

Ultraschall-Tomographie von Rissstrukturen bei Meteoriteneinschlägen

Dorothee MOSER*, Christian GROSSE*

*Technische Universität München, Lehrstuhl Zerstörungsfreie Prüfung
(Baumbachstraße 7, 81245 München; moser@cbm.bv.tum.de, grosse@tum.de)

Kurzfassung. Das DFG Forschungsprojekt MEMIN beschäftigt sich mit der Untersuchung von Körper-Körper-Kollisionsprozessen, wie sie beispielsweise bei Meteoriteneinschlägen stattfinden. Während dieser Prozesse kommt es zu Strukturänderungen der beteiligten Körper (Projektil und Target). Dieser Bericht konzentriert sich auf die Prozesse im Target, bei denen zerstörungsfreie Prüfmethoden verwendet werden, um die innere Struktur zu untersuchen. Primär erfolgen die Untersuchungen mit Hilfe elastischer Wellen. Kommt es zu Rissbildungen, äußern sich diese Ereignisse durch akustische Signale, die mit entsprechenden Sensoren registriert werden können. Über eine Schallemissionsanalyse können die Signale lokalisiert werden. Schädigungen lassen sich zudem durch tomographische Verfahren visualisieren, die vor und nach dem Impakt angewendet werden und auf Strukturänderungen hinweisen. Erste Ergebnisse zeigen die Genauigkeit der Lokalisierung einzelnen Schallemissionsereignisse (Impakt und Folgeevents) und in den tomografischen Abbildungen Risse nahe der Impaktkrater.

1 Einführung

Die DFG-Forschergruppe 887 MEMIN (Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Crater Research Network) beschäftigt sich mit der Durchführung und Analyse von experimentellen Impaktprozessen bei Körper-Körper-Kollisionen mit geologischen Materialien. Insgesamt untersuchen Wissenschaftler aus den Bereichen der Geologie, Mineralogie, Geophysik, Numerik und der Zerstörungsfreien Prüfung in sieben Projekten die Prozesse, die durch solche Impakte hervorgerufen werden. Impaktprozesse, wie sie beispielsweise durch Meteoriten herbeigeführt werden, zählen zu den fundamentalsten Ereignissen in der Erdgeschichte. Aktuell sind mehr als 180 Impaktkrater auf der Erdoberfläche bekannt. Bei einem solchen Impakt entstehen durch hohe Geschwindigkeiten und große Massen sehr hohe Energien, die zu extremen Prozessen führen. Mehr als 50 % der bekannten Krater auf der Erde haben einen Durchmesser von über 140 km [1], aber nicht nur die Erdoberfläche, auch der Untergrund weißt Schädigungen auf. Für die Laborexperimente wurden geologische Materialien ausgewählt, die den Bedingungen bei einem Meteoritenimpakt ähneln. Dies dient dem Vergleich zu historischen und bevorstehenden Ereignissen in einer weiteren Phasen des Projektes.

Dieser Bericht zeigt die Arbeit des Einzelprojektes „Evaluation of hypervelocity impact-induced damage of rocks using elastic waves“. Für die Lokalisierung einzelner Risse werden Schallemissionsanalysen und tomographische Verfahren durchgeführt.

2 Kraterexperimente

Die Kraterexperimente stellen die Nachahmung eines Meteoritenimpaktes dar. Für einen möglichst naturgetreuen Vergleich werden geologische Materialien verwendet, die auch bei einem Impakt auf der Erdoberfläche involviert sind. Ein Sandsteintarget dient als Erdoberfläche und ein Projektil aus Meteoritengestein stellt den Impaktkörper dar. Die hohen Geschwindigkeiten, die ein Meteorit erreichen kann, werden mit einer Leichtgaskanone erzielt. Alle Parameter, wie Größe, Masse und Geschwindigkeit, sind für die Laborexperimente herunter skaliert und an bekannten Werten bei Meteoriteneinschlägen orientiert.

