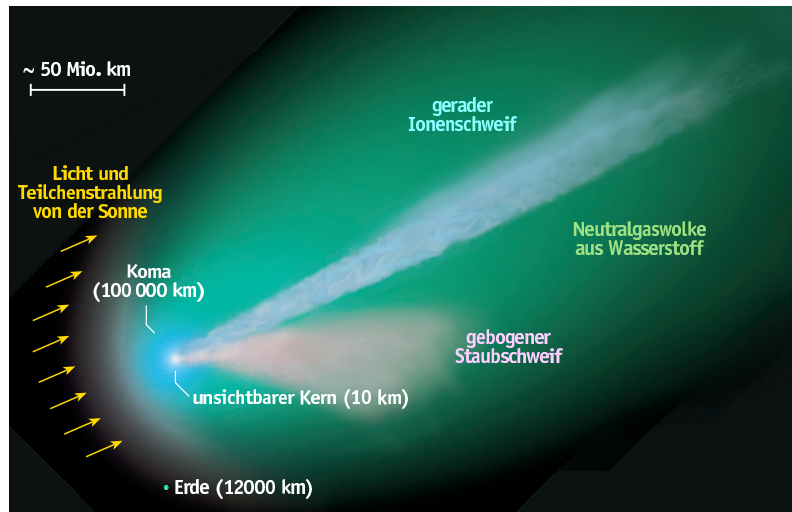


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Kometen (Quelle: Sterne & Weltraum).

und Staub entstand, waren die Temperaturen im inneren Bereich der Scheibe so hoch, dass die leicht flüchtigen chemischen Elemente verdampften. Übrig blieben nur die schweren Elemente, aus denen sich die erdähnlichen Planeten bildeten. Weiter draußen in der Scheibe waren die Temperaturen jedoch so niedrig, dass Wasser in der Scheibe kondensieren konnte. Dort bildeten sich die jupiterähnlichen Planeten, die sehr viel Wasserstoff und Helium enthalten. Ebenfalls in diesen Regionen bildeten sich die Kometen, die anschließend durch nahe Begegnungen mit den Riesenplaneten aus dem Sonnensystem heraus oder an seinen Rand geschleudert wurden. Die Objekte, die dem Sonnensystem dabei nicht verloren gingen, bilden heute die Oortsche Wolke in einer Entfernung von etwa tausend bis hunderttausend astronomischen Einheiten (AE) von der Sonne. Die Oortsche Wolke ist damit ein Reservoir für Kometen, die durch nahe Vorbeigänge von Sternen oder Molekülwolken wieder ins innere Sonnensystem zurück transportiert werden können. Sie erscheinen zunächst als langperiodische Kometen mit Umlaufbahnen von Millionen Jahren und mehr. Ihre Bahnen können jedoch durch die Schwerkraft der großen Planeten, insbesondere Jupiters, sehr stark verändert und ihre Umlaufzeiten wesentlich verkürzt werden. Eine Untergruppe bilden die Kometen der Jupiter-Familie, deren Bahnen durch die Schwerkraft des Riesenplaneten so stark verändert wurden, dass ihr sonnenfernster Punkt (Aphel) etwa bei der Jupiter-Bahn und ihre Bahnebene nahe der Ekliptik liegt. Zur Jupiter-Familie gehört auch Tempel 1.

Den weitaus größten Teil ihres "Lebens" verbringen die Kometen in den Außenbereichen des Sonnensystems. Die Temperaturen sind dort so niedrig, dass die meisten chemischen Reaktionen und physikalischen Prozesse nur sehr langsam ablaufen. Die Kometenkerne sind sozusagen tiefgefroren und befinden sich nahezu unverändert in ihrem Urzustand wie

