

## Strahlenkrater im Labor

Erstmals ließen sich die charakteristischen Merkmale von Strahlenkratern experimentell reproduzieren.

**M**ond, Merkur oder Mars sind von unzähligen Kratern übersät – Zeugen eines heftigen Bombardements in der Frühzeit ihrer Entwicklung. Auf dem Mond fallen zuerst die großen dunklen Becken auf. Diese Mare entstanden vor über 3,8 Milliarden Jahren durch Einschläge von Asteroiden mit einem Durchmesser von bis zu mehreren hundert Kilometern. Auf den zweiten Blick sieht man radiale helle Strahlen, die von deutlich kleineren und jüngeren Einschlagkratern ausgehen. Die Strahlen können dabei fast über die gesamte sichtbare Hemisphäre des Mondes reichen. Ein besonders prominentes Beispiel hierfür ist der Tycho-Krater mit einem Durchmesser von 85 km und einer Tiefe von 4,8 km (Abb. 1). Er entstand vor rund 100 Millionen Jahren.<sup>1)</sup> Das ließ sich radiometrisch aus Proben der Apollo-17-Mission schließen, bei denen man davon ausgeht, dass es sich um Auswurfmaterial des Tycho-Kraters handelt. Die hellen Strahlen werden in der Regel als Auswurfmassen (Ejekta) oder als Furchen interpretiert, die der Auswurfprozess erzeugte. Sie wurden 1647 erstmals von Johannes Hevelius auf Mondkarten dokumentiert, ihre genaue Entstehung ist aber nach wie vor ungeklärt. Ähnliche Strahlen sind auch bei Explosionen zu beobachten.

Mit „Impaktexperimenten“, bei denen ein Projektil auf ein Granular wie Quarzsand oder kleine Glaskügelchen als Target trifft [1, 2], ließen sich solche Strahlen bisher

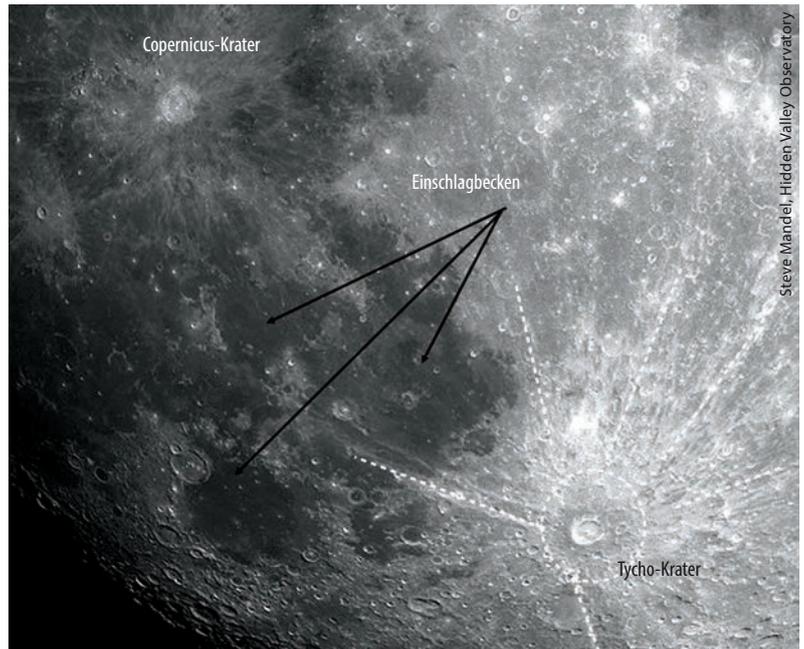


Abb. 1 Der Krater Tycho auf dem Mond besitzt markante Strahlen (gestrichelte Linien) und auch eine strahlenfreie Zone (gestrichelter Kreis) um den Krater.

nicht reproduzieren. Das ist nun erstmalig einer Forschergruppe im japanischen Okinawa gelungen [3], inspiriert von Amateurversuchen. Schüler konnten nämlich im Gegensatz zu professionellen Experimentatoren sehr wohl strahlenartige Auswurfpfade beobachten. Wie sich herausstellte, war die Ursache dafür die weniger sorgfältig geglättete Targetoberfläche. Die Forscher untersuchten dies nun systematisch, indem sie ein bienenwabenartiges Muster verwendeten und den Abstand der Vertiefungen (Wellenlänge  $\lambda$ ) variierten (Abb. 2). Dabei ergab sich ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen der

Strahlenzahl  $N$  und dem Verhältnis  $L/\lambda$ , wobei  $L$  der Durchmesser des Projektils ist.

Die Idee, dass die Topographie im Einschlaggebiet das Auswurfmaterial entlang radialer Pfade als Strahlen fokussiert, äußerte Valery Shuvalov (Institute of Geosphere Dynamics, Moskau) bereits 2012. Anhand von Computersimulationen konnte er zeigen, dass schüsselförmige Vertiefungen und domartige Aufwölbungen die Entstehung von Ejektastrahlen bzw. Zonen, in denen praktisch keine Auswurfmassen abgelagert werden, verursachen [4].