2.1 Allgemeiner Aufbau der Experimente

Die Kollisionsexperimente werden an zwei verschiedenen Leichtgaskanonen am Ernst-March-Institut in Freiburg sowie in Efringen-Kirchen durchgeführt. Es handelt sich um eine „space“ Leichtgaskanone (SLGG: space light gas gun) und eine XL-Leichtgaskanone (XLLGG: extra large light gas gun). Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau und die Funktionsweise einer Leichtgaskanone. In Abbildung 2 ist die XLLGG abgebildet.

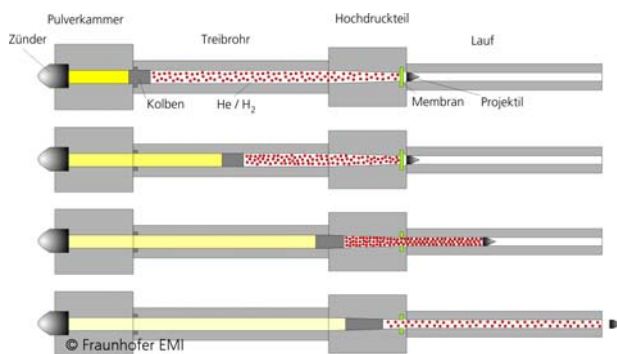


Abbildung 1 (links): Schematische Darstellung einer zweistufigen Leichtgaskanone, wie sie bei den MEMIN-Experimenten verwendet wird. Durch die Zündung eines Beschleunigungspulvers wird ein Kolben beschleunigt. Dieser drückt ein Gasgemisch, welches sich in einem abgeschlossenen Raum (Treibrohr) befindet, zusammen. Wird der Überdruck zu groß, platzt eine Membran am anderen Ende des Treibrohrs und das Projektil, welches sich vor der Membran befindet, wird in Richtung des Targets beschleunigt [2].

Abbildung 2 (rechts): Zeigt die XLLGG-Kanone (extra large light gas gun) mit einer Länge von etwa 35 m [2].

In beiden Versuchseinrichtungen werden Projektile (Kugeln) aus Meteoritengestein und/oder Stahl von 0,25 bis 1,0 cm Durchmesser mit Beschleunigungspulver auf bis zu 6000 m/s beschleunigt. Als Target dient Seeberger Sandstein mit einer Kantenlänge von 20 bis 80 cm. Detailliertere Informationen zu den Versuchsanlagen und dem Versuchsaufbau sind zu finden bei Schäfer et al. [2] und Poelchau et al. [3].

3 Zerstörungsfreie Prüfung während der Experimente

Beim Auftreffen des Projektils auf die Targetoberfläche kommt es zur Freisetzung und Übertragung der Energie. Ein Teil der Energie wird in die Ausbreitung von Raumwellen umgewandelt, die durch das Targetgestein laufen. Als Folge kommt es im Innern des Targets zu Schädigungen (Rissen), die sich über die von ihnen abgestrahlten akustischen Signale (Schallemissionen [4]) lokalisieren lassen. Die entstehenden Risse sollen nach Abschluss des Impaktexperimentes mit zerstörungsfreien Prüfmethoden detektiert werden,

um die wertvollen Proben nicht weiter (beispielsweise durch Aufsägen) zu beschädigen. Sie müssen für weitere Analysen konserviert werden.

3.1 Schallemissionsanalyse

Um die Lokalisierung der entstehenden Risse vornehmen zu können, werden Sensoren an allen Seiten auf der Oberfläche des Targets befestigt, dadurch wird eine gute Herdüberdeckung sichergestellt (Abbildung 3).

