

Schallemissionsanalyse zur Erforschung von Impaktprozessen 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. Die DFG-Forschergruppe 887 MEMIN (Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Crater Research Network) beschäftigt sich mit der Untersuchung von Körper-Körper-Kollisionsprozessen, ähnlich den Prozessen bei einem Meteoriteneinschlag. Die Kollision der beteiligten Körper (Projektil und Target) führt zu Strukturänderungen in beiden Materialien. Das hier beschriebene Projekt beschäftigt sich mit der Untersuchung der Schädigung im Target. Diese werden mithilfe zerstörungsfreier Prüfmethoden untersucht und ausgewertet. Unter anderem werden für die Untersuchungen elastische Wellen genutzt, wie sie bei Rissentstehung durch die Schallemissionsanalyse aufgezeichnet werden können. Die von den Mikrorissen ausgehenden Signale sollen für eine Lokalisierung herangezogen werden. Unterstützend werden tomographische Verfahren verwendet, mit denen das innere Bild des Targets gezeigt werden soll. Mit den unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfmethoden soll die Schädigungszone im Target gezeigt werden, wobei das Target nicht weiterer Schädigung ausgesetzt wird.

1 Einführung

Das DFG Forschungsprojekt 887 MEMIN untersucht experimentelle Impaktprozesse bei Körper-Körper-Kollisionen geologischer Materialien. Die Ergebnisse dieser Experimente sollen für Aussagen ähnlicher Prozesse in der Natur herangezogen werden, im speziellen für Meteoritenimpakte. Sieben Projekte beschäftigen sich mit den unterschiedlichsten Aspekten aus den Bereichen der Geologie, Mineralogie, Geophysik, Numerik und der Zerstörungsfreien Prüfung. Impaktprozesse, wie Impakte durch Meteoriten auf der Erdoberfläche, sind fundamentale Prozesse in der Erdgeschichte. Mehr als 180 Impaktkrater auf der Erdoberfläche sind zu dem jetzigen Zeitpunkt bekannt. Die bei solchen Prozessen auftretenden hohen Geschwindigkeiten und teilweise großen Massen führen zu hohen Energien, die Impaktkrater von mehreren Kilometern Durchmesser haben können. Mehr als 50% der bekannten Krater auf der Erde haben einen Durchmesser von über 140 km [1]. Der Krater bei einem solchen Impakt stellt die sichtbare Schädigungszone dar. Aber auch der Krateruntergrund weist einen hohen Grad an Schädigungen auf, die nicht ohne weiteres visuell erfassbar sind. Um die Laborexperimente möglichst realitätsnah durchzuführen, werden in den Experimenten geologische Materialien verwendet. Das Material für die Impakttargets besteht aus Seeberger Sandstein, der relativ homogen ist und eine Schichtung aufweist. Für die Impaktprojekteile werden Kugeln aus Meteoritengestein verwendet.

In diesem Bericht wird die Arbeit des Teilprojektes „Evaluation of hypervelocity impact-induced damage of rocks using elastic waves“ der Forschergruppe 887 vorgestellt. Mit Hilfe zerstörungsfreier Prüftechniken, wie Schallemissionsanalyse oder auch

tomographischer Verfahren, wird die Schädigungszone innerhalb des Targetgesteins untersucht.

2 Impaktexperimente

Nicht nur das verwendete Material ist für die Experimente wichtig, sondern auch die Verhältnisse von Masse und Beschleunigung des Projektils. Die Größe des Projektils muss an die mögliche zu erzeugende Geschwindigkeit angepasst werden. Die erforderte hohe Beschleunigung des Projektils wird mit einer Leichtgaskanone erreicht.

2.1 Allgemeiner Aufbau der Experimente

Für die Kollisionsexperimente stehen zwei Leichtgaskanonen am Ernst-March-Institut in Freiburg und in Efringen-Kirchen zur Verfügung. In Freiburg ist eine sogenannte „space“ Leichtgaskanone (SLGG: space light gas gun) vorhanden und in Efringen Kirchen steht eine größere Ausführung, die XL-Leichtgaskanone (XLLGG: extra large light gas gun) zur Verfügung. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau und die Funktionsweise einer Leichtgaskanone dargestellt. Abbildung 2 zeigt die XLLGG in Efringen Kirchen.