Die Simulationen und die aktuellen Experimente [3, 4] liefern den gleichen Erklärungsansatz, wie es zur Bildung der strahlenartigen Strukturen durch Oberflächen- und unulationen kommt: Der Einschlag erzeugt eine Stoßwelle, die sich in etwa konzentrisch im Untergrund und entlang der Oberfläche ausbreitet (Abb. 3). Das Ausbreitungszentrum befindet sich grob einen Projektildurchmesser unter der Oberfläche. Für die Entstehung von Ejektastrahlen ist die Wechselwirkung der Stoßwelle mit der

1) Das ließ sich radiometrisch aus Proben der Apollo-17-Mission schließen, bei denen man davon ausgeht, dass es sich im Auswurfmaterial des Tycho-Kraters handelt.

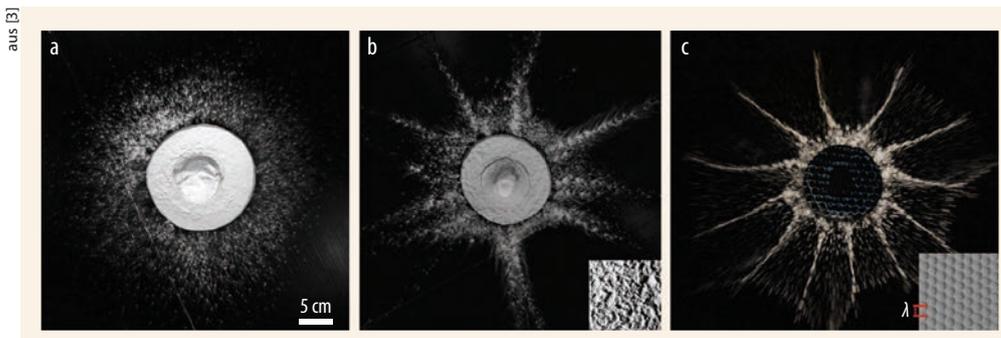


Abb. 2 In den Experimenten zeigen sich bei glatter Targetoberfläche (a) keine Strahlen. Diese treten aber auf, wenn eine unregelmäßige (b) oder bienenwabenförmige (c) Struktur vorliegt.

Targetoberfläche ausschlaggebend. Betrachtet man die Welle vereinfacht als Kompressionswelle, die zunächst nur eine positive Phase (Kompression) aufweist, so erfährt diese an der Targetoberfläche eine Phasenumkehr und wird als Entlastungswelle mit negativer Phase, welche die Kompression auslöscht, zurück ins Target reflektiert. Die Oberfläche wird dabei beschleunigt. Falls dabei die Zugfestigkeit übertroffen wird, entsteht eine Zugspannung, die zum Abplatzen (Spallation) von Material führt (Abb. 3). Granulare Materialien wie im Experiment [3] besitzen allerdings keine Zugfestigkeit, sodass einzelne Körner auch bei geringer Wellenamplitude aus der Oberfläche herausgeschleudert werden – eine einfache elastische Welle kann bereits ausreichen. Im Festgestein umgibt die „Spallationszone“ den eigentlichen Krater und ist fast radialsymmetrisch [5]. Dafür sind deutlich stärkere Wellen, nämlich Stoßwellen, erforderlich.

Ist die Oberfläche uneben wie auf dem Mond, wirkt beispielsweise eine Mulde oder ein Krater wie eine konkave Linse. Material, das von ihrer Flanke abplatzt, wird auf einen „Brenn“-Punkt hin konvergierend herausgeschleudert und bewegt sich dann entlang eines radialen Strahles nach außen (Abb. 3).

Umgekehrt wirkt eine Aufwölbung wie der Zentralberg von Tycho als konvexe Linse, die das durch Spallation herausgeschleuderte Material streut. Im Schatten der Aufwölbung wird kein Material ausgeworfen. Die entstehenden Ejektastrahlen wären folglich als Spallationsstrahlen zu bezeichnen.

Die aktuellen Experimente [3] bestätigen die einfache Erklärung von Shuvalov [4] und bieten eine systematische Untersuchung. Sabuwala und Kollegen schlagen sogar vor, dass sich aus der Anzahl der Strahlen die Größe des Einschlagkörpers (Impaktor) ermitteln lässt. Dieser Ansatz ist jedoch äußerst kritisch zu bewerten, da es sich bei den Experimenten um keine „echten“ Hochgeschwindigkeitsversuche handelt, bei denen Stoßwellen entstehen können.