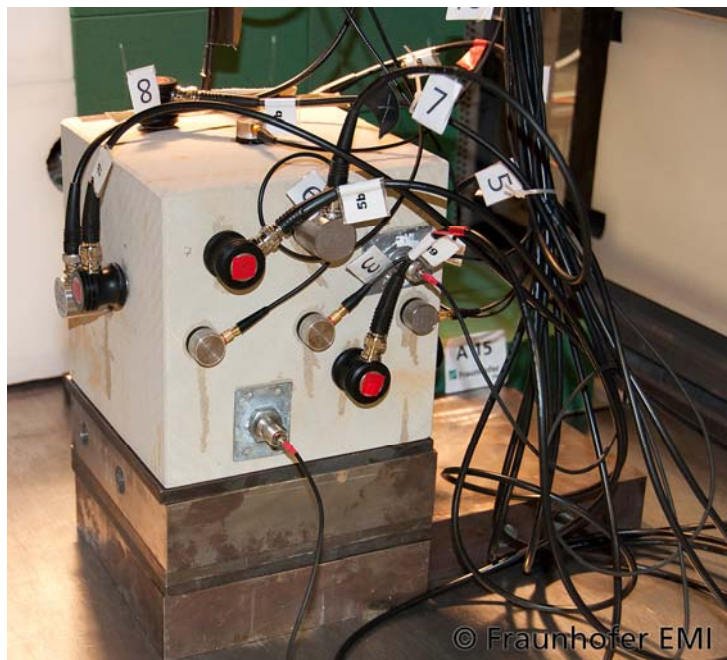


Abbildung 3: Target mit 20 cm Kantenlänge und an den Oberflächen befestigten Sensoren.

Während der Impaktexperimente wird das Target mit den Sensoren quasi dauerüberwacht. Das bedeutet, dass der Impakt, sowie dem Impakt folgende Events durch Rissbildungen aufgezeichnet und für die Lokalisierung herangezogen werden können. Die erfolgreiche Aufzeichnung dieser Daten gibt erste Auskünfte über die Menge der Risse im Innern des beschossenen Targets. Aufgrund des großen Amplitudenunterschiedes zwischen dem Signal des Impaktes und dem der Rissbildungen muss mit einer hohen Dynamik aufgezeichnet werden, was besonders schwierig ist.

3.2 Ergebnisse der Schallemissionsanalyse

Erste Ergebnisse zeigen die Auswertungen mit Hilfe der Schallemissionsanalyse des ersten aufgezeichneten Signals, dem Impakt des Projektils. Bei diesem Ereignis ist der Ort, an dem das Projektil auf der Oberfläche einschlägt, visuell sichtbar (Abbildung 4) und somit sind die Quellkoordinaten der dazugehörigen Schallemission hinreichend bekannt. Für den Vergleich mit dem aus der Schallemissionsanalyse errechneten Ort (Epizentrum) wurde die tiefste Stelle am Kratermittelpunkt als Ort des Impaktes vermessen. Die z-Koordinate wird zu Null angenommen, da die Seitenfläche, auf der der Impakt stattfindet, als Erdoberfläche ($z = 0$) definiert ist. Abbildung 4 zeigt einen Impaktkrater an einem Target mit 20 cm Kantenlänge. Hier liegt der Kratermittelpunkt bei $x = 10,9$ cm und $y = 9,6$ cm, für die Tiefe wird $z = 0$ cm angenommen.

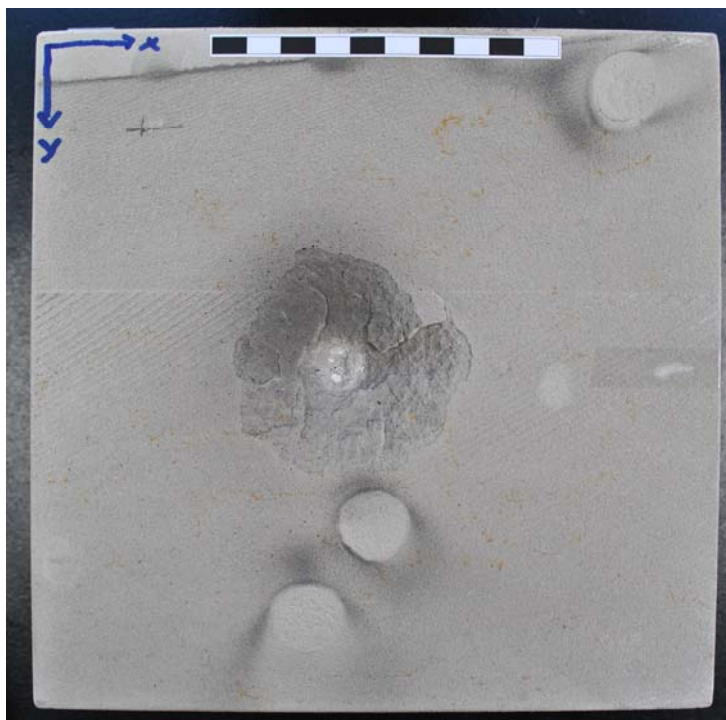


Abbildung 4: Impaktkrater nach Impact, erzeugt an der SLGG-Anlage. Das Target hat eine Kantenlänge von 20 cm, der Krater einen Durchmesser von ca. 6 cm.