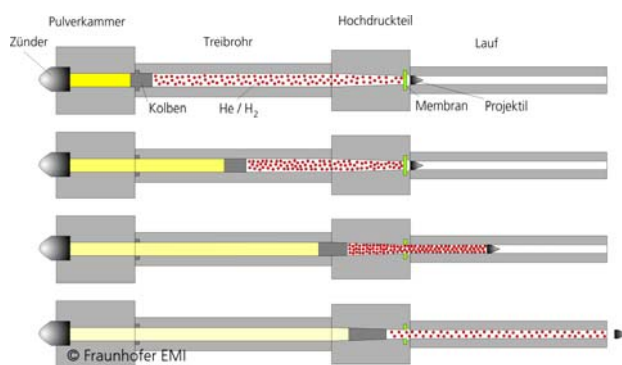


Abbildung 1 (rechts): Schematische Darstellung einer zweistufigen Leichtgaskanone, wie sie bei den MEMIN-Experimenten verwendet wird. Durch die Zündung eines Beschleunigungspulvers wird ein Kolben beschleunigt. Dieser drückt das Gasgemisch, welches sich in einem abgeschlossenen Raum (Treibrohr) befindet,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

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

Für die Laborexperimente werden Projektile aus Meteoritengestein oder Stahl von 0,25 bis 1,0 cm Durchmesser mit einer Beschleunigung von bis zu 7800 m/s auf das Sandsteintarget geschossen. Die Seitenlänge der quadratischen Targets variiert, bezogen auf den Durchmesser des Projektils, von 20 bis 80 cm. Detaillierte Informationen zu den Versuchsanlagen und zum Versuchsaufbau sind nachzulesen bei Schäfer et al. [2] und Poelchau et al. [3].

3 Zerstörungsfreie Prüfung bei Impaktexperimenten

Bei der Kollision des Projektils mit dem Sandsteintarget kommt es zur Freisetzung und Übertragung der Energie, die teilweise für die Ausbreitung von Raumwellen innerhalb des Targets aufgebraucht wird. Die Stoßwelle führt zu Spannungen im Gestein und in Folge dessen kommt es zu Rissen oder andere Schädigungen (Spalling). Solche Schädigungen

äußern sich durch akustische Signale (Schallemissionen), die sich wiederum mit piezoelektrischen Sensoren aufzeichnen und lokalisieren lassen [4]. Nach Abschluss der Impaktexperimente werden die Proben mit weiteren zerstörungsfreien Prüfmethode auf Risse untersucht und stehen somit für weitere Analysen zur Verfügung.

3.1 Schallemissionsanalyse

Für die Aufzeichnung und spätere Lokalisierung der Schallemissionen der Risse müssen Ultraschallsensoren an allen zugänglichen Seiten des Impakttargets an der Oberfläche befestigt werden (Abbildung 3), damit eine gute Herdüberdeckung sichergestellt wird.

