

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

## Charakterisierung von Schädigungen in Gesteinen bei Impaktprozessen mit zerstörungsfreier Prüfung

Dorothee Moser

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian U. Große
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kurosch Thuro
3. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Franz Pfeiffer

Die Dissertation wurde am 19.12.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 13.02.2014 angenommen.



**Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Dorothee Moser, dass ich die vorgelegte Dissertation selbst verfasst und mich dabei keiner anderen als der von mir ausdrücklich bezeichneten Quellen bedient habe. Weiterhin erkläre ich hiermit, dass ich an keiner anderen Stelle ein Prüfungsverfahren beantragt bzw. die Dissertation in dieser oder anderer Form bereits anderweitig als Prüfungsarbeit verwendet oder einer anderen Fakultät als Dissertation vorgelegt habe.

-----

(Dorothee Moser, 18.12.2013)



## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethode für die Erfassung und Beschreibung einer Schädigung in Naturgesteinen vorgestellt. Die Schädigung der Gesteine rührt von Impaktprozessen her, die in den Räumlichkeiten des Ernst-Mach-Institutes für Kurzzeitdynamik in Freiburg bzw. Efringen Kirchen durchgeführt wurden. Die Impaktprozesse stellen Meteoriteneinschläge im Labor dar und sollen Auskunft über die laufenden Prozesse bei einem Impakt auf der Erdoberfläche geben. Um alle Parameter so naturgetreu wie möglich zu gestalten, wurden Gesteinsarten verwendet, die oft an der Oberfläche der Erde auftreten. Für die Projektile wurde neben anderen Materialien auch Meteoritengestein verwendet.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren sollen einen Einblick in die Schädigungszone unterhalb des entstandenen Kraters geben. Dazu wurden Messungen vor, während und nach dem Impaktexperiment durchgeführt. Während der Impaktversuche wurde die Schallemissionsanalyse (SEA) verwendet, um direkte Informationen über den Impakt und die daraus resultierende Rissausbreitung zu erhalten. Für diese Aufgabe wurde das registrierte Signal für die Lokalisierung der Impakte verwendet. Mit der Lokalisierung der Impaktorte wird gezeigt, dass die Wellenausbreitung an der Oberfläche entstehen muss. Der Impaktort kann mit den hier verwendeten Programmen auf einige Millimeter genau rekonstruiert werden. Als Referenzort dient der Mittelpunkt des Kraters, der bei einem senkrechten Impakt direkt unterhalb des Impaktortes liegen sollte. Weiterhin werden die Laufzeitunterschiede der Kompressionswelle verwendet, um eine Information der Wellenausbreitung zu erhalten. Zum einen kann gezeigt werden, dass sich die Welle nahezu linear im Probekörper ausbreitet. Aufgrund der vorhandenen Schichtung im Gestein könnte eine näherungsweise elliptische Ausbreitung vermutet werden. Zum anderen können die Laufzeitunterschiede zur Bestimmung der Kompressionswellengeschwindigkeit verwendet werden. Die Ausbreitung der Welle ist auch für die numerischen Berechnungen im MEMIN-Projekt von Interesse. Durch die experimentell erhaltenen Daten werden auch die numerischen Berechnungen angepasst, die eine hinreichende Übereinstimmung mit den Experimenten zeigen. Die Auswertung der Daten hinsichtlich kleinerer Risse, die nach dem Impakt entstehen, war durch die hohen Energien beim Impakt nicht erfolgreich.

Basierend auf der Ultraschallprüfung wurde die Ultraschall-Tomographie (UST) bei den vorhandenen Probekörpern angewendet. Durch das spezielle Verhalten der Ultraschallwelle bezüglich sehr kleiner Risse kann die Schädigungszone unterhalb der Impaktkrater in einer ausreichenden Auflösung dargestellt werden. Aufgrund der manuellen Messungen wurden für die Auswertung die Kompressionswellengeschwindigkeiten verwendet, da diese relativ unabhängig vom Anpressdruck der Sensoren sind. Die Messergebnisse zeigen eine deutliche

Geschwindigkeitsreduzierung im Bereich unterhalb der Kraterstruktur, sodass für jeden Probekörper eine entsprechende Schädigungszone definiert werden kann. Die Schädigungszone hängt dabei stark von der Porosität der Probekörper und der Impaktenergie ab und reicht zum Beispiel beim Sandstein (für einen Impakt mit 2,5 mm Stahlprojektil bei einer Geschwindigkeit von  $\sim 5000$  m/s und einer Kantenlänge von 20 cm) in eine Tiefe von etwa 6 cm. Die Ergebnisse der UST liefern einen guten Vergleich zu anderen Studien über Schädigungszonen unterhalb der Kraterstrukturen. Mikroskopische Untersuchungen im MEMIN-Projekt 2 zeigen eine feine Schädigungszone innerhalb der ersten zwei Zentimeter unterhalb eines Kraters in Sandstein. Die Schädigungszonen der einzelnen Studien und der mikroskopischen Untersuchungen dienen jedoch nur zur Einschätzung der hier angewendeten Messmethode. Die Ergebnisse sind nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Analyseansätze verwendet werden. Mit den Daten der UST kann die Laufzeitgeschwindigkeit der Welle vom Impaktort zu den Sensoren, die bei der SEA verwendet werden, berechnet werden. Für jeden Sensorabstand kann damit das Ergebnis der SEA mit dem Ergebnis der UST verglichen werden. Beide Messungen zeigen trotz vorhandener Schichtung im Sandstein eine in guter Näherung für eine lineare Ausbreitung der Welle im Probekörper.