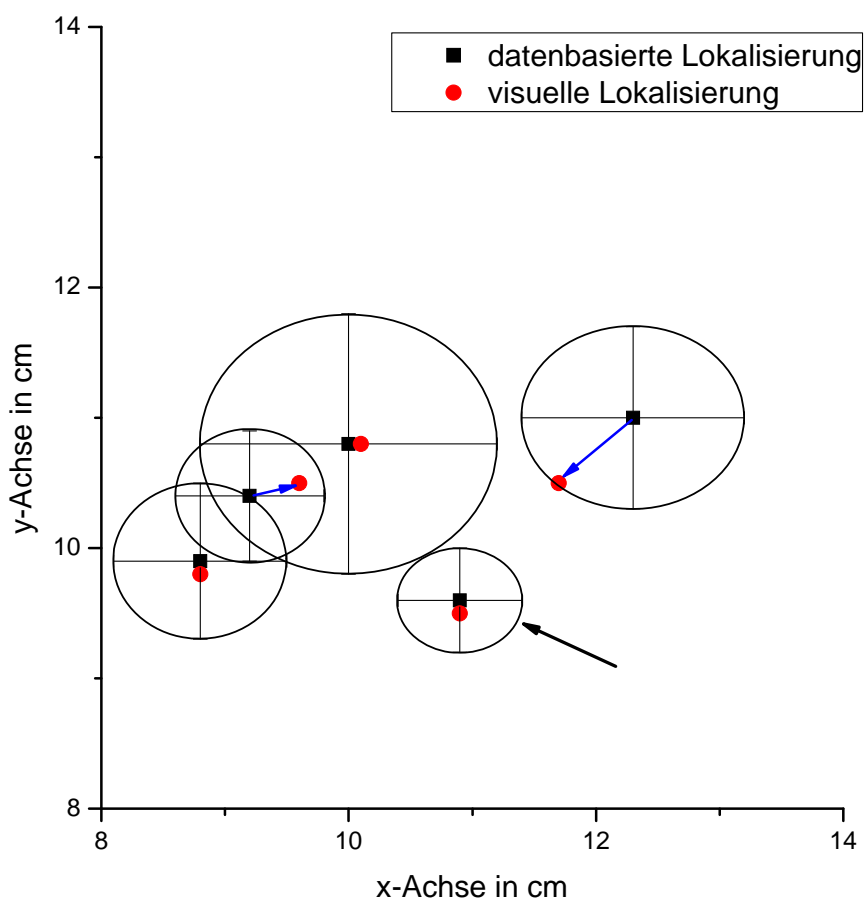


Abbildung 5: Lokalisierung der Impaktorte mit Fehlerellipsen und Residuen (blaue Pfeile) von insgesamt fünf verschiedenen Impactexperimenten in der x-y-Ebene. Dargestellt ist hier nur ein Ausschnitt um die Kratermittelpunkte (8-14 cm in x- und y-Richtung). Die Lokalisierung des Impaktkraters aus Abbildung 4 ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet.

In Abbildung 5 werden die visuell bestimmten Impaktorte (rote Punkte) mit der Lokalisierung aufgrund von Schallemissionsdaten (schwarze Vierecke) verglichen. Die Ellipse zeigt den berechneten Fehler für die Lokalisierung der Schallemissionsdaten. Drei Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, zwei der Lokalisierungen liegen in ihrer Abweichung noch im Fehlerbereich.

