

Sandstein unter Beschuss

Kollisionen fester Körper zählen zu den fundamentalsten geologischen Prozessen im Sonnensystem. Einschläge von Asteroiden und Kometen auf der Erdoberfläche haben die Entwicklungsgeschichte der Erde wiederholt beeinflusst. Die hochdynamischen Abläufe bei einem derartigen Einschlag sind mit erheblichen Veränderungen in Mineralen und Gesteinen verbunden und haben weitreichende Effekte auf die Umwelt. Ein interdisziplinäres Team von Wissenschaftlern des Berliner Museums für Naturkunde untersucht die kurzzeitdynamischen Prozesse mit einem breit angelegten Instrumentarium, das aus Geländestudien, Experimenten, Mikroanalytik und Computersimulation besteht. Die neue Ausstellung des Museum für Naturkunde stellt die Erde in ihrem planetaren Kontext dar und thematisiert Meteoriteneinschläge einerseits als extraterrestrische Einflussfaktoren auf das System Erde und dokumentiert andererseits die frühe Kollisionsgeschichte des Sonnensystems, die letztendlich zur Entstehung der Planeten geführt hat.

Wenn Asteroiden oder Kometen mit einem Durchmesser von mehreren 100 Metern und einer Geschwindigkeit von 40.000–250.000 km/h auf die Erde zurasen, werden sie durch die Erdatmosphäre nur geringfügig abgebremst, zerbrechen nicht mehr, und schlagen annähernd mit ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit auf der Oberfläche auf (Bland und Artemieva, 2003). In Bruchteilen einer Sekunde wird die gesamte Bewegungsenergie des Projektils auf das Gestein der Erdoberfläche übertragen und es kommt zur Ausbildung von Stoßwellen. Diese breiten sich mit Überschallgeschwindigkeit aus und erzeugen Drucke, wie sie im Erdinneren herrschen. Die Bildung eines Meteoritenkraters ist in wenigen Sekunden bis Minuten abgeschlossen.

Natur – Experiment – Modell

Um die hochdynamischen Prozesse bei einem derartigen Ereignis verstehen zu können, reichen klassische geowissenschaftliche Arbeitsmethoden nicht mehr aus. Ein Team von Mineralogen, Geologen und Geophysikern am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin hat sich als international operierende Kraterforschungsgruppe etabliert und praktiziert einen Arbeitsansatz, der sich im Wesentlichen in vier verschiedene methodische Ansätze gliedert und der in seiner Synthese ein umfassendes Verständnis der komplexen, kurzzeitdynamischen Prozesse bei einem Hochgeschwindigkeitseinschlag ermöglicht:

- Geländestudien in irdischen Meteoritenkratern,
- Stoßwellen- und Kraterexperimente im Labor,
- Mikroanalytik an deformierten Gesteinen und Mineralen,
- Computersimulation von Einschlagprozessen.

Die Arbeitsgruppe befasst sich seit einigen Jahren primär mit der Identifizierung von Impactstrukturen und der Kraterbildung in porösen Gesteinen, insbesondere Sandsteinen. Bisherige Studien zur Einschlagsdynamik vernachlässigen häufig Porosität und Wassergehalt des