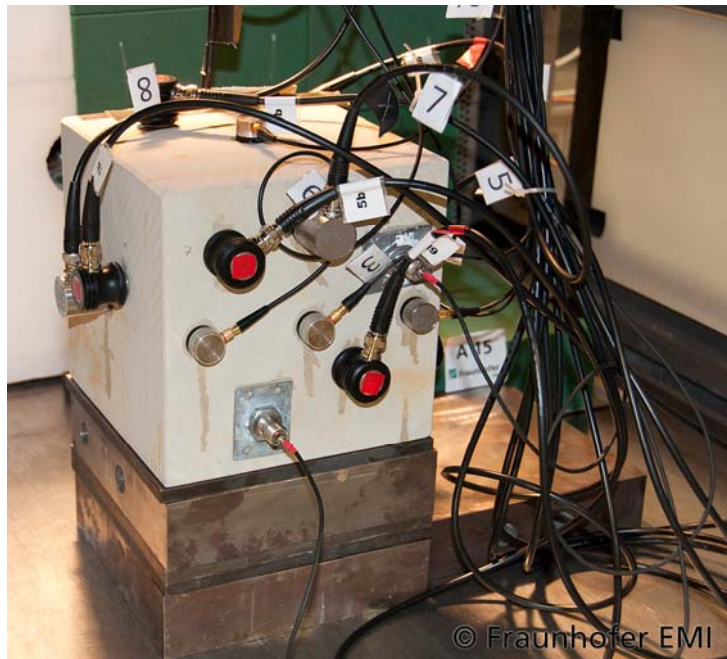


Abbildung 3: Targetaufbau in der SLGG-Anlage mit einem Sandstein mit 20 cm Kantenlänge. An den zugänglichen Oberflächen sind unterschiedliche Ultraschallsensoren befestigt.

Das Sandsteintarget wird während der Experimente quasi dauerüberwacht. Dadurch wird der Impakt selber aufgezeichnet, sowie Aftershocks, die in Folge des Impaktes im Inneren des Gesteins auftreten und Informationen über die Rissbildungen geben. Für eine gute Aussage über Menge und Art der Risse muss mit einer hohen Dynamik aufgezeichnet werden, da der Amplitudenunterschied zwischen den Signalen des Impaktes und der Risse sehr groß ist.

Erste Auswertungen der Schallemissionsanalyse zeigen gute Ergebnisse für die Lokalisierung der Impaktorte. Der Ort des Impaktes ist visuell nachvollziehbar, die Quellkoordinaten sind somit hinreichend bekannt, und dadurch mit dem berechneten Ort (Epizentrum) vergleichbar. Als Epizentrum bei der visuellen Bestimmung wurde die tiefste Stelle des Kraters verwendet. Abbildung 4 zeigt einen der Impaktkrater aus den Laborexperimenten. Es handelt sich um einen kleineren Probenkörper mit 20 cm Seitenlänge. Der Kratermittelpunkt wird hier bei $x = 10,9$ cm, $y = 9,6$ cm und $z = 1,1$ cm abgelesen.