Die Modal- bzw. Schwingungsanalyse wurde verwendet, um die elastischen Parameter der Probekörper zu ermitteln. Durch die Schädigung der Probekörper werden auch die elastischen Parameter des Probekörpers verändert. Diese Änderung spiegelt sich in den Frequenzen der Eigenschwingungsmoden des Probekörpers wieder. Mit der SA kann gezeigt werden, dass sich die elastischen Parameter durch Schädigungen im Probekörper verändern. Jedoch hat sich auch gezeigt, dass für die Anwendung dieser Prüfmethode die hier verwendete Geometrie der Impaktprobekörper ungeeignet ist. Die gemessenen Frequenzspitzen sind sehr klein und breit, weshalb die Frequenz nicht eindeutig zu identifizieren ist. Daneben zeigen die Daten einen hohen Rauschanteil. Messungen an einem Prisma haben Frequenzwerte mit einer klaren Spitze und hohen Energiewerten ergeben. Hinzu kommt, dass nur eine Aussage über den Durchschnitt der elastischen Parameter für den gesamten Probekörper ermittelt werden kann. Für die numerische Simulation der Impaktexperimente im MEMIN-Projekt 5 ist die Aussage der elastischen Module mit der Schädigung damit nicht aussagekräftig.

Zusätzlich wurden Messungen an verschiedenen Messsystemen mit Computertomographie (CT) durchgeführt. Diese sollten dem Vergleich mit der UST dienen. Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Auflösungen für die unterschiedlichen Messsysteme. Radiographische Messungen können bei den verwendeten Probekörpern eine Auflösung von knapp  $60 \mu\text{m}$  erzeugen. Damit sind Risse in unmittelbarer Nähe des Kraters zu erkennen. Ein direkter Vergleich zu den Ergebnissen mit der UST kann nicht erstellt werden. Während die CT einzelne größere Risse zeigt, erfasst die UST

eine Schädigungszone. Messungen mit Neutronen haben nicht funktioniert, hier konnte der Block nur als schwarzer Körper dargestellt werden.

Die durchgeführten Arbeiten ergaben, dass nicht alle ausgewählten Methoden gleichermaßen für die Auswertung der Schädigung unterhalb von Impaktkratern geeignet sind. Speziell für die hier durchgeführten Experimente ist die Schallemissionsanalyse zwar gut anwendbar, jedoch müssen die Daten noch weitreichender ausgewertet und diskutiert werden. Die Modalanalyse ist nur bedingt zielführend und muss durch weitere Messungen ergänzt werden. Die hohen Energien des Impaktes und die Geometrie der Probekörper führten zu unerwarteten Problemen bei den Prüfmethoden. Beide Methoden (Schallemissionsanalyse und Modalanalyse) sollten jedoch für andere Auswertungsmöglichkeiten in der fortlaufenden Studie beibehalten werden. Die Ultraschall-Tomographie hingegen zeigt bei den durch die Impakte erzeugten sehr feinen Rissstrukturen ein gutes Ergebnis und sollte daher auch für weitere Versuche angewendet werden. Auch die CT-Untersuchungen können an kleineren Proben ergänzend durchgeführt werden.

## **Abstract**

This thesis deals with different non-destructive testing methods to describe damaging in natural rock materials. Damaging is generated by a hypervelocity impact process within the framework of the MEMIN project. The main parameters were chosen to have comparable conditions to impacts on earth. The target material is similar to the surface material on the earth's surface and for the projectile an iron meteorite was chosen.

The non-destructive testing methods are used to show the damage underneath the impact craters. Therefore, measurements are performed before, during and after the impact experiment. Acoustic emission testing is the only method which is able to perform measurements during the experiment to collect as much information as possible about the crack propagation induced by the impact. This information can help to simulate an impact event. In this work the acoustic emission is used to localize the impact point of the projectile. The results show that the wave propagation starts at the surface of the target. The impact point can be located with an accuracy of a few millimetres using the projected center of the impact to the surface as a reference. The acoustic emission is also used to reconstruct the compressional wave propagation. Due to the layering of some targets it is assumed that the propagation could be elliptical instead of hemispherical. It is also possible to calculate the compressional wave velocity. The wave propagation is of interest for numerical impact calculation, too. Using the experimental data, numerical calculations can be verified and are in good agreement with the experimental results. Because the impact energy is very high, the

evaluation of smaller cracks after the impact is very complex and is not discussed in this thesis.

The ultrasound tomography is based on ultrasonic testing methods and is performed before and after the impact experiments. Because the ultrasonic waves are highly influenced by smaller cracks, the damage underneath the crater structure can be visualized, although the resolution is not very detailed. Because the wave propagation of the induced ultrasonic signal is not influenced by contact pressure of the sensors, the compressional wave velocity is used for the evaluation. The results demonstrate a velocity decrease in the area underneath the crater structure. Depending on the target material, the damage zone could be characterised and seemed to be influenced by the porosity of the target material and the impact energy. For sandstone the damage extends to a depth of around 6 cm (for an impact of a 2.5 mm steel projectile at ~5000 m/s and a cube with 20 cm edge length). The results of the ultrasound tomography show a good agreement with other studies about damage zones underneath impact craters. Microscopic measurements carried out in a separate MEMIN project and show fine damage of the sandstone in a zone of 2 cm beneath the crater floor. Both studies used different measurement methods to define the damage zone. The studies are not directly comparable but give good constraints for the ultrasound tomography. The data of the ultrasound tomography are also used to calculate the wave propagation, similar to the acoustic emission analysis. The results of both methods can be compared and show linear wave propagation inside the target.