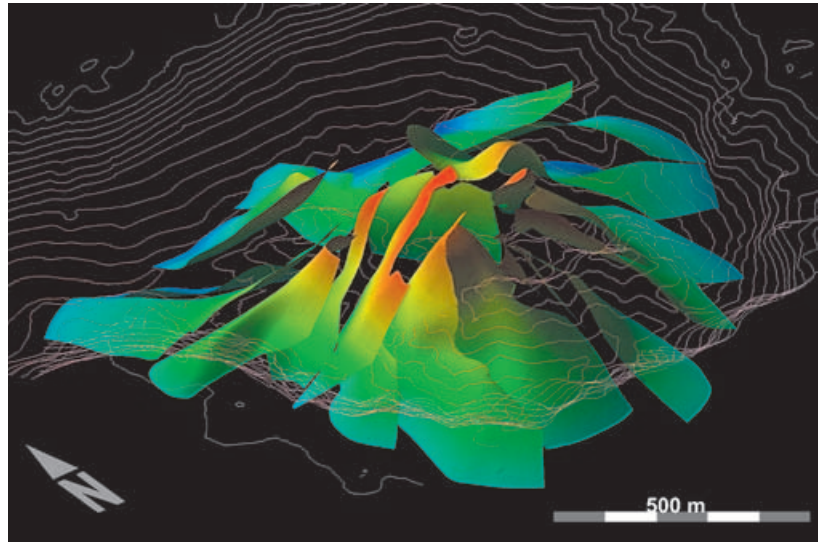


Abb. 1
Luftbildaufnahme des Upheaval Dome Meteoritenkraters auf dem Colorado-Plateau in Utah. Blickrichtung Nordwest, Bildbreite Vordergrund etwa 5 Kilometer.
(Quelle: Impact, Eldorado Hills, CA 95762, photographer: Tom Till, Moab, Utah, USA)

Gesteins. Doch gerade die Gesteine nahe der Erdoberfläche, die bei einem Einschlag als erstes getroffen werden, sind oft porös und klüftig. Dies liegt zum einen an der fehlenden Auflast an der Erdoberfläche, zum anderen lockern Verwitterung und angreifende Erosion den Gesteinsverband auf. Auch auf anderen Planeten oder Satelliten wie dem Erdmond sind poröse Gesteine an der Oberfläche weit verbreitet. Während der sogenannte Mondregolith in Ermangelung von Wasser stets trocken ist, kann der Porenraum der oberflächennahen Sedimentgesteine auf der Erde oder dem Nachbarplaneten Mars mit Wasser oder Wassereis gefüllt sein. Den Studien kommt somit eine planetare Bedeutung zu. Sie liefern einen Beitrag zum Verständnis des wohl fundamentalsten Prozesses in unserem Sonnensystem, der Hochgeschwindigkeits-Kollision fester Körper.

Geländestudie: Upheaval Dome, Utah, USA

Das Verhalten von porösen Sandsteinen wurde zunächst in einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Projekt an einem natürlichen Krater untersucht. Für die Geländestudie wurde nach einem geeigneten Untersuchungsobjekt gefahndet. Von den 175 bislang bekannten Kratern der Erde wurde ein Krater gesucht, der in Sandstein entstanden ist und einen guten Einblick in den Krateruntergrund gewährt. Die Wahl fiel auf den 7 km großen Impactkrater Upheaval Dome, Utah, USA (Abb. 1), der



in flach lagernde Sandstein- und Siltstein-Schichten des Colorado-Plateau eingesenkt ist. Sein heutiges, schroffes Relief wurde durch spätere Erosion und Abtragung geschaffen. Es bietet die einmalige Gelegenheit, die Gesteinsveränderung in verschiedenen Stockwerken des Krateruntergrundes zu erkunden. Dieser Krater zählt zu der Klasse der sogenannten »komplexen« Krater, in deren Zentrum der Kraterboden aufgewölbt ist. In einer Geländekampagne wurde die geologische Struktur zunächst hochauflösend geologisch kartiert. Die geologische Detailkarte stellt die Basis für eine anschließende Rekonstruktion des komplizierten inneren Aufbaus des Kraters dar. Die Anatomie des Kraters wurde in dreidimensionalen Strukturkarten wiedergegeben (Abb. 2). Diese wiederum liefern die Basis für eine Rekonstruktion der Bewegungsabläufe bei der Kraterbildung. Bei der Entstehung der zentralen Aufwölbung bewegte sich das Gestein kraterinwärts auf dessen Mittelpunkt zu. Homogen aufgebaute poröse Sandsteinbänke verdickten sich, nicht poröse Schichtkörper dagegen wurden zunächst verfaltet, zerbrachen in einzelne Schuppen und wurden schließlich im Kraterzentrum dachziegelartig übereinander gestapelt.