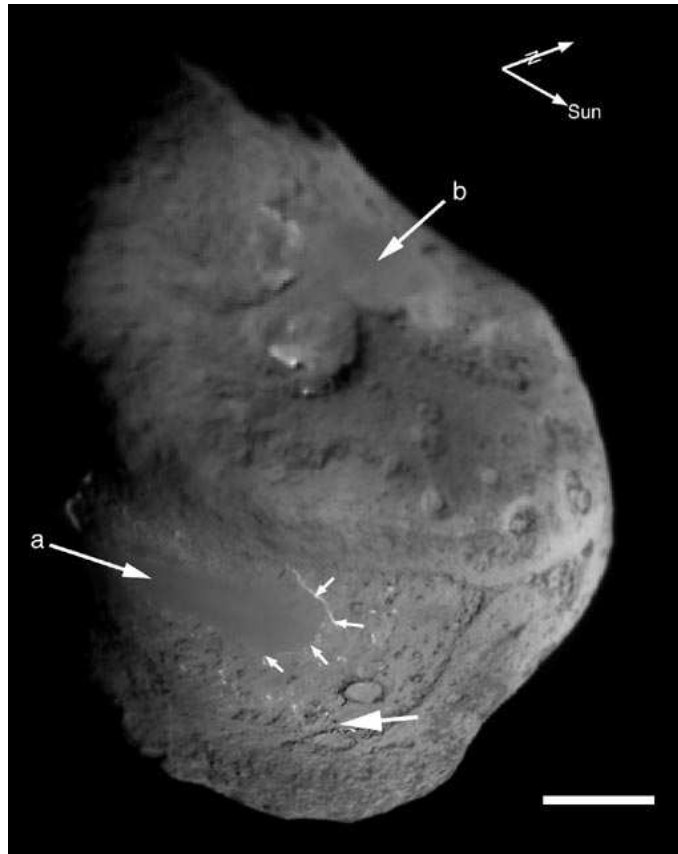


Abbildung 3: Der Komet Tempel 1 vor dem Einschlag des Projektils von Deep Impact (Komposit aus mehreren Bildern). Die Rotationsachse des Kometen verläuft etwa diagonal von links unten nach rechts oben (angedeutet durch den Pfeil in Nordrichtung). Ein großer einzelner Pfeil markiert die Einschlagstelle. Die Länge des weißen Balkens am Rand beträgt 500 m. Weitere Details siehe Text (Quelle: Science).

zu der Zeit, als sie im Sonnenebel entstanden. Ihre Erforschung kann daher wichtige Informationen über die Bedingungen liefern, die bei der Entstehung des Sonnensystems herrschten.

### 3 Der Einschlag auf Tempel 1

Tempel 1 wurde im Jahre 1867 von Ernst Wilhelm Leberecht Tempel entdeckt und nach ihm benannt. Seine damalige Umlaufperiode um die Sonne betrug 5,68 Jahre, und er wurde nur während zwei Durchgängen durch das innere Sonnensystem beobachtet. Bahnrechnungen ergaben, dass ein naher Vorbeiflug in nur 0,55 AE am Jupiter im Jahre 1881 seine Umlaufzeit auf 6,5 Jahre vergrößerte und das Perihel seiner Bahn von 1,77 auf 2,07 AE anhub. Zwei weitere nahe Vorbeigänge am Jupiter 1941 und 1953 senkten das Perihel wieder

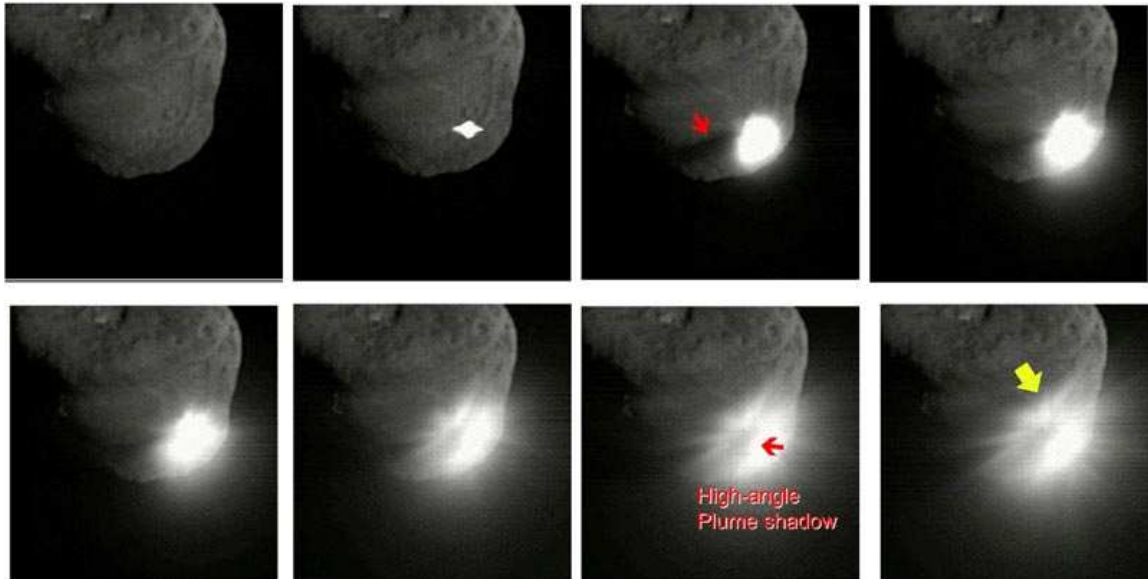


Abbildung 4: Bildsequenz des Einschlags auf Tempel 1. Rote Pfeile markieren Schatten, die von der Auswurfwolke auf die Kernoberfläche geworfen wurden. Der gelbe Pfeil markiert einen Bereich der Auswurfwolke, in den auf Grund des flachen Einschlagwinkels des Projektils weniger Auswurfmaterial geschleudert wurde (Quelle: Science).