Die Lokalisation für die z-Ebene ist in Abbildung 6 zu sehen. Die visuell bestimmten Impaktorte sind mit wieder roten Punkten abgebildet und die auf Daten basierenden Lokalisationen mit schwarzen Vierecken. Die blauen Pfeile stellen die Residuen in der x-z-Ebene dar. Hierbei muss beachtet werden, dass die visuell bestimmte Koordinate für z, der tiefste Punkt des Kraters darstellt und somit nicht an der Oberfläche vermessen worden ist. Für die bessere Orientierung ist eine rot gestrichelte Linie für die Targetoberfläche eingetragen. Die positive z-Achse zeigt ins Innere des Targets.

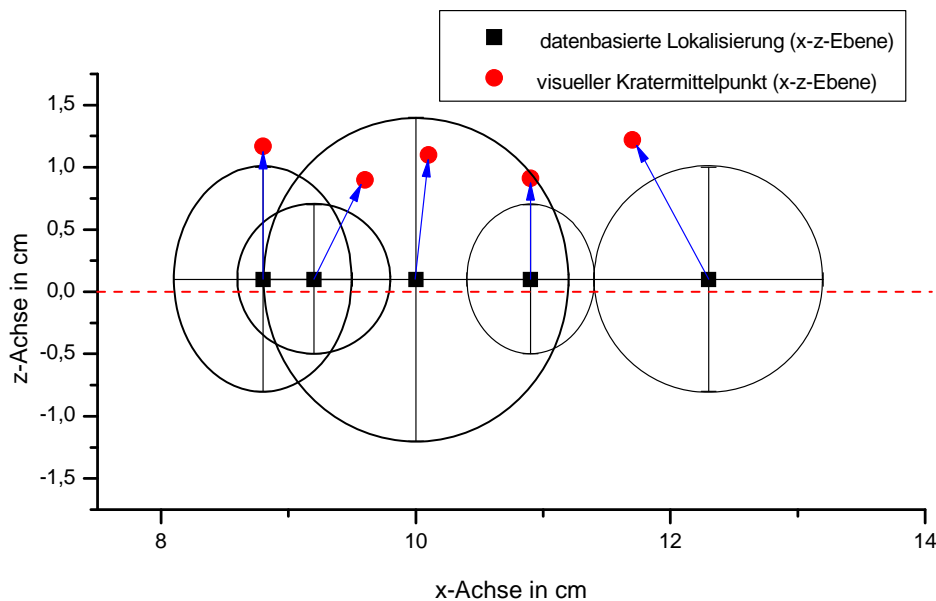


Abbildung 6: Lokalisierung der Impaktorte in x-z-Ebene. Die rot-gestrichelte Linie markiert die Impaktoberfläche. Die positiven z-Werte liegen im Sandsteintarget. Die negativen z-Werte liegen im freien Raum.

Schallemissionen mit deutlich geringerer Amplitude folgen diesem Impact in einem Zeitintervall von wenigen Sekunden. Sie können Aufschluss über Rissentstehungen innerhalb des Targets geben.

4 Zerstörungsfreie Prüfung nach den Experimenten

Tomographische Verfahren werden für eine hochauflösende 3D-Analysen der Rissstrukturen vor und nach den Experimenten durchgeführt. Abhängig von Größe und Dichte des Targets geben die Tomographiebilder einen Einblick in die Schädigungszone unmittelbar unter dem Kratergrund. Die Betrachtung der Targets mittels Tomographie soll letztlich die Zerstörung des Targets durch Aufsägen verhindern.

4.1 Ultraschall-Tomographie

Die hier verwendete Technik basiert auf der Messung von Ultraschallwellen. Mögliche Parameter für eine qualifizierte Aussage sind die Wellengeschwindigkeiten durch das Target (durchschnittlich etwa 2900 m/s in dem verwendeten Sandstein), die Analyse über die Amplituden der Wellen oder ein Frequenzspektrum der Wellenform und/oder Phase.

Für die Ultraschall-Tomographie können verschiedene Wellentypen genutzt werden ([5]und[6]). Die hier verwendeten Sensoren sind speziell auf Scherwellen ausgerichtet, sodass diese für die weiteren Bearbeitungen genutzt werden.