Durch den Einschlag verlor das stark zerrüttete Gestein vorübergehend seine Festigkeit. Nach dem Durchlauf der Stoßwelle wurde der Untergrund regelrecht in Vibration versetzt, die zu einer Art akustischer Verflüssigung vor allem in den porösen Sandsteinen führte (Kenkmann, 2003). Anders als dichte Gesteine wurde der Sandstein bereits beim Durchlauf der Stoßwelle so verändert, dass der Porenraum vollständig kollabierte und hierdurch die ansonsten festen Kornkontakte aufgebrochen wurden. Aus dem Sand-

stein wurde auf diese Weise ein loser Sand, der sich im weiteren Verlauf der Kraterbildung wie ein Granulat verhielt. Mithilfe von Simulationen (siehe unten) konnte gezeigt werden, dass die Gesteine beim Kraterkollaps aufgrund ihrer Entfestigung innerhalb von nur wenigen Sekunden um mehr als 200 m nach innen und in die Höhe verfrachtet wurden.

Natürliche Krater bilden das Archiv, um Prozesse der Kraterentstehung abzuleiten. Doch sie zeigen uns leider nur das Endprodukt, den fertigen Krater, der manchmal zudem durch spätere Erosion oder Vegetations- und Bodenbedeckung teilweise unkenntlich gemacht wird. Die komplexen Bewegungen und Verformungen, denen das Gestein in den verschiedenen Phasen der Kraterbildung ausgesetzt ist, lassen sich nur mühsam in natürlichen Kratern rekonstruieren. Auch die physikalischen Randbedingungen zum Zeitpunkt des Einschlages können in der Regel nur grob abgeschätzt werden. So blieb in der Studie des Upheaval Dome Kraters unklar, inwieweit Wasser bei der Kraterbildung eine Rolle gespielt hat. Um diese Defizite auszugleichen, sind Krater-Experimente vorteilhaft, in denen alle Randbedingungen kontrolliert werden können.

Krater-Experimente: Beschleunigung eines Projektils auf 20.000 Stundenkilometer

Krater-Experimente an Festgestein gestalten sich sehr aufwändig, denn man muss die Projektile auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen, um Stoßwellen zu erzeugen. Zu diesem Zwecke kooperieren die Mineralogen vom Berliner Naturkundemuseum seit Jahren mit einem Team von Ingenieuren und Physikern um Prof. Thoma, dem Leiter des Fraunhofer Instituts für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI) in Freiburg.

Abb. 2 Anatomie der zentralen Aufwölbung des Upheaval Dome Kraters. Dargestellt ist die konstruierte komplex verfaltete und mehrfach übereinander gestapelte Oberfläche einer Schichtgrenze. (Quelle: Titelbild des Buches Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 384 by Kenkmann et al., 2005)



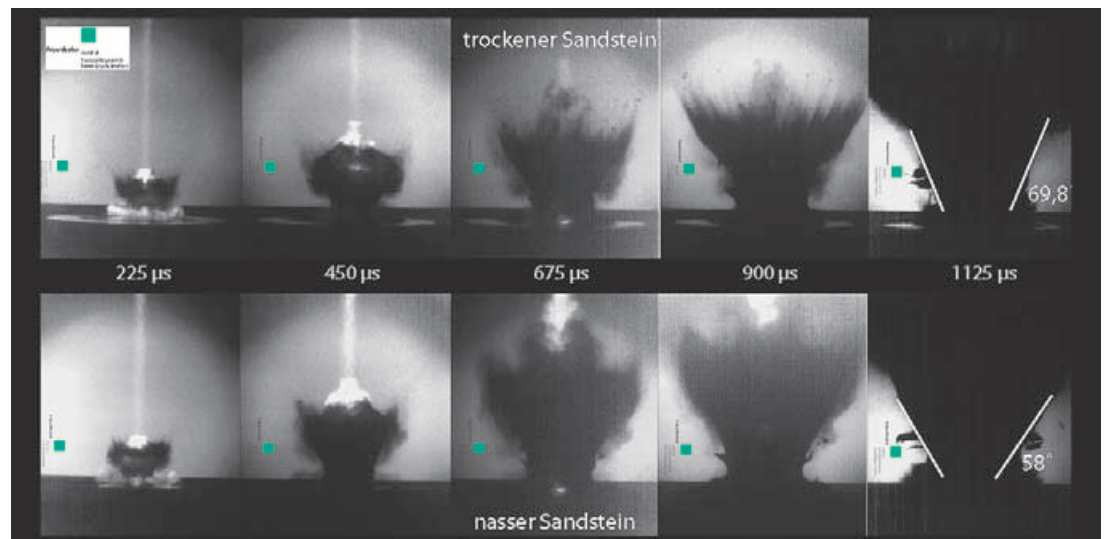
Abb. 3
 In dieser zweistufigen Leichtgas-Beschleuniger wurden die Meteoriten auf 20.000 Stundenkilometer beschleunigt.
 (Quelle: EMI-Freiburg)