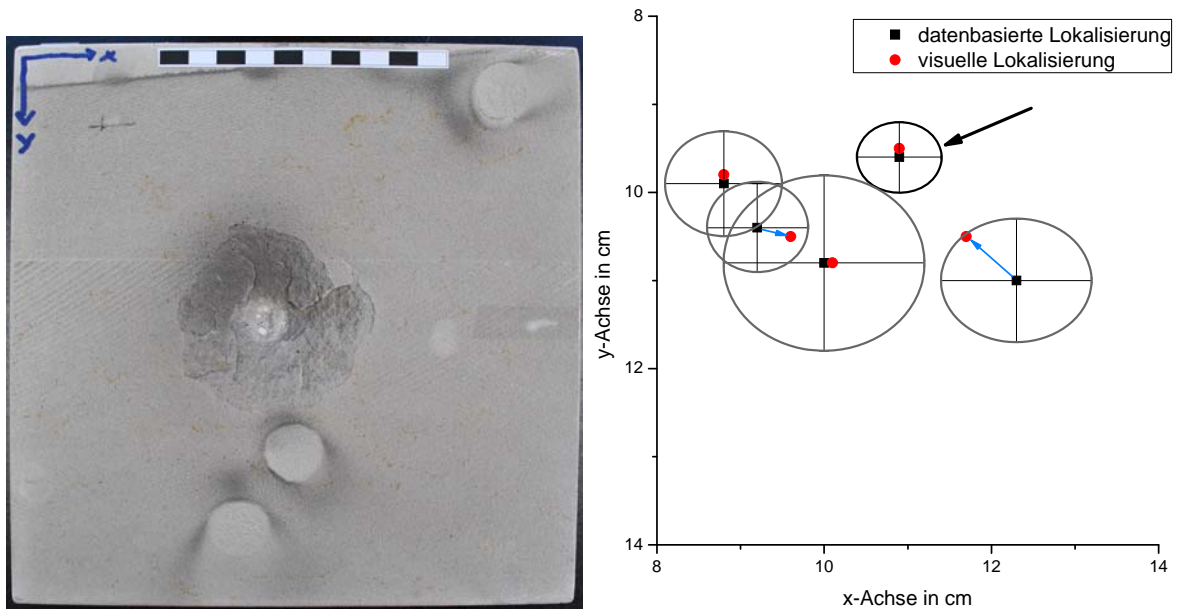


Abbildung 4 (links): Impaktkrater nach dem Experiment, erzeugt an der SLGG-Anlage. Das Target hat eine Kantenlänge von 20 cm, der Krater einen Durchmesser von ca. 6 cm.
 Abbildung 5 (rechts): Lokalisierung der Impaktorte mit Fehlerellipsen und Residuen (blaue Pfeile) von insgesamt fünf verschiedenen Impaktexperimenten in der x-y-Ebene (Targets mit 20 cm Kantenlänge). 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, wobei diese Abbildung keinen mittig gewählten Ausschnitt (x und y \rightarrow 8-14cm) zeigt.

In Abbildung 5 ist der Vergleich zwischen den visuell bestimmten Impaktorten (rote Punkte) und den Koordinaten aus der Schallemissionsanalyse (schwarze Vierecke) dargestellt. Die Ellipsen stellen den berechneten Fehler für die Lokalisierung der Schallemissionsdaten dar, die blauen Pfeile zeigen die Residuen der zu vergleichenden Koordinaten. Es zeigt sich, dass drei der Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung vorweisen und zwei Ergebnisse in ihrer Abweichung noch im Fehlerbereich liegen. Für große Amplituden ist die Lokalisierung somit als sehr gut zu bezeichnen

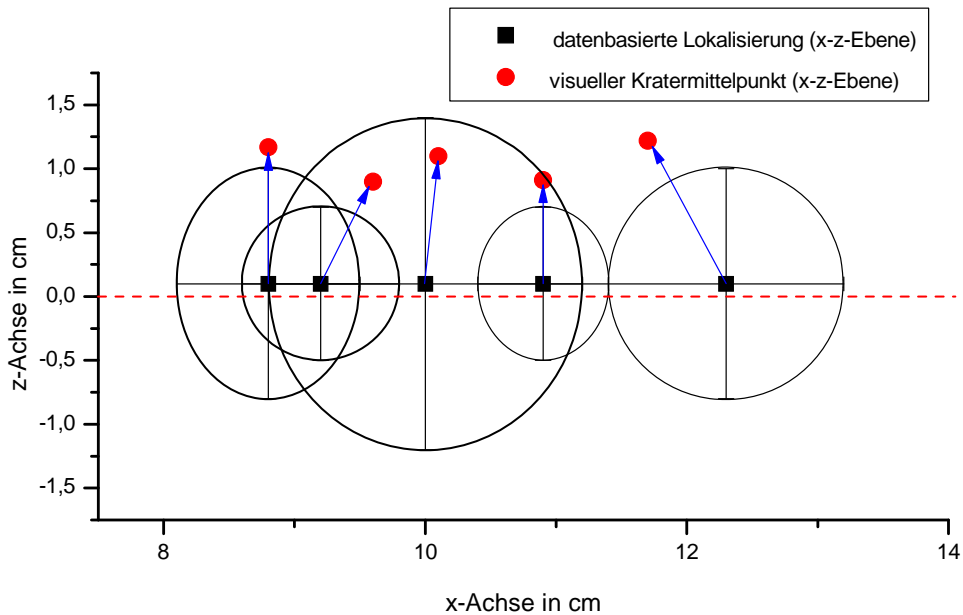


Abbildung 6: Lokalisierung der Impaktorte in der x-z-Ebene. Die rot-gestrichelte Linie markiert die Impaktoberfläche. Die positiven z-Werte liegen im Sandsteintarget. Die negativen z-Werte liegen im freien Raum.