ab und verkürzten die Umlaufperiode. Der bis dahin als "verloren" gegoltene Komet wurde im Jahr 1967 wieder entdeckt und seit dem bei allen Durchgängen durch das innere Sonnensystem beobachtet. Seine heutige Umlaufzeit beträgt 5,5 Jahre und sein Perihelabstand 1,5 AE (Abb. 1).

Am 3. Juli 2005 wurde das 372 kg schwere Geschoss vom Mutterschiff von Deep Impact getrennt und auf Kollisionskurs mit dem Kern von Tempel 1 gebracht. 24 Stunden später schlug es mit einer Geschwindigkeit von  $10,3 \text{ km s}^{-1}$  unter einem Winkel von etwa 20 bis 30 Grad zur Horizontalen auf der Kernoberfläche ein, während das Mutterschiff in geringer Entfernung am Kern vorbei flog. Die vor und während des Einschlags aufgenommenen und anschließend zur Erde gefunkten Bilder zeigen einen unregelmäßig geformten Himmelskörper, der einen effektiven Radius von etwa 3,0 km hat (Abb. 3). Seine Rotationsperiode beträgt 41,85 Stunden, und seine Masse wurde zu etwa  $4 \cdot 10^{13} \text{ kg}$  abgeschätzt. Daraus ergibt sich eine Dichte für den Kern von etwa  $350 \text{ kg m}^{-3}$ , was wesentlich geringer ist als die Dichte von Wasser. Ähnlich niedrige Dichten wurden auch für andere Kometen gemessen. Dies zeigt, dass die Kometenkerne sehr porös sein müssen.

Beim Einschlag wurden etwa  $10^4$  bis  $10^5$  Tonnen Material freigesetzt. Nimmt man eine typische schüsselförmige Kraterform mit einem Durchmesser-zu-Tiefenverhältnis von 4:1 und eine Dichte des Kernmaterials von  $350 \text{ kg m}^{-3}$  an, so ergibt sich ein Durchmesser von etwa 100 m für den beim Einschlag erzeugten Krater. Eine direkte Beobachtung des Kraters war nicht möglich, da die Wolke aus freigesetztem Auswurfmaterial den Blick auf die Einschlagsregion versperrte (Abb. 4).

Das ausgeworfene Kometenmaterial bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von wenigen hundert Metern pro Sekunde bis herunter zur Fluchtgeschwindigkeit vom Kern, die nur etwa  $1,5 \text{ ms}^{-1}$  beträgt, vom Kern weg. Aus dem Helligkeitsanstieg der Koma beim Einschlag konnte die freigesetzte Staubmasse grob abgeschätzt werden, da die Staubkörner das Sonnenlicht reflektieren und streuen. Das Gas wiederum, das überwiegend aus Wassermolekülen bestand, wurde durch die UV-Strahlung der Sonne größtenteils in die Radikale OH und H zerlegt. Die OH-Radikale fluoreszieren und konnten gemessen werden. Aus ihrer Helligkeit ergab sich die beim Einschlag freigesetzte Menge an Wasser. Sie ist mit 5 bis  $9 \cdot 10^3$  Tonnen Wassereis deutlich geringer als die geschätzte Gesamtmasse an freigesetztem Staub. Das bisherige Bild von Kometen als schmutzigem Schneeball muss durch die Untersuchungen von Deep Impact möglicherweise korrigiert werden: Tempel 1 ähnelt mehr einem eisigen Staubball. Das freigesetzte Wassereis sublimierte bereits wenige Stunden nach dem Einschlag durch das erwärmende Sonnenlicht. Die freigesetzte Staubfontäne dagegen konnte noch Tage nach dem Einschlag beobachtet werden.