Hier wurde eine 40 Meter lange zweistufige Leichtgas-Beschleunigungsanlage entwickelt (Abb. 3), die zu den weltweit leistungsstärksten zählt und in der Lage ist, zentimetergroße Meteorite auf 20.000 km/h zu beschleunigen. Diese Geschwindigkeit kommt der echter Einschlagskatastrophen schon recht nahe. In einer Pilotstudie wurden metergroße Sandsteinblöcke aus einem Steinbruch bei Seeberg, Thüringen, als »Target«-Gesteine ausgewählt. Einer dieser Blöcke wurde für vier Monate in ein Wasserbecken gelegt, so dass sich das Gestein mit Wasser vollsaugen konnte; die anderen Blöcke blieben dagegen trocken. Die physikalischen und petrographischen Eigenschaften wurden vor den

Experimenten genau erfasst. Hierzu zählt unter anderem die Bestimmung der Gesteinsdichte, der Porosität, der Korngröße oder die exakte mineralogische Zusammensetzung und der Wassergehalt. Die tonnenschweren Blöcke wurden anschließend in den Bunker, der sich an die Beschleunigungsanlage anschließt, transportiert. Die Kraterbildung wurde von außen mit Hochgeschwindigkeitskameras in allen Stadien aufgezeichnet (Abb. 4). Spezielle Drucksensoren sind in der Lage, die Stoßwelle und ihre Abschwächung mit zunehmender Eindringtiefe aufzuzeichnen.

Die Auswertung der Pilot-Experimente am Museum für Naturkunde ist ein langwieriges Verfahren. Sie beginnt mit präparatorischen Arbeiten wie der Herstellung von Kraterabgüssen, einer systematischen Beprobung des Krater und dem aufwändigen Durchsägen der metergroßen Blöcke. Für die mikroskopische Analyse mussten zahlreiche 30 µm dünne Gesteinsdünnschliffe angefertigt werden. Die Experimente brachten erstaunliche Ergebnisse zum Vorschein: Kraterform und -größe im trockenen und nassen Sandstein unterscheiden sich in markanter Weise (Abb. 5). Der »nasse« Krater ist trotz höherer Dichte durch die Wasserfüllung 5 cm breiter und insgesamt voluminöser als der »trockene«; dieser dagegen ist tiefer. Verteiltes Porenwasser erhöht offenbar die Effizienz der Kraterbildung. Trockene Gesteinsporen, die erst durch

Abb. 4
 Aufnahmen der Meteoriten-Einschlagsexperimente Die Phase des Materialauswurfs wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Der Auswurfkegel unterscheidet sich in Abhängigkeit des Wassergehalts des Sandsteins.
 (Quelle: EMI-Freiburg)



die Stoßwelle geschlossen werden müssen, führen dagegen zur raschen Dämpfung der Stoßwelle und zu einem Verlust an Energie.

Die experimentell gebildeten Krater sind erstmals groß genug, dass sie auch mit speziell angepassten geophysikalischen Messmethoden, die in modifizierter Form auch zur Untersuchung echter Krater eingesetzt werden, charakterisiert werden können. Eine Extrapolierung der Ergebnisse auf echte Krater wird auf diese Weise erleichtert. Die Pilot-Experimente sind Teil eines umfangreichen interdisziplinären Forschungsprogramms, das derzeit zur Begutachtung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) vorliegt und den Namen *MEMIN* (Multidisciplinary Experimental and Modelling Impact research Network) trägt. An der beantragten Forschergruppe sind sechs Institute unter Federführung der Geowissenschaftler des Museums für Naturkunde beteiligt, die gemeinsam ein umfassendes Prozessverständnis für die Kurzzeitedynamik eines Meteoriteneinschlages unter variablen Randbedingungen erarbeiten wollen.