Die Targets sollen mittels Transmission von Ultraschall auf Risse innerhalb des Targets untersucht werden und mit den Ergebnissen der Schallemissionsanalyse verglichen und erweitert werden. Hierzu dienen zwei Arrays, eins mit 24 Gebersensoren und das andere mit 24 Empfängersensoren (Abbildung 8). Es handelt sich um Punktkontakt-Prüfköpfe. Die Prüfköpfe werden manuell an der Oberfläche des Targets versetzt.

Um eine dreidimensionale Überdeckung zu erreichen werden die Sensoren anhand eines Rasters mit 1 cm Abstand angekoppelt und von allen Seiten gleichmäßig betrachtet. Für eine genauere Auflösung und zur Verringerung der Fehlergröße werden die Messungen nicht nur in den gegenüberliegenden Ebenen durchgeführt, sondern jeder Punkt in dem Raster wird von jedem Punkt aus gemessen. So erhält man pro Rasterpunkt statt nur einer Information (vom gegenüberliegenden Punkt) insgesamt 2166 Informationen vom gesamten Target. Insgesamt werden 4.691.556 Messungen eine Aussage über die innere Struktur des Targets geben.

Ziel dieser Messung ist nicht das genaue Detektieren und die exakte geometrisch Darstellung der Risse, sondern die Charakterisierung der Schädigungszone. Es kann somit eine Aussage über den Grad und die Ausbreitung der Schädigung gemacht werden. Für eine präzisere Darstellung ist es notwendig das Raster kleiner zu wählen. Demzufolge steigt die Anzahl der Messungen, welche bei der hier gezeigten Methode manuell getätigt wird.

Neben der Ultraschall-Tomographie können auch andere Quellen, Röntgenstrahlung (siehe Abschnitt 2.3.2) und Neutronen, für tomographische Messungen genutzt werden.

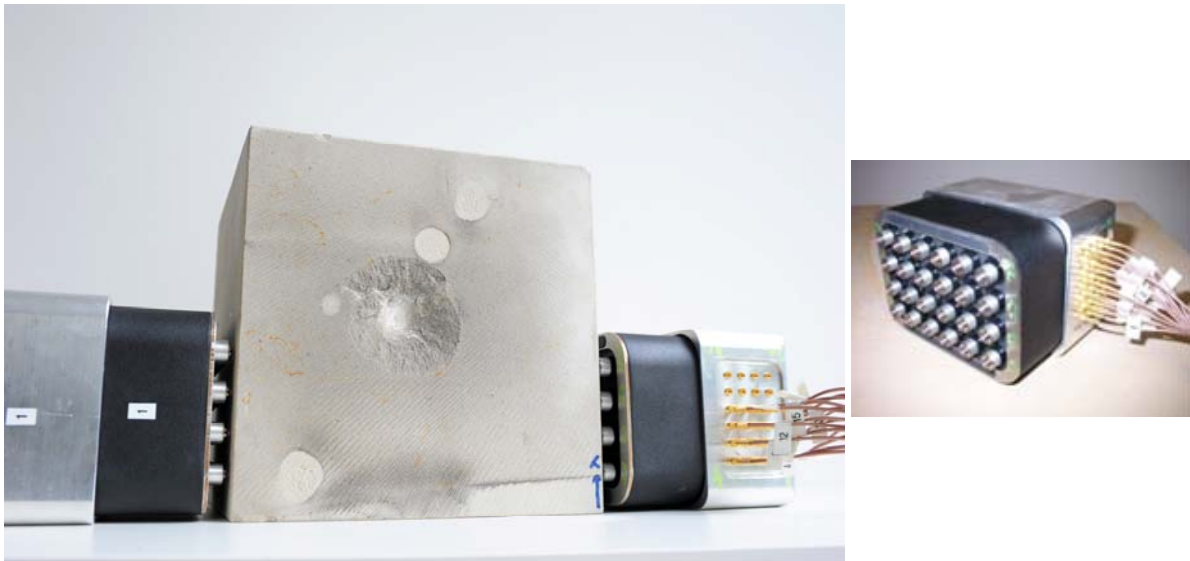


Abbildung 8: Prinzip der Ultraschall-Tomographie Messung an einem beschossenen Sandsteintarget (links). Es gibt zwei Sensorarrays (siehe Bild rechts), eines dient als Signalgeber und eines als Signalempfänger. Beide Arrays werden an das Target angekoppelt, durch mehrmaliges Versetzen (die Vermessung wird in einem Raster von 1 cm durchgeführt) der Sensoren wird eine dreidimensionale Überdeckung geschaffen.