The modal- or vibration analysis is used to calculate the elastic parameters of the targets. The damage of the targets changes the elastic parameters compared to a target without any damage. This can be evaluated by the measured frequencies of the resonant vibration modes. The vibration analysis demonstrates that the damage of the material influences the elastic parameters. However, it has also been shown that for the application of this test method the geometry of the targets used here are unfortunate. The measured frequency peaks are very small and wide, so the frequency is to identify ambiguous. In addition, the data show a high amount of noise. Measurements on a prism have frequency peaks arise with a clear top and high energy values. In addition, only an indication of the average of the elastic parameters of the entire specimen can be determined. Thus, a detailed description of the elastic parameters is not given. To verify the numerical calculations the modal analysis does not give enough detailed information.

In addition to non-destructive civil engineering testing methods some computer tomography measurements were done. The results can be compared with the ultrasound tomography. The methods used here can reach different resolutions (up to 60  $\mu\text{m}$ ) for the evaluated sandstone cubes. The results demonstrate smaller cracks near the impact surface. A complete comparison to the ultrasound tomography is not

possible. The computer tomography identifies individual cracks depending on the resolution whereas the ultrasound tomography identifies a damage zone but no individual cracks. Measurements with neutrons just show a black body but cracks cannot be recognized.

The work shows that not all used measurement methods are suitable to give good information about the damage underneath impact structures. Especially for the experiments here discussed the acoustic emission method is adaptive but needs more detailed analysis and discussion. The modal analysis is not adequate and need additional measurements. The high energy during the impact and the geometry of the target lead to unexpected problems of the measurement methods. However, both methods should be discussed in more detail and with new analysis options. The ultrasound tomography demonstrates very good results; therefore this method should be a standard for these experiments. The computer tomography can be maintained for smaller targets.

## Anmerkungen

- Diese Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Universität München (TUM) am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung entstanden. Finanziert wurden meine Arbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Projekt FOR-887, GR 1664/6-1, Projekt 4). Es handelt sich bei dieser Arbeit nicht um eine kumulative Arbeit, wenngleich einige der hier diskutierten Ergebnisse in ähnlicher Form bereits in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert wurden. Eine Liste aller Arbeiten und Veröffentlichungen im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist im Anschluss aufgeführt (Seite VIII).
- Viele der in dieser Arbeit gezeigten Bilder sind während der Messkampagnen entstanden. Aus datenschutzrechtlichen Gründen wurden diese Bilder von den Mitarbeitern des Ernst-Mach-Institutes (EMI) fotografiert und mit einem entsprechenden Logo vom EMI oder dem Fraunhofer Institut versehen. In einigen Bildern wurde zusätzlich ein TUM Logo integriert, sofern das Bild und die verwendete Messtechnik Eigentum der TUM darstellt. Diese Bilder wurden nicht weiter mit einer Quelle benannt, da sie meistens nicht veröffentlicht sind und innerhalb des MEMIN-Projektes entstanden sind.
- Innerhalb dieser Arbeit wird die Einheit des Druckes nicht wie üblich in Pascal [Pa] angegeben, sondern in [mbar]. Dies ist die Einheit, die von den Messinstrumenten übernommen wurde.  $1 \text{ Pa} = 0,01 \text{ mbar}$
- Bei der Bezeichnung der Probekörper wurden häufig die vereinfachten Schreibweisen verwendet: Sandstein = Sandstein-Probekörper, Quarzit = Quarzit-Probekörper und Tuff = Tuff-Probekörper.

## **Abkürzungsverzeichnis**

<b>BNC</b>	Bayonet Neil Concelman
<b>CT</b>	Computer-Tomographie
<b>DFG</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft
<b>EADS</b>	European Aeronautic Defence and Space Company
<b>EMI</b>	Ernst Mach Institut
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transformation
<b>GE</b>	General Electric
<b>LGG</b>	Light gas gun
<b>MA</b>	Modalanalyse
<b>MEMIN</b>	Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network
<b>NDT</b>	Nondestructive testing (auf Deutsch s. ZfP)
<b>SA</b>	Schwingungsanalyse
<b>SEA</b>	Schallemissionsanalyse
<b>SLGG</b>	Small Light Gas Gun
<b>S/N-Verhältnis</b>	Signal zu Rausch (Noise) - Verhältnis
<b>TUM</b>	Technische Universität München
<b>UPE-D</b>	Ultraschall Piezoelektrischer Empfänger - Dehnwelle
<b>UPG-D</b>	Ultraschall Piezoelektrischer Geber – Dehnwelle
<b>US</b>	Ultraschall
<b>USP</b>	Ultraschallprüfung
<b>UST</b>	Ultraschall-Tomographie
<b>WIWeb</b>	Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe
<b>XLLGG</b>	Extra Large Light Gas Gun
<b>ZfP</b>	Zerstörungsfreie Prüfung