Mikroanalytik: vom Gestein zum Atom

Wenn Projektil und Target kollidieren wird die kinetische Energie in Wärme und Verformungsarbeit umgesetzt. Es entsteht eine Stoßwelle, die sich sowohl in dem Projektil als auch in dem Targetgestein hemisphärisch ausbreitet (Melosh, 1989). Stoßwellen gelten als »entartete« Kompressions- oder Druckwellen, die mit einer bleibenden Verformung des Gesteins und einer Erwärmung verbunden sind und die bis zur Aufschmelzung und Verdampfung des Gesteins führen kann. Außerdem verursachen sie einen Materialtransport. Es ist die stoßwellen-induzierte Bewegung des Gesteins, die zur Bildung des eigentlichen Kraters führt, der hierdurch ein Vielfaches der Größe des einschlagenden Körpers erreicht. Für jedes Mineral treten charakteristische Veränderungen als Funktion von Stoßwellendruck und Temperatur auf. Diese Veränderungen wurden in jahrzehntelanger Arbeit verschiedener Autoren (z.B. Stöffler und Langenhorst, 1994) hinsichtlich Druck und Temperatur geeicht. Die auf diese Weise kalibrierten Stoßwellenindikatoren der Minerale und Gesteine erlauben nun, die Druck- und Temperaturbedingung in irdischen Meteoritenkratern zu rekon-

Abb. 6

Planare Deformationselemente in einem Quarzkorn aus dem Upheaval Dome Krater deuten auf Stoßwellendrucke von 13–20 Gigapascal hin. Die ehemals glasigen Lamellen sind durch hohe Versetzungsdichten markiert.

Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme. Bildbreite etwa 10 Mikrometer. (Quelle: Buchner und Kenkmann (2007), submitted to *Geology*)

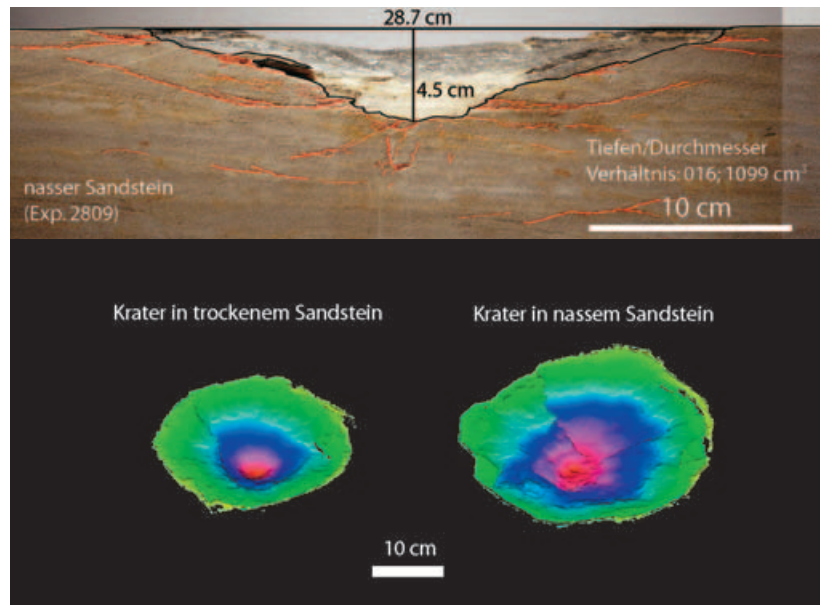


Abb. 5

Oben: Querschnitt durch einen experimentell gebildeten Krater. Rot markiert sind Bruchzonen.