Dafür muss die Einschlaggeschwindigkeit  $v_{\text{imp}}$  größer als die Schallwellengeschwindigkeit  $c$  sein, die in granularen Materialien zwar niedrig ist ( $c_{\text{sand}} \approx 100$  m/s), jedoch handelt es sich bei allen gezeigten Experimenten um Fallversuche. Dort beträgt  $v_{\text{imp}}$  zwischen 4 und 40 m/s. Die Krater, die bei solchen Versuchen entstehen, sind in der Regel nur wenig größer als das Projektil selbst. Liegt jedoch  $v_{\text{imp}}$  im Bereich von km/s und ist damit sehr viel größer als  $c$ , so zeigen

Experimente, dass der entstehende Krater rund 20-mal größer ist als das Projektil [1]. Die in [3] vorgeschlagene Verknüpfung zwischen Strahlenzahl  $N$ , Kratergröße und Projektildurchmesser  $L$  ist daher äußerst fragwürdig.

Shuvalov betrachtet in seinen numerischen Modellen deutlich realistischere Szenarien, bei denen er typische Einschlaggeschwindigkeiten auf dem Mond (20 km/s) angenommen hat [4]. Jedoch ist das Materialverhalten, insbesondere die Zugfestigkeit, nur sehr vereinfacht berücksichtigt. Die Simulationen zeigen sehr schön, dass Spallationsstrahlen sehr früh im Verlauf der Kraterbildung entstehen – bezogen auf die Größe des Tycho-Kraters nach 0,25 bis 0,5 Sekunden. Zu einem solchen Zeitpunkt hat das Kraterwachstum erst begonnen. Insgesamt dauerte die Bildung des Tycho-Kraters wenige Minuten. „Klassische“ Auswurfmassen, die während der Kraterexkavation deutlich später entlang ballistischer Bahnen herausgeschleudert werden, überdecken die Spallationsstrahlen in der näheren Umgebung des Kraters, wie dies auch bei natürlichen Kratern der Fall ist (Abb. 1).

Grundsätzlich scheinen Simulationen und Experimente die Frage nach der Entstehung von Strahlenkratern gelöst zu haben. Nun wäre allerdings eine weitere systematische Untersuchung wünschenswert, welche die Größenhäufigkeitsverteilung von Einschlagkratern auf dem Mond mit der Anzahl von Strahlen auf realistische Weise verknüpft. Hierfür würden sich Simulationen mit realistischeren Modellen der Gesteinsfestigkeit anbieten.

Kai Wünnemann

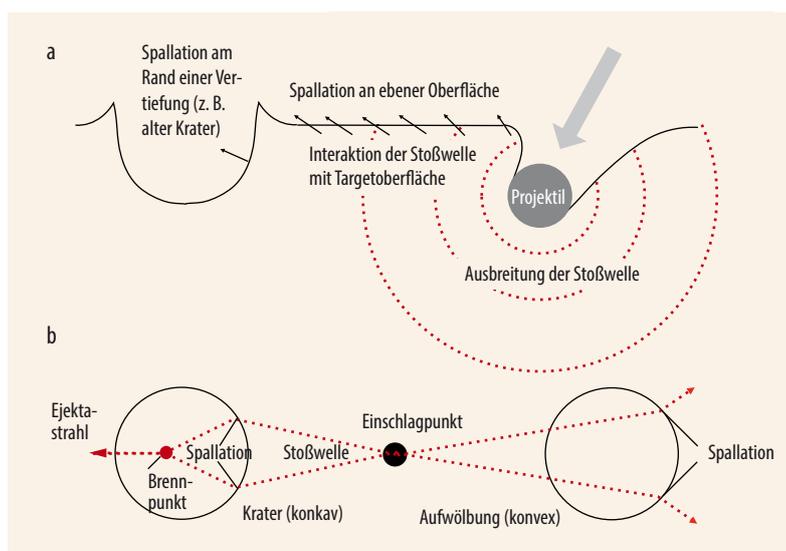


Abb. 3 Ein Schnitt durch das Aufschlagsszenario zeigt (a), wie sich die Stoßwelle ausbreitet (gestrichelte konzentrische Kreise markieren die Stoßwellenfront zu verschiedenen Zeitpunkten) und mit der

Targetoberfläche sowie dem Rand einer Vertiefung interagiert. Das Entstehen der Ejektastrahlen lässt sich anhand der Aufsicht verstehen, bei der die Stoßwelle als Wellenstrahl dargestellt ist (b).

- [1] R. M. Schmidt, Proc. Lunar Planetary Science Conference 11th, 2099 (1980)
- [2] K. Wünnemann et al., Meteoritics and Planetary Sciences **51**, 1762 (2016)
- [3] T. Sabuwala et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 264501 (2018)
- [4] V. Shuvalov et al., Meteoritics and Planetary Sciences **47**, 261 (2012)
- [5] T. Kenkmann et al., Meteoritics and Planetary Sciences **46**, 890 (2011)

Prof. Dr. Kai Wünnemann, Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, Invalidenstraße 43, 10115 Berlin und Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften, Fachrichtung Planetologie und Fernerkundung, Malteserstr. 74–100, 12249 Berlin