### **3.1 Zusammensetzung der Kometenmaterie**

Eine interessante Frage war die mineralogische Zusammensetzung der Kometenmaterie. Nach früheren Beobachtungen des Kometen Hale-Bopp von der Erde aus bestehen die Staubkörner in dessen Koma zum großen Teil aus kristallinen und amorphen wasserfreien Silikaten und zwar fast ausschließlich aus magnesium-reichem Olivin (Forsterit) und Pyroxen (Enstatit). Diese Ergebnisse wurden kürzlich durch Untersuchungen von Staubteilchen, die mit der Rückkehrkapsel der Stardust-Sonde in der Koma des Kometen Wild 2 eingefangen und zur Erde gebracht wurden, bestätigt. Infrarot-Beobachtungen der Einschlagswolke von Tempel 1 ergaben ebenfalls einen großen Anteil dieser Minerale. Zusätzlich deuten die Beobachtungen jedoch auch auf eisen-reichen Olivin (Fayalit) und eine Reihe wasserhaltiger (hydrierter) Minerale (u.a. Schichtsilikate und Karbonate) hin, was allerdings noch kontrovers diskutiert wird. Diese erwartet man nicht in Kometen und ihr Vorhandensein würde bedeuten, dass sich der Komet während seiner Geschichte wesentlich erwärmt haben muss, so dass sich flüssiges Wasser in ausreichender Menge bilden konnte. Inwieweit Tempel 1 in diesem Punkt besonders ist, müssen zukünftige Untersuchungen – auch anderer Kometen – zeigen.

### **3.2 Wasser im Kern**

Weitere wichtige Ergebnisse der Deep Impact-Mission waren der Nachweis und die Charakterisierung von Wasser im Kern von Tempel 1. Bislang war Wasser zwar bei einer Vielzahl von Kometen beobachtet worden, allerdings immer nur in der Koma. Ein direkter Nachweis im Kern oder auf dessen Oberfläche war bisher nicht möglich. Mit den Kameras von Deep Impact gelang nun zweifelsfrei der Nachweis von Wassereis an der Oberfläche von Tempel 1. Außerdem wurde Wassereis sofort nach dem Einschlag in der Auswurfwolke gemessen, was bedeutet, dass sich das Eis direkt unterhalb der Kernoberfläche befunden

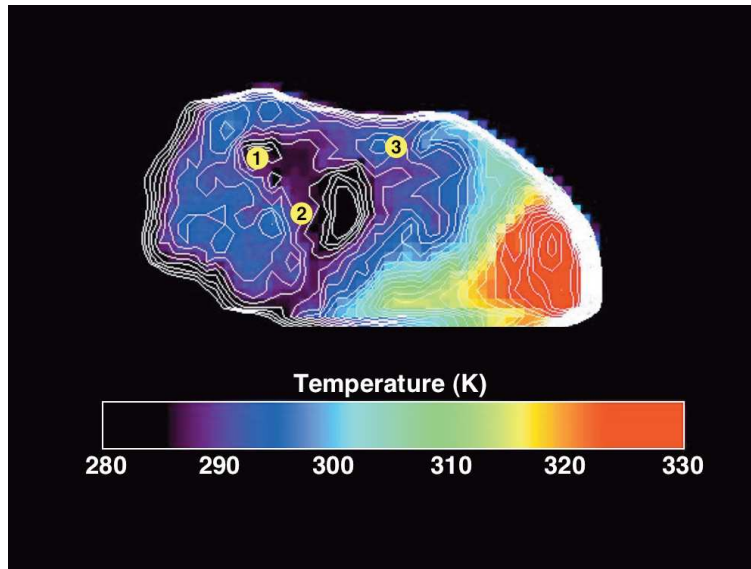


Abbildung 5: Temperaturkarte der oberen Hälfte des Kerns von Tempel 1. Die gelben Nummern markieren Regionen, in denen Wassereis auf der Oberfläche nachgewiesen wurde. Die Temperaturen liegen in diesen Regionen bei 285 bis 295 K (Quelle: Science).

haben muss.