Unten: Digitale Höhenmodelle der experimentell erzeugten Krater in trockenem und nassem Sandstein (Quelle: Kenkmann)

struieren, obwohl die Ereignisse Millionen von Jahren zurückliegen.

Im Upheaval Dome Krater konnten erstmals sogenannte planare Deformationslamellen, kurz PDF-Lamellen durch Untersuchungen mit dem Transmissions-Elektronenmikroskop am Museum für Naturkunde nachgewiesen werden (Abb. 6). In diesen Lamellen ist die atomare Struktur der Minerale in bestimmten kristallographischen Richtungen zerstört und in eine amorphe Glasstruktur überführt worden. Die amorphen Bereiche konnten zwar später im Falle des Upheaval Dome Kraters wieder entglasen, doch die Scharung von Kristallgitterdefekten, sogenannten Versetzungen, lässt auf ihre ursprüngliche Bildung schließen. Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten außerdem, dass die porösen Sandsteine durch Aufbrechen der Kornkontakte in einen fließfähigen Festkörperzustand (kataklastisches Fließen) geraten konnten. Ähnliches

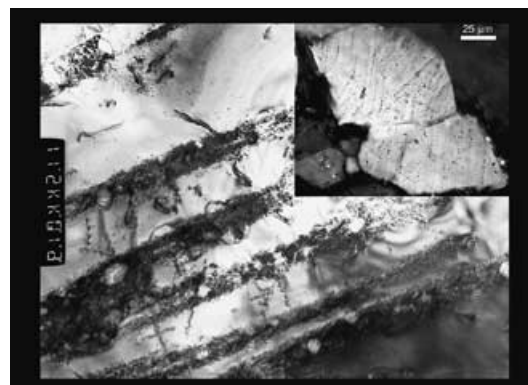
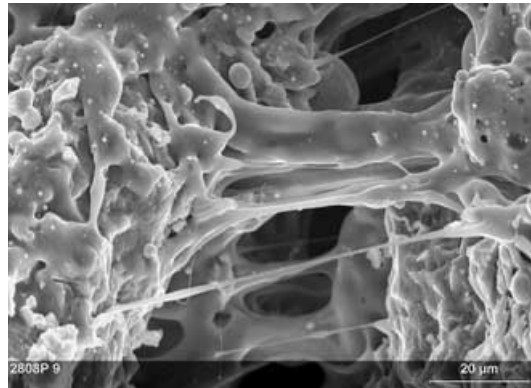




Abb. 7
Aufschmelzung des Stahlprojektils in den Kraterexperimenten durch Stoßwelleneinwirkung, Aufnahme mittels Rasterelektronenmikroskopie.
(Quelle: Kenkmann, unpubliziert)



wurde auch bei den experimentell erzeugten Kratern gefunden. Unerwartet heftig war die Stoßwelleneinwirkung auf die Eisenprojekteile, die teilweise aufgeschmolzen und verdampft sind (Abb. 7).

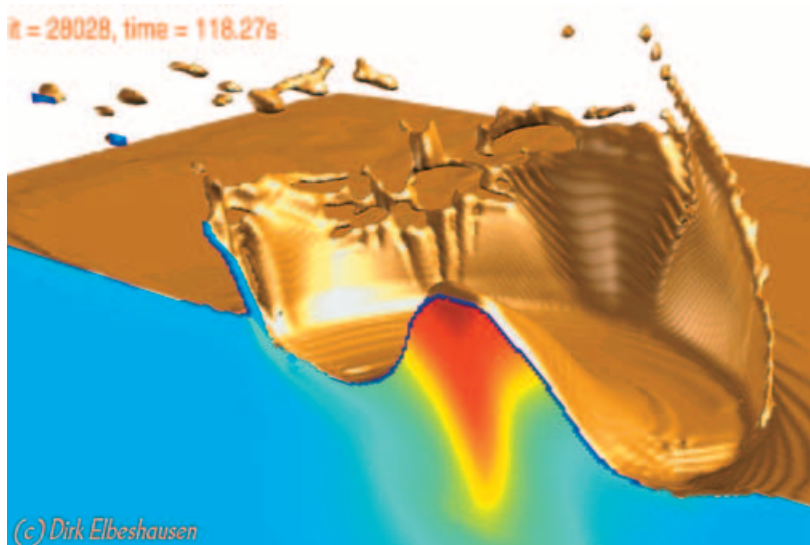


Abb. 8
Numerische Simulation der Bildung eines Zentralberges in einem komplexen Impaktkrater (Upheaval Dome).
(Quelle: Elbeshausen, Museum für Naturkunde)