## Formelverzeichnis

$l$ [m]	Länge	$\text{Rec}(f)$	Antwortfunktion
$v_p, v_s$ [m/s]	Geschwindigkeit (P = Kompressionswelle, S = Transversalwelle)	$S(f)$ TF	Impulsfunktion Übertragungsfunktion
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte	$x_i, y_i, z_i$	Ortskoordinate
Ma	Zeit (Jahrmillion)	$t$ [s]	Zeit
$P$ [MPa]	Druck bzw. mechanische Spannung	$s$ $k$	Weg Ordnungszahl (Dimensionslos)
kfps	Bildfrequenz (Bilder pro Zeiteinheit)	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	Querschnitt
$m$ [g, kg]	Masse	$r$ [mm]	Radius
$p$ [mbar]	Druck	$b$ [mm]	Breite
$f$ [Hz]	Frequenz	$h$ [mm]	Höhe
Bit [Gb]	Datenvolumen	C, R, T	Geometrie Korrekturfaktoren
T	Spannungstensor	$M$ [kg*mm <sup>2</sup> ]	Flächen- trägheitsmoment
D	Deformationstensor		
E	Elastizitätsmodul	$q$ [mm <sup>2</sup> ]	Querschnitt
K	Kompressionsmodul	°	Grad
G	Schermodul	I	Intensität
$\sigma$	Poissionzahl	$d$ [mm]	Dicke
$\lambda, \mu$	Lame'sche Konstante	$\mu$	Dämpfung
$\theta$	Dilatation	$E$ [MeV]	Energie
$\Lambda$	Wellenlänge	$d_b$ $g$ [m/s]	Tiefe Beschleunigung

## Inhaltsverzeichnis

Erklärung.....	b
Zusammenfassung.....	d
Abstract.....	f
Anmerkungen.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	j
Formelverzeichnis.....	k
Inhaltsverzeichnis.....	l
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Aufgabenstellung.....	3
1.2 Das MEMIN-Projekt (Phase I).....	7
1.2.1 Beschreibung der Impaktexperimente.....	11
1.2.2 Probekörper und Projektile.....	14
1.2.3 Die Teilprojekte.....	17
2. Hintergrund.....	20
2.1 Geophysik.....	20
2.2 Zerstörungsfreie Prüfung.....	21
2.3 Zusammenhang zwischen Geophysik und zerstörungsfreier Prüfung.....	22
3. Methodische und experimentelle Grundlagen.....	24
3.1 Charakteristische Eigenschaften von Material und Messung.....	24
3.2 Messmethoden.....	30
3.2.1 Schallemissionsanalyse (SEA).....	31
a. Messprinzip.....	32
b. Messsystem, Sensorik und verwendete Auswertungsprogramme.....	36
c. Versuchsaufbau.....	43
3.2.2 Ultraschall-Tomographie.....	48
a. Messprinzip.....	50
b. Messsystem, Sensorik und verwendete Auswertungsprogramme.....	54
c. Versuchsaufbau.....	59
3.2.3 Modalanalyse.....	60
a. Messprinzip.....	62
b. Messsystem, Sensorik und verwendete Auswertungsprogramme.....	66
c. Versuchsaufbau.....	68
3.2.4 Computer-Tomographie.....	70

a.	Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB).....	72
b.	General Electric (GE).....	73
c.	European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) .....	74
d.	Neutronen Computer-Tomographie und Radiographie mit schnellen Neutronen (NECTAR) .....	74
4.	V Versuchsergebnisse.....	76
4.1	Impaktlokalisierung durch Schallemissionsanalyse .....	76
4.2	Visualisierung der Schädigung mittels Ultraschall-Tomographie.....	87
4.3	Analyse der Wellenausbreitung (mittels SEA und UST) .....	99
4.4	Modalanalyse zur Erfassung der elastischen Parameter .....	106
4.5	Visualisierung der Schädigung mittels radiographischer Computer-Tomographie .....	119
a.	Messungen am Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB).....	119
b.	Messungen bei der Firma General Electric (GE).....	120
c.	Messungen bei der European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) .....	122
d.	Neutronen Computer-Tomographie und Radiographie mit schnellen Neutronen (NECTAR) .....	124
5.	Ergebnisse im Rahmen von MEMIN.....	125
5.1	Auswertung innerhalb von MEMIN und Vergleich zu anderen Studien .....	125
5.2	Charakterisierung der Schädigungszone: Makroskopisch, mikroskopisch, numerisch und mit Ultraschall .....	131
5.3	Wellenausbreitung: Numerik und Experiment .....	134
6.	Diskussion.....	137
6.1	Fehlerbetrachtung .....	141
7.	Ausblick .....	149
	Literaturverzeichnis.....	154
	Abbildungsverzeichnis .....	I
	Tabellenverzeichnis.....	VII
	Veröffentlichungen.....	VIII
	Lebenslauf .....	X
	Danksagung .....	XI
	Anhang .....	XII
I.	Probekörper-Bezeichnungen und Experimentnummern .....	XIII
II.	Sensorkoordinaten für die SEA.....	XIV
III.	Eingesetzte ZfP-Verfahren an MEMIN-Probekörpern.....	XVIII