4.2 Radiographische Computer-Tomographie

In Zusammenarbeit mit dem WIWeB (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe) in Erding wurde eine μ -Computer-Tomographie an einem Target durchgeführt. Bei einer Kantenlänge von 20 cm des Targets (Diagonale 28,284 cm) und einer Messung mit 2000 Bildern ergibt sich eine Auflösung von 0,014 cm. Abbildung 7 a und 7b zeigen zwei von den insgesamt 2000 Bildern. Die Bilder weisen zwei unterschiedliche Ebenen von dem gleichen Target auf. Abbildung 7 a wurde näher am

Kraterrad aufgenommen, Abbildung 7 b zeigt die unmittelbare Umgebung am Kratermittelpunkt. In beiden Abbildungen sind nahe des Kratergrundes Risse erkennbar und teilweise mit einem weißen Pfeil markiert.

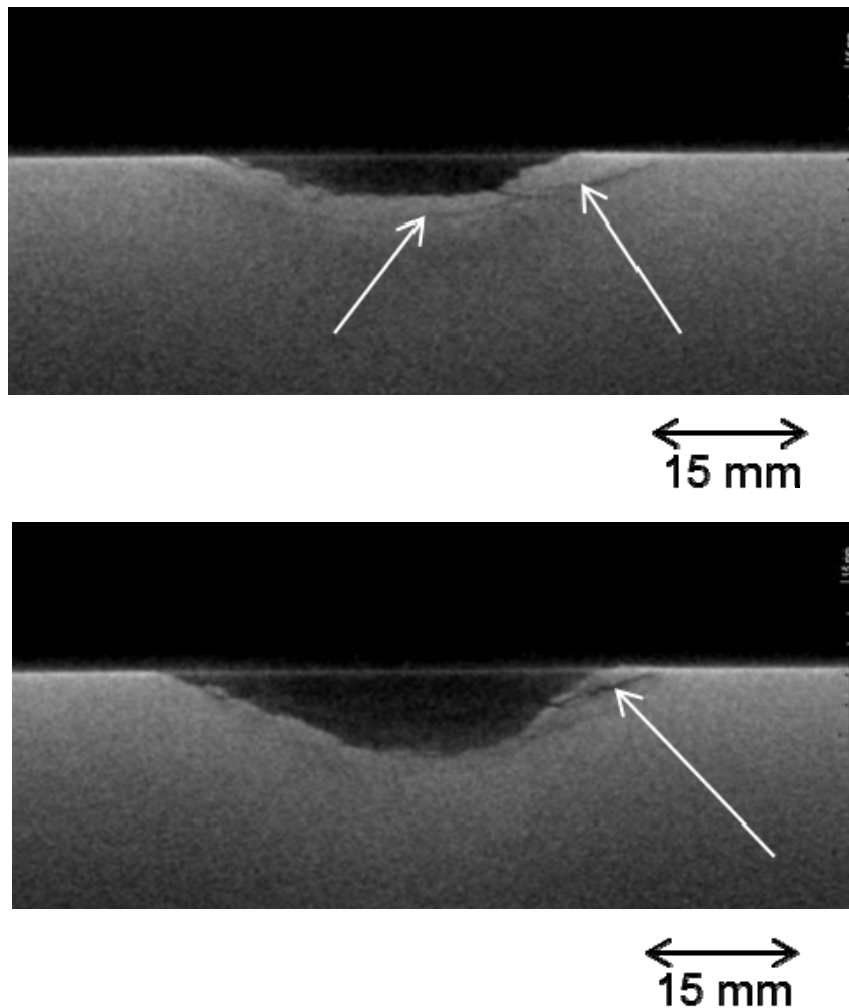


Abbildung 7 a (oben) und **b** (unten): Zwei μ -Computer-Tomographie Abbildungen eines Impaktkraters in verschiedenen Schnittebenen, angefertigt am WIWeB in Erding. Die weißen Pfeile zeigen auf deutlich erkennbare Risse.