Computersimulation: Virtuelle Experimente von Impaktprozessen

Der Einsatz von Computermodellen ist bei der Erforschung von Impaktprozessen ein unverzichtbares Werkzeug. Solche sogenannten Hydrocodes können auf verschiedenen Skalen der Impaktforschung verwendet werden. Dazu gehört die Simulation von Stoßwelleneffekten in einzelnen Mineralen, die Kompaktion des Porenraums sowie die Deformation und Fragmentierung von Gestein in großskaligen Gesteinseinheiten. Numerische Modelle erlauben eine vollständige quantitative Analyse, die so weder in der Natur noch im Experiment möglich ist.

In der Arbeitsgruppe Impaktforschung werden die verwendeten Hydrocodes im Rahmen einer DFG-geförder-

ten Nachwuchsgruppe selbstständig entwickelt. Es gibt weltweit nur wenige Forschungseinrichtungen, die sich mit der Entwicklung solcher komplexen Modelle befassen. Basierend auf physikalischen Gesetzen der Mechanik und Thermodynamik werden mit Hilfe mathematischer, numerischer Verfahren Algorithmen entwickelt, die es letztendlich erlauben, die dynamischen Prozesse bei einem Einschlagereignis stark verlangsamt zu verfolgen. Eine exakte, quantitative Bestimmung verschiedener Parameter, wie Druck und Temperatur, ist dadurch zu jedem beliebigen Punkt in Raum und Zeit möglich. Experimentell kann eine vergleichbare Vielfalt an Daten nicht annähernd gemessen werden.

Die Komplexität und Heterogenität von natürlichen Materialien, insbesondere von Sandsteinen, können im Modell jedoch nur bedingt simuliert werden. Hierzu werden Materialmodelle entwickelt, die das Verhalten unter den extremen Druck und Temperaturbedingungen, denen das Gestein ausgesetzt wird, beschreiben (Wünnemann et al., 2006). Sogenannte Zustandsgleichungen ermöglichen eine Berechnung des thermodynamischen Zustandes in Abhängigkeit von Druck, Dichte, Temperatur und Energie. Das spröde Bruch- bzw. duktile Fließverhalten von Gestein wird durch verschiedene Materialmodelle beschrieben, wobei es hierbei je nach Gesteinsart und vorangegangener Deformationsgeschichte zu einer sehr unterschiedlichen Reaktion des Gesteins auf elasto-plastische Deformation kommen kann. Die durchgeführten Experimente an Sandsteinblöcken dienen unter anderem dazu, die Materialmodelle und Zustandsgleichungen für Sandstein zu entwickeln und die Modelle auf ihre Richtigkeit hin zu überprüfen.

Die Bildung großer Einschlagstrukturen (Abb. 8), wie des Upheaval Dome-Kraters, kann nur mit Hilfe von Computersimulationen nachvollzogen werden, da ihre Entstehung, insbesondere die Bildung der zentralen Aufwölbung, wesentlich von der Schwerkraft beeinflusst wird. Zwar ließe sich die Größe des Kraters in einem Experiment von ~7 km auf beispielsweise 7 cm herunterskalieren, gleichzeitig müsste dann aber auch proportional die Schwerkraft um den gleichen Faktor, also um das 100.000-fache erhöht werden, was sich experimentell nicht realisieren lässt.