Ein ähnlich gutes Ergebnis wird auch in Abbildung 6 gezeigt, wo die Ergebnisse für die x-z-Ebene dargestellt sind. Die visuell bestimmte Koordinate für z wurde jeweils an der tiefsten Stelle des Kraters vermessen und liegt somit nicht, wie der Einschlagsort an sich, an der Oberfläche. Die rotgestrichelte Linie deutet die Targetoberfläche an. Unter Berücksichtigung, dass der Einschlagsort an der Oberfläche liegen sollte, liegen die berechneten Lokalisierungen sehr gut im Fehlerbereich.

3.2 Schallemissionsanalyse – Mienenbrüche

Für die Schallemissionsanalyse werden vor und nach den eigentlichen Versuchen in der Regel Bleistiftmienenbrüche an der Targetoberfläche zur Kalibrierung verwendet. Dies dient der Überprüfung der Sensorik und des Messsystems. Auch bei den Impaktexperimenten wurden Mienenbrüche vor und nach den Experimenten durchgeführt. Hierbei dienen sie auch zur Überprüfung des Lokalisierungsalgorithmus. Der Ort der Quelle ist dabei sehr gut bekannt und ist daher besser vergleichbar als der Impakt an sich. Der Unterschied hierbei liegt jedoch in der Dynamik der Signale. Ähnlich verhält es sich bei den Signalen der Aftershocks.

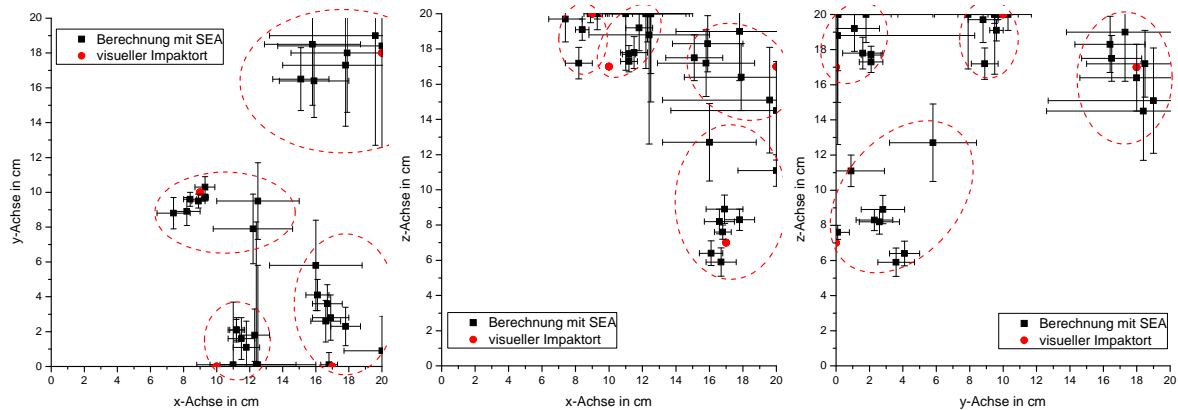


Abbildung 7: Lokalisierung der Bleistiftmienenbrüche an vier Sandsteintargets. Die roten Punkte geben den wahren Ort an, die schwarzen Vierecke sind die berechneten Orte mit Fehlerbalken. Die zusammengehörige lokalisierte Orte und die wahren Orte wurden mit einer rotgestrichelten Linie eingekreist.

In Abbildung 7 sind die Lokalisierungen der Mienenbrüche mit Hilfe der Schallemissionsanalysedaten dargestellt. Es wurden für die Lokalisierungen vor und nach dem Impakt verschiedene Geschwindigkeiten verwendet, welche mit Hilfe von Daten aus Ultraschall-Durchschallungsmessungen gewonnen wurden. Bei der Berechnung wurde noch keine Richtungsabhängigkeit der Geschwindigkeit senkrecht und parallel zur Schichtung mit einbezogen (s. Tabelle 1).