---

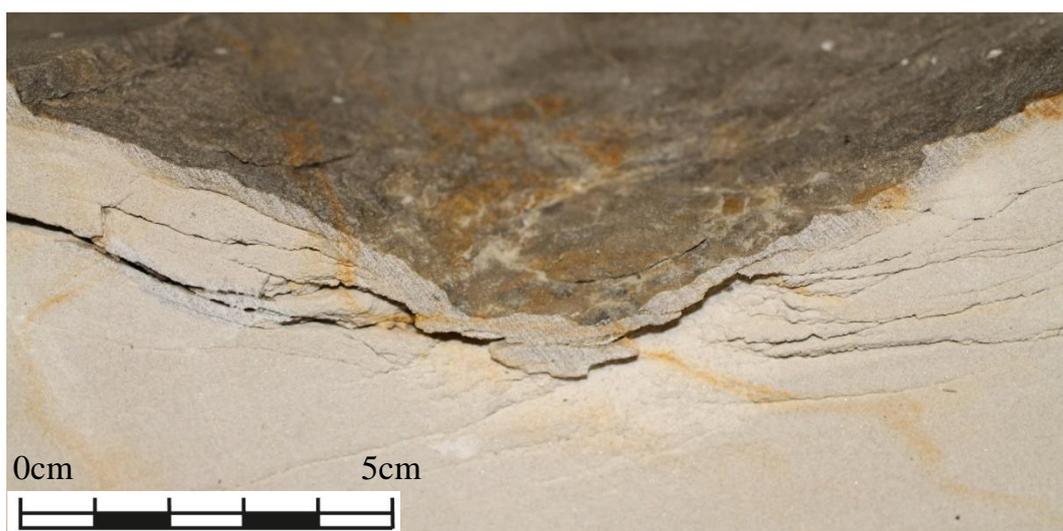
IV.	Schnittbilder aller Probekörper gemessen mit Ultraschall-Tomographie .....	XX
V.	MATLAB Programm zur Erstellung der Tomographie-Schnittbilder .....	XXVI
VI.	Wellenausbreitung über die Schallemissionsanalyse .....	XXVIII
VII.	Fast Fourier Analyse der Impaktsignale .....	XXXIII
VIII.	Geometriebetrachtung für die Modalanalyse .....	XXXIV
IX.	Phasenspektroskopie.....	XXXVIII



## 1. Einleitung

Die Erfassung von Rissstrukturen und ähnlichen Schädigungen im Inneren eines Probekörpers sind für technische und naturwissenschaftliche Beurteilungen von großem Interesse. Dabei ist es besonders wichtig, die vorhandene Schädigung durch die verwendeten Prüfmethode nicht noch größerer Schädigung auszusetzen. Mit verschiedenen zerstörungsfreien Prüfmethode ist es möglich, Risse in einem Probekörper während der Entstehung zu erfassen oder eine Visualisierung einer Schädigungszone zu ermöglichen.

In der hier vorliegenden Arbeit werden insgesamt drei verschiedene Verfahren näher betrachtet (Schallemissionsanalyse, Ultraschall-Tomographie und Modalanalyse) und deren Ergebnisse diskutiert. Die Methoden sind in der Literatur bekannt, jedoch gibt es für kaum eine dieser Messungen eine standardisierte Vorgehensweise bei der vorliegenden Aufgabenstellung. Dementsprechend wurden die Messmethoden an die Problemstellung angepasst und teilweise, bezogen auf den Messaufbau und die Auswertung, neu entwickelt. Für die Diskussion der Methoden werden Messdaten verwendet, die innerhalb des DFG- (Deutsche Forschungsgemeinschaft) Forschungsprojektes MEMIN (Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network) gewonnen wurden. Wie bei fast jeder Aufgabe mit zerstörungsfreien Prüfmethode ist auch hier die Anwendung sehr speziell und nur bedingt auf andere Prüfaufgaben übertragbar. Bei den hier verwendeten Probekörpern handelt es sich um experimentell erzeugte Impaktkrater in verschiedenen Natursteinblöcken (siehe Abbildung 1-1, Krater in einem Sandstein), die Erkenntnisse zur Erforschung terrestrischer Krater geben sollen.



**Abbildung 1-1: Querschnitt eines Impaktkraters. Gezeigt wird ein Krater ( $\varnothing \approx 20$  cm, nicht komplett abgebildet) in einem Sandstein-Probekörper (50 cm x 50 cm x 50 cm). Sehr deutlich ist die kompakte Zone an der Krateroberfläche zu erkennen. Unterhalb des Kraters ist eine fast parallel verlaufende Rissausbreitung zu sehen.**

Das DFG-Projekt wird in Kapitel 1.2 näher erläutert. Zusätzlich werden die Eigenschaften für alle verwendeten Materialien sowohl bei den Probekörpern als auch bei den Projektilen angegeben. Alle hier gezeigten Methoden wurden speziell ausgewählt, um einen Bezug zu geophysikalischen Messmethoden herzustellen oder Informationen für eine Simulation solcher Experimente (MEMIN-Projekt 5) zu erhalten. Am Ende dieses Kapitels werden die Schussparameter für jedes Experiment zusammengefasst. Diese Parameter werden nicht weiter für die Auswertung der zerstörungsfreien Prüfmethode verwendet. Die Schussparameter sind vor allem für weiterführende Arbeiten wichtig (siehe Kapitel 5). Die Tabelle soll einen Überblick über die durchgeführten Experimente geben.