In der Synthese liegt die Kraft

Jeder der vorgestellten methodischen Ansätze besitzt ihre Vor- und Nachteile bei der Analyse von hochdynamischen Einschlagereignissen. Die irdischen Krater liefern die Realität, die verstanden werden will. Doch Aufschlussverhältnisse und Komplexität der Struktu-

ren setzen Grenzen bei der Ableitung der hochdynamischen Prozesse und ihrer Randbedingungen. In experimentellen Studien können hingegen Randbedingungen exakt definiert werden und der Einschlag mit geeigneter Messtechnik aufgezeichnet werden. Doch Schwierigkeiten bereitet hier die Limitierung auf kleine Krater, die Extrapolation hin zu realen Kratergrößen sowie die hohen Kosten. Numerische Modellierungen sind kostengünstiger und in der Lage, Krater beliebiger Größe zu simulieren. Doch die Simulationen sind immer nur so gut wie die in Experimenten ermittelten Materialmodelle, auf denen die Simulationen beruhen. In der Kombination der Verfahren unter Einbeziehung mikroanalytischer Verfahren liegt der einzig beschreibbare Weg.

Literatur

Bland, P.A. / Artemieva, N. A. (2003): Efficient disruption of small asteroids by Earth's atmosphere. *Nature* 424, 288–291.

Elbeshausen D. / Wünnemann K. / Collins G. S. (2007): Three-dimensional numerical modeling of oblique impact processes: Scaling of cratering efficiency. 38th LPSC, abstract 1952.

Buchner, E. / Kenkmann, Th. (2007): Upheaval Dome: impact approved, submitted to *Geology*.

Kenkmann, T. / Hörz, F. / Deutsch, A. (eds.) (2005): Large Meteorite Impacts III. Geological Society of America Special Paper 384: 476 pages, Boulder, CO, USA

Kenkmann, T. (2003): Dike formation, cataclastic flow, and rock fluidization during impact cratering: an example from the Upheaval Dome structure, Utah. *Earth and Planetary Science Letters* 214, 43–58.

Melosh, H. J. (1989): Impact cratering. A geologic process. *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 11, 245 pages.

Stöffler, D. / Langenhorst, F. (1994): Shock metamorphism of quartz in nature and experiment. *Basic observation and theory. Meteoritics*, 29: 155–181.

Wünnemann, K. / Collins G. S. / Melosh H. J. (2006): A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets, *Icarus* 180, 514–527.



PD Dr. Thomas Kenkmann

Jg. 1966. Studium der Geologie an der Universität Köln, 1994 Diplom. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ). 1997 Promotion an der FU-Berlin, anschließend Postdoc am GFZ bis 1998. Von 1998–2001 Hochschulassistent der Mineralogie, seit 2001 Kurator für Petrographie und Lagerstättenkunde am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität. Leiter der Labore für Raman-Spektroskopie und Röntgendiffraktometrie sowie Leiter des Zentrums für Rieskrater- und Impaktforschung in Nördlingen (ZERIN), einer Außenstelle des Museums für Naturkunde. 2003 Habilitation und Privatdozentur an der FU-Berlin für das Fach Geologie. Zahlreiche Geländeprojekte zur Impaktforschung in Europa, USA und Australien und langjährige Kooperation mit dem EMI-Freiburg im Bereich experimenteller und numerischer Analyse von Meteoritenkratern. Sprecher des MEMIN-Teams.

Kontakt

Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin
 Invalidenstr. 43
 D-10115 Berlin
 Tel.: +49 30 2093-8878
 Fax: +49 30 2093-8565
 E-Mail:
 Thomas.kenkmann@
 museum.hu-berlin.de



Dr. Kai Wünnemann

Jg. 1969. Studium der Geophysik an der Universität Münster, 1998 Diplom. 1998–2002 Stipendium im Graduiertenkolleg am Institut für Planetologie, Münster, später wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik, Münster. Promotion 2001. DFG-Stipendium für Forschungsaufenthalte am Imperial College London, UK (2003–2004) und Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, USA (2004–2005), anschließend dort wissenschaftlicher Mitarbeiter bis 2006. Seit 2006 Leiter einer DFG-geförderten Nachwuchsgruppe am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin.

Kontakt

Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin
 Invalidenstr. 43
 D-10115 Berlin
 Tel.: +49 30 2093-8857
 Fax: +49 30 2093-8565
 E-Mail:
 Kai.wuennemann@
 museum.hu-berlin.de