Tabelle 1. Ultraschall-Durchschallungsdaten vor dem Impaktexperiment an einem einzelnen (20 cm)³ Target. Die Geschwindigkeiten senkrecht zur Schichtung liegen ca. 200 m/s unterhalb der Geschwindigkeiten parallel zur Schichtung. Der Mittelwert wird mit Standardabweichung (STA) angegeben.

Durchschallungsrichtung	Messung 1 [m/s]	Messung 2 [m/s]	Messung 3 [m/s]	Messung 4 [m/s]	Mittelwert (+-STA) [m/s]
x-Richtung (parallel)	2980,0	2990,0	3000,0	3000,0	2990,0(+7,0)
y-Richtung (parallel)	2950,0	2970,0	2970,0	2980,0	2970,0(+10,0)
z-Richtung (senkrecht)	2780,0	2790,0	2790,0	2790,0	2790,0(+5,0)

4 Weitere zerstörungsfreie Prüfmethode

Um die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse zu stützen und die Schädigungszone im Target unterhalb des Kraters zu bestimmen, werden weitere zerstörungsfreie Messungen durchgeführt.

Zum einen wird die Ultraschall-Tomographie angewendet, um ein visuelles Bild der Schädigungszone zu erzeugen. Dafür werden zwei Arrays (Geber und Empfänger) verwendet, mit denen Ultraschallmessungen in Durchschallung gemacht werden können (Abbildung 8). Die Punktkontaktprüfköpfe werden manuell an das Target angepresst und nach und nach versetzt. Bei einem $(20\text{ cm})^3$ mit 1cm Messraster müssen über 4,5 Millionen Punkt-zu-Punkt-Messungen durchgeführt werden. Ziel ist es, den Grad der Schädigung mit den Projektilgeschwindigkeiten in Bezug zu setzen und die Aftershocks aus der Schallemissionsanalyse nachzuvollziehen.

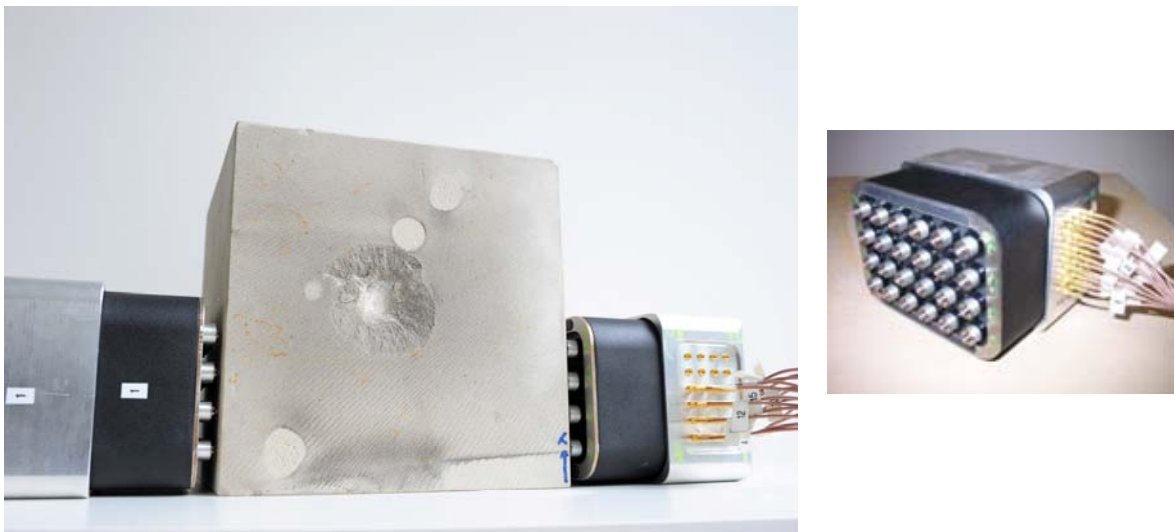


Abbildung 8 : Prinzip der Ultraschall-Tomographie Messung an einem beschossenen Sandsteintarget (links). Es gibt zwei Sensorarrays (siehe Bild rechts), eines dient als Signalgeber und eines als Signalempfänger. Beide Arrays werden an das Target angekoppelt. Durch mehrmaliges Versetzen (die Vermessung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

Neben Ultraschall-Tomographie wurden in Zusammenarbeit mit dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) in Erding Messungen mittels μ -Computer-Tomographie durchgeführt, sowie radiographische Computer-Tomographie Messungen in Zusammenarbeit mit EADS Innovation Works in Ottobrunn.