Der Zusammenhang zwischen zerstörungsfreien Prüfmethode und geophysikalischen Messmethoden wird in Kapitel 2 näher erläutert. Dies dient nicht der Auslegung der Ergebnisse. Es soll deutlich gemacht werden, dass mehrere geophysikalische Messmethoden im Labor getestet und die Ergebnisse verifiziert werden können. Im Anschluss werden in Kapitel 0 die verwendeten zerstörungsfreien Prüfmethode theoretisch erläutert.

Dafür wird zuerst eine Einführung in die Charakteristik von Materialien und deren elastischen Eigenschaften gegeben. Diese Einführung dient dem Verständnis der verwendeten Messmethoden, die alle miteinander auf den Eigenschaften der elastischen Wellenausbreitung beruhen. Für die Schallemissionsanalyse (SEA), die Ultraschall-Tomographie (UST) und die Modalanalyse (MA) wird jeweils zuerst das allgemeine Messprinzip erklärt. Daran folgend werden das Messsystem und die verwendeten Programme erläutert. Abschließend wird der spezielle Messaufbau für die durchgeführten Experimente dargelegt. Die Erläuterung des Messaufbaus soll einen Einblick in die Anwendung und die damit verbundene Grundidee geben.

Bei keiner der Messaufgaben handelte es sich um Standardanwendungen der Messmethoden. Da die Impaktexperimente nicht wiederholbar sind und einige der Messungen durch bereits durchgeführte Impaktexperimente nicht mehr nachzuholen waren, ist dieser Punkt wichtig für die Beurteilung der erhaltenen Ergebnisse. Zum Beispiel konnten von den kleineren Sandstein-Probekörpern keine Ultraschall-Tomographie-Messungen vor dem Experiment durchgeführt werden. Daher können hier nur Information von einem Referenzprobekörper dargestellt werden, der im weiteren Verlauf nicht für ein Impaktexperiment verwendet worden ist.

Zusätzlich wird in Kapitel 3.2.4 die Technik der Computer-Tomographie (CT) behandelt. Hier wird eine weitere zerstörungsfreie Prüfmethode aufgezeigt, die jedoch am Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung an der Technischen Universität München (TUM) nicht vorhanden ist. Durch die Unterstützung des Instituts für Radiochemie der TUM, dem Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB), der European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) und General Electric

(GE) war es möglich, verschiedene tomographische Verfahren und Messeinrichtungen auszuprobieren. Kapitel 3.2.4 zeigt eine kurze Erläuterung der theoretischen Grundlagen der Methode und der Einzelheiten zu den Messanlagen.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Messungen gezeigt. Hierbei wird jede Methode separat betrachtet. Einige Auswertungsansätze sind gut miteinander vergleichbar und werden daher in der Auswertung in Bezug zueinander gebracht. Hier wird deutlich, dass die Schädigung im Inneren eines Probekörpers mit zerstörungsfreien Prüfmethode gut ausgewertet werden kann. Dabei liefert jede Methode ihren ganz eigenen Beitrag für die Auswertung, sodass der Impakt genau lokalisiert werden kann, die Ausbreitung der Kompressionswelle nachvollzogen, eine Schädigungszone visuell dargestellt und der Grad der Schädigung abgeschätzt werden kann.

Daran anschließend wird in Kapitel 5 ein kurzer Ausblick für die Zusammenarbeit innerhalb des MEMIN-Projektes gezeigt. Hierbei soll auch ein Bezug zu bereits vorhandenen Studien anderer Arbeitsgruppen und zu Ergebnissen mit anderen MEMIN-Projekten präsentiert werden. Dieses Kapitel stellt jedoch nur einen Anfang der möglichen Vergleiche und Arbeiten dar. Es soll gezeigt werden, dass die erhaltenen Ergebnisse durchaus mit anderen Studien vergleichbar sind und ein Vergleich oder eine Skalierung für die Geophysik möglich und anstrebenswert ist.

Die Diskussion (Kapitel 6) zeigt die Vor- und Nachteile der Messmethoden. Hierbei ist auch die Fehlerbetrachtung der Methoden und der Auswertung zu beachten. Mit einem Ausblick in Kapitel 7 über weitere interessante Messmethoden und Anwendungsmöglichkeiten sowie deren Auswertungsansätzen wird die Arbeit abgeschlossen. Der Anhang liefert weitere Messmethoden und Messergebnisse, die nicht näher diskutiert werden. Zusätzlich gibt es Erläuterungen zu den Experimentbezeichnungen, Sensorkoordinaten und Messungen für die Experimente.