Aus Infrarot-Beobachtungen konnte außerdem die Temperatur eines Teils der Kernoberfläche bestimmt werden (Abb. 5). Überraschenderweise wurden selbst in den Regionen, in denen Wassereis nachgewiesen wurde, recht hohe Temperaturen von ca. 285 bis 295 K gemessen. Wassereis müsste bei diesen Temperaturen sofort sublimieren. Die Sublimationstemperatur von Wasser im Abstand von 1,5 AE von der Sonne wurde nämlich mit ca. 200 K abgeschätzt. In der Tat waren alle beobachteten Gebiete auf der Oberfläche des Kerns wesentlich wärmer als 200 K. Zur Erklärung dieser Messungen muss man allerdings berücksichtigen, dass das Infrarotspektrometer nur eine begrenzte Auflösung von 120 Metern pro Bildelement (Pixel) an der Kernoberfläche erreicht hat. Das Wassereis muss auf Skalen unterhalb dieser Auflösungsgrenze stark mit steinigem Material durchmischt, aber von dem Gesteinsmaterial im wesentlichen thermisch entkoppelt sein. Das heißt, dass die gemessenen hohen Temperaturen im wesentlichen die Temperatur des Gesteins wiedergeben, während das Wassereis kühl bleibt. Nur so kann es eine niedrigere Temperatur als die übrige Oberfläche aufrecht erhalten und über lange Zeiten stabil an der Oberfläche sein. Dies bedeutet außerdem, dass das Wassereis in den untersuchten Gebieten nur einen geringen Anteil von weniger als 10% der Kernoberfläche ausmachen kann.

### 3.3 Struktur der Kernoberfläche

Die Bilder von Tempel 1 zeigen deutliche Hinweise auf einen schichtartigen Aufbau des Kerns. Dies ist besonders deutlich in der Mitte von Abbildung 3, wo man zwei parallele

etwa in horizontaler Richtung verlaufende Linien erkennen kann. Diese könnten sich bis tief ins Kerninnere fortsetzen. Ob diese Strukturen ihren Ursprung in der Entstehung des Kerns haben oder durch Erosionsprozesse an dessen Oberfläche entstanden sind, ist bisher unklar.

Weiterhin sind auf den Bildern kreisförmige Strukturen zu erkennen, die Mondkratern sehr stark ähneln. Inwieweit es sich hier – wie auf dem Mond – um Einschlagkrater handelt, ist ebenfalls unklar. Sind es tatsächlich Einschlagskrater, würde dies bedeuten, dass der Komet eine Phase durchlaufen hat, in der die Sublimationsrate von großen Teilen seiner Oberfläche sehr gering gewesen sein muss. Anderenfalls hätte die Sublimation zu einer relativ schnellen Erosion und damit Zerstörung der Krater geführt. Modellrechnungen deuten darauf hin, dass Kometen durch Bahnstörungen, insbesondere durch Jupiter, mehrfach zwischen lang- und kurzperiodischen Phasen "umschalten" können. In Phasen, in denen sie als langperiodische Kometen sehr lange für einen Umlauf um die Sonne benötigen, können Oberflächenstrukturen für lange Zeit unverändert erhalten bleiben. Inwieweit es sich bei Tempel 1 um solch einen Kandidaten handelt, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen.

Zusätzlich zu den kraterähnlichen Strukturen zeigen die Bilder mindestens zwei sehr flache Gebiete, in denen die Höhenunterschiede weniger als einige 10 m betragen (mit a und b markierte Gebiete in Abbildung 3). Hier könnte Wasser geschmolzen und wieder gefroren sein. Eines dieser Gebiete wird durch einen etwa 20 m hohen Steilhang begrenzt (markiert durch vier kleine Pfeile). In dem zweiten dieser Gebiete wurde auch tatsächlich Wassereis an der Oberfläche nachgewiesen (Abb. 5).

## 4 Ausblick

Die Mission Deep Impact hat bisher eine Vielzahl neuer Ergebnisse über die Oberfläche und den inneren Aufbau des Kometen Tempel 1 geliefert, von denen hier nur ein kleiner Teil vorgestellt werden konnte. Die Auswertung der Daten geht jedoch weiter und weitere neue Ergebnisse sind zu erwarten.

Tempel 1 wird im Jahr 2011 von der Stardust-Sonde, die 2004 am Kometen Wild 2 vorbeiflog, besucht werden. Dabei soll unter anderem die Kartierung des Kerns vervollständigt werden, was mit Deep Impact nur etwa zur Hälfte gelang. Tempel 1 wird damit der erste Komet sein, der zweimal von einer Raumsonde besucht wird. Das Mutterschiff von Deep Impact wird dagegen im Jahr 2008 am Kometen Boethin vorbeifliegen. Ab 2014 schließlich wird die europäische Rosetta-Sonde den Kometen Churyumov-Gerasimenkov detailliert untersuchen. Ein Landegerät soll weich auf der Kernoberfläche landen und gezielt Bodenproben untersuchen. Es ist zu erwarten, dass diese ein wesentlich erweitertes Bild über den Aufbau und die Entwicklung der Kometen liefern werden.