Weiterhin werden Schwingungsanalysemessungen an geschädigten und unbeschädigten Targets durchgeführt, um die elastischen Module zu ermitteln.

5 Diskussion und Ausblick

Für die Lokalisierung sind drei grundlegende Sachverhalte zu berücksichtigen. Zum einen die hohen Geschwindigkeiten des Projektils, die bei 2.500 m/s - 7.800 m/s liegen. Die P-Wellengeschwindigkeit von Seeberger Sandstein liegt bei ca. 2.800 m/s. Die P-Wellengeschwindigkeit liegt demnach (vorwiegend) unterhalb der Geschwindigkeit des Projektils. Durch den Aufprall des Projektils kommt es zwar zur Geschwindigkeitsabnahme des Projektils, in Abhängigkeit von Durchmesser und Dichte des Projektils und Dichte des Targets ist jedoch anzunehmen, dass die Projektilgeschwindigkeit zu Anfang, die der Kompressionswellen im Target übersteigt. Somit entspricht die Welle, die als erstes bei den

Sensoren ankommt, nicht der Welle, die an der Oberfläche ($z = 0$) beginnen würde. Die erste Welle wird unterhalb der Oberfläche ausgesendet [1].

Der zweite Sachverhalt liegt in der Berücksichtigung der sich ändernden P-Wellengeschwindigkeit während des Schädigungsprozesses. Durch die Schädigungen im Gestein vermindert sich die Kompressionswellengeschwindigkeit im Target mit der Zeit. Bei der Lokalisierung muss daher die Geschwindigkeit angenähert werden.

Für alle Lokalisierungen, die durchgeführt wurden, wurde für die Geschwindigkeit ein Mittelwert aus mehreren Ultraschall-Durchschallungsmessungen verwendet, der für alle drei Raumrichtungen ermittelt wurde. Der verwendete Seeberger Sandstein besitzt eine Schichtung, so dass unterschiedliche Geschwindigkeiten (Abweichungen von ca. 200 m/s) parallel und senkrecht zur Schichtung gemessen werden (s. Tabelle 1). Die Geschwindigkeit der Welle ist somit Richtungsabhängig (dritter Sachverhalt) und muss für eine Verbesserung der Ergebnisse herangezogen werden.

Die Messergebnisse mit zerstörungsfreien Prüfverfahren werden mit numerischen Simulationen verglichen. In einer späteren Projektphase sollen die Labormessungen mit Feldmessungen an terrestrischen Kraterstrukturen verglichen werden.

Danksagung

Die Autoren danken den Kollegen der MEMIN-Forschergruppe und insbesondere dem Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik (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 radiographischen Computer-Tomographie.

Gleichfalls danken wir Herrn Dr.-Ing. Rainer Stöbel von der 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 der 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. 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), S. 131-136.
- [3] **Kenkmann, T., Wünnemann, 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. (Hrsg.):** *Acoustic Emission Testing in Engineering - Basics and Applications*. Berlin: Springer Verlag (2008), ISBN: 978-3-540-69895-1, 404 S.
- [5] **Bucur, V. (Hrsg.):** Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees. Science Direct. *Ultrasonics*. Ultrasonics 43 (2005), online 2004, S. 237-239.
- [6] **Dessa, J.-X., Pascal, G. (Hrsg.):** Combined travelttime and frequency-domain seismic waveform inversion: a case study on multi-offset ultrasonic data. Geophys. J. Int. 154 (2003), S. 117-133.