## **1.1 Motivation und Aufgabenstellung**

Der Zusammenhang zwischen den zerstörungsfreien Prüfmethode und geophysikalischen Messmethoden ist offensichtlich. Oft werden gut bekannte Methoden der Geophysik auch im Bauwesen verwendet und die Parameter auf die Prüfobjekte dementsprechend skaliert. Bisher ist es jedoch nicht üblich, mit zerstörungsfreien Prüfmethode gängige Messmethoden im Labor zu testen und auf größere Strukturen hoch zu rechnen. In dieser Arbeit werden vorbereitende Arbeiten für eine solche Aufgabenstellung gezeigt. Bei Laborexperimenten wurden zerstörungsfreie Prüfmethode angewendet. Sie sollen Aufschluss über die Möglichkeit der Messung und Auswertung an erdähnlichen Strukturen geben. Zu solchen Strukturen gehören Impaktkrater von Meteoriten, die im Labor nachempfunden werden können. Liegt die Motivation in der Betrachtung von

Meteoritenkratern und deren Strukturen, muss bedacht werden, dass solche komplexen Rissstrukturen bisher kaum mit zerstörungsfreien Prüfmethode untersucht worden sind. Das Interesse liegt daher in der Auswertungsmöglichkeit der Methoden. Hierbei ist die Frage zu behandeln, ob die Methoden geeignet sind und wie die erzielten Ergebnisse zu interpretieren sind. Erst dann kann eine Aussage über mögliche Parallelen zu geophysikalischen Messungen gemacht werden, die bereits seit längerem für die Auffindung von Kraterstrukturen auf der Erde angewendet werden (Pesonen [1996]). Hierzu wird nur kurz ein Ausblick in Kapitel 5 gegeben.

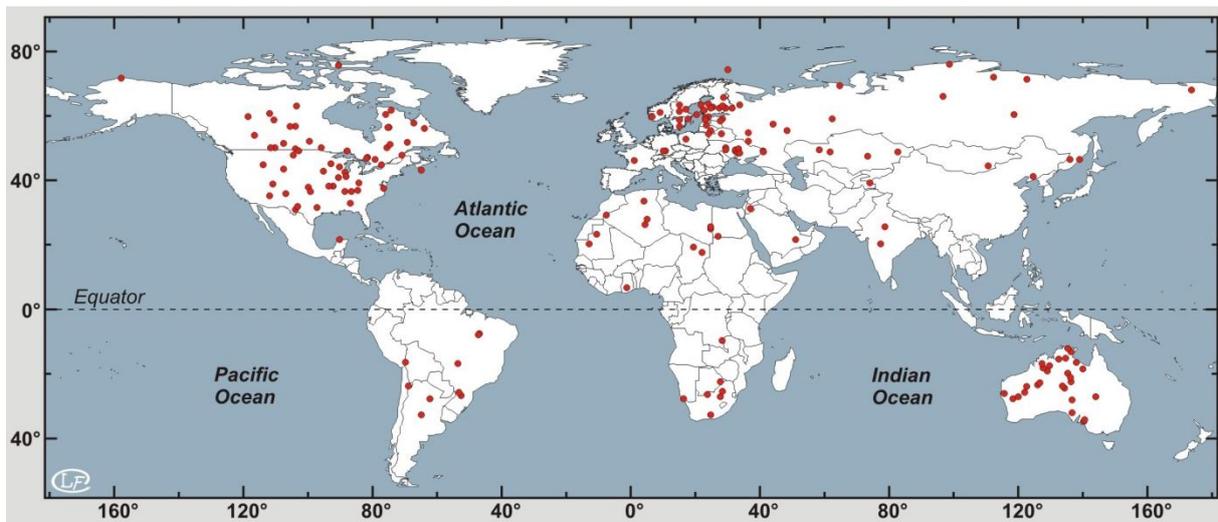


Abbildung 1-2: Verteilung der zur Zeit bekannten Impaktkrater auf der Erdoberfläche (Ferriere [2011]).

Meteoritenimpakte sind sehr fundamentale Prozesse in unserem Sonnensystem, die auf allen uns bekannten Planeten und Planetesimalen mit fester Oberfläche nachgewiesen werden können. Ein sehr junger Meteoritenimpakt ereignete sich am 15. Februar 2013 im Gebiet von Tscheljabinsk, Russland. Bei einer Anzahl von etwa 184 bekannten Meteoritenkratern auf der Erdoberfläche (Spray und Elliot [2011]) handelt es sich um ein seltenes Schauspiel. Diese Zahl spiegelt jedoch nur den aktuellen Wissensstand wieder (Abbildung 1-2). Die Erde und ihre Oberfläche unterliegen zu jederzeit, seit Jahrmillionen, entscheidenden geologischen Prozessen, die die Erdoberfläche ständig verändern. So bewirken Erosion, Denudation sowie Orogenese und Subduktion die Neubildung der Erdoberfläche. Auch Sedimentation führt zu versteckten Kraterstrukturen, die nicht auf Anhieb als solche zu identifizieren sind (Donofrio [1997]). Selbst erdgeschichtlich jüngere Ereignisse wie Eiszeiten und Vulkanismus tragen dazu bei, dass die Erdoberfläche auch heute noch wesentlich verändert wird. So ist die genannte Zahl nur eine aktuelle Bestandsaufnahme der heute bekannten Krater. Die Anzahl der heute noch vorhandenen Kraterstrukturen wird daher sehr viel größer sein, als zurzeit bekannt ist. Ein ganz anderes Bild zeigt die Oberfläche des Mondes. Der Mond besitzt keine Atmosphäre und weist keine

tektonischen Prozesse auf, weshalb hier keine Erosion und ähnliches Prozesse existieren. Daher zeigt dieser eine stark mit Impaktkratern überprägte Oberfläche. (Näheres siehe unter anderem bei Shoemaker [1962], Neukum et al. [1975] und Melosh [1989].)