5 Ausblick

Weitere Experimente sind in diesem laufenden Projekt geplant. Die hier gezeigten ersten Ergebnisse basieren auf Daten von trockenen Sandsteintargets. In einer weiteren Messkampagne werden die Targets wassergesättigt. Um die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse zu verbessern wird ein Teil der Sensoren in Bohrlöchern näher am Impaktort platziert. Dadurch erhält man stärkere Signale aus dem Innern des Targets.

Um eine bessere Auflösung bei der μ -Computer-Tomographie zu erhalten, wird das Target um den Krater herum verkleinert und auf eine Kantenlänge von 10 cm beschnitten. Die Auflösung der Messung liegt dann bei 0,007 cm (zuvor 0,014 cm).

Alle Ergebnisse, die mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfung ermittelt werden, sollen mit numerischen Rechnungen (diese werden in einem weiteren Teilprojekt am Museum für Naturkunde in Berlin durchgeführt) verglichen werden und gleichzeitig helfen, diese zu verbessern. Außerdem werden von Projektpartner die Targets aufgesägt und können dann für einen visuellen Vergleich herangezogen werden.

Weitere Verfahren, die evtl. Auskunft über Schädigungen im Target geben werden, sind die Schwingungsanalyse (Messung der elastischen Moduln) und die Ultraschall-Phasen-Spektroskopie.

Danksagung

Die Autoren danken den Kollegen der MEMIN-Forschergruppe und insbesondere dem Fraunhofer-Institut für Kurzzeiddynamik (EMI) für die Durchführung der Hochgeschwindigkeitsexperimente.

Weiterhin gilt Dank dem WIWeB (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe) und insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Heinrich Dinnebier, für die Kooperation hinsichtlich der radiographische Computer-Tomographie-Messungen.

Gleichfalls danken wir Herrn Dr.-Ing Rainer Stöbel (EADS Innovation Works) für vergleichende radiographische Computer-Tomographie-Messungen.

Die Modifizierung des Scherwellenarrays für die Ultraschall-Tomographie hinsichtlich der Projektanforderungen erfolgte durch Herrn Gerhard Bahr vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart..

Unseren Kollegen am Centrum Baustoffe und Materialprüfung in München danken wir für die Unterstützung ebenso wie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung unter Zeichen GR 1664/6-1.

Referenzen

- [1] Melosh, H.J. *Impact Cratering A Geologic Process*. Oxford : CLARENDON PRESS, 1989. S. Preface. Bd. Oxford Monographs on Geology and Geophysics No.11. ISBN: 0-19-504284-0.
- [2] Schäfer, F., Thoma, K., Behner, T., Kenkmann, T., Wünnemann, K. and MEMIN-Team. *Impact Tests On Dry And Wet Sandstone.*, Proceedings 1st Int. Conf. on Impact Cratering in the Solar System (2006), pp.6.
- [3] Kenkmann, T., Wünneman, K., Deutsch, A., Poelchau, M.H., Schäfer, F., and Thoma, K. *Impact Cratering In Sandstone: The MEMIN Pilot study on the effort of pore water.*, Meteoritics & Planetary Science (2011), 46: 890-902. Doi:10.1111/j.1945-5100.2011.01200.x .
- [4] Grosse, C.U., Ohtsu, M. (Eds.): *Acoustic Emission Testing in Engineering - Basics and Applications*. Berlin: Springer Publ. (2008), ISBN: 978-3-540-69895-1, 404 p.
- [5] Bucur, V. Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. [Hrsg.] Science Direct. *Ultrasonics*. Ultrasonics 43 (2005), online 2004, S. 237-239.
- [6] Dessa, J.-X., Pascal, G. Combined travelttime and frequency-domain seismic waveform inversion: a case study on multi-offset ultrasonic data. [Hrsg.] *Geophys. J. Int.* 154 (2003), S. 117-133.