Es ist von großem Interesse, einen solchen Meteoritenimpakt genauer zu untersuchen und so auch die Erkennungsmerkmale von Kratern zu verstehen. Gerade mit geophysikalischen Messmethoden lassen sich Impaktkrater sehr gut rekonstruieren, da Impaktkrater eine sogenannte geophysikalische Anomalie aufweisen (Pilkington und Grieve [1992], Pesonen [1996]). Geophysikalische Anomalien können und werden mittels verschiedener Messmethoden erfasst, da sie sich auf unterschiedliche Weise zeigen. Typische Methoden sind Gravimetrie, Magnetfeldmessungen, Reflektionsseismik und Bohrlochgeophysik (Pilkington und Grieve [1992]). Labor- und Feldmessungen haben gezeigt, dass Materialien, die durch Stoßvorgänge Risse oder Verdichtungsgebiete aufweisen, stark in ihren Materialeigenschaften, zum Beispiel der Ausbreitung elastischer Wellen, beeinflusst werden (Pilkington und Grieve [1992], Ahrens und Rubin [1993], Xia und Ahrens [2001], Ai und Ahrens [2004], Ai [2006], Moser et al. [2013]). In dieser Arbeit werden ähnliche Verfahren gezeigt, um die Art und Expansion der Anomalie im Untergrund darzustellen.

Das Ziel dieser Arbeit ist generell, die angewendeten Messmethoden für das vorliegende Messproblem zu untersuchen und die Aussagekraft der Ergebnisse zu bewerten. Es soll herausgefunden werden, welche Messmethode geeignet ist, um weiterführende Ergebnisse zu erzielen. Alle verwendeten Messmethoden sind zerstörungsfrei und können nur im Nachhinein mittels zerstörender Untersuchungsmethoden näher evaluiert werden. Ein zusätzliches Ziel, das in dem Forschungsprojekt MEMIN verfolgt wird, ist der Vergleich beziehungsweise das Zusammenfügen von zerstörungsfreien Messergebnissen mit den Ergebnissen aus den unterschiedlichen Teilprojekten. Die mikroskopischen Untersuchungen (MEMIN, Projekt 2) geben einen Aufschluss über die Tiefe der Schädigung. Die Dimensionen des Kraters können als Skalierung für die Schädigungstiefe dienen (MEMIN, Projekt 6) und die numerischen Modelle (MEMIN, Projekt 5) zeigen einen guten Ansatz für das breite Rissnetz unterhalb des Kraters. Für die numerische Betrachtung ist jedoch auch die im Labor gemessene Wellenausbreitung für die Optimierung der Modelle von Interesse (Näheres siehe Kapitel 4.2 und 5). Die Ergebnisse sämtlicher Projekte sollen dazu beitragen, dass eine Aussage über die Entstehung und die Struktur von Erdkratern gemacht werden kann. Dies kann helfen, weitere Kraterstrukturen zu finden und Informationen über den Krateruntergrund zu sammeln. Die Kraterexperimente dienen dazu, die Prozesse, die bei solchen hochenergetischen Ereignissen ablaufen, besser zu verstehen oder überhaupt nachzuvollziehen. Die Vermutung, dass die Auswirkungen auf die Probekörper von diesem selber und den gewählten Parametern (Wassersättigung, Impaktenergie u.v.m.) abhängig sind, wird

mit der Durchführung und Auswertung der Experimente gezeigt und nachgewiesen. Zusätzlich hilft es, eine Aussage über die Genauigkeit der gängigen geophysikalischen Messmethoden an natürlichen Impaktkratern machen zu können und einen Beitrag für numerische Berechnungen zu liefern.

Um ein großes Repertoire an Informationen über den Impakt und die Auswirkungen sowie über den Probekörper erfassen zu können, wurden verschiedene zerstörungsfreie Messmethoden angewendet. Während der Laborexperimente wurde die Schallemissionsanalyse (SEA) eingesetzt (siehe Kapitel 3.2.1). Hierbei lag das Interesse in der Auswertung des kompletten Signals. Das bedeutet, dass nicht nur das Impakt signal, sondern auch dem Impakt folgende kleinere Riss signale für die Auswertung wichtig sein könnten. Solche Signale entstehen durch die sich im Inneren des Probekörpers ausbreitenden Risse und Schädigungszonen, die letztlich durch das vom Impakt induzierte Wellenfeld hervorgerufen werden. Diese Ereignisse könnten bei der Definition der Schädigungszone und der Bruchmechanismen wichtige Informationen liefern.

Eine weitere Messmethode, die vor und nach den Impaktexperimenten durchgeführt worden ist, stellt die Ultraschall-Tomographie (UST) dar (siehe Kapitel 3.2.2). Die UST dient einer lokalen Auflösung der Schädigungszone im Probekörper. Hier ist es das Ziel, eine geometrische Ausdehnung der Schädigung mittels Ultraschallwellen zu erfassen und letztlich visuell darzustellen. Die gewonnenen Informationen zeigen vorhandene Verwerfungszonen, Störungszonen oder andere Auffälligkeiten im Probekörper vor den Impaktexperimenten. Die bekannten Störungen im Gestein vor dem Experiment können dann von den Schädigungen, die durch den Impakt verursacht wurden, unterschieden werden. Die Auswertung der UST kann über verschiedene Parameter erfolgen: Die Auswertung kann beispielsweise über die Amplitude, die Laufzeit oder die Energie erfolgen. In dieser Arbeit wurde die Laufzeit als Anhaltspunkt für die Auswertung verwendet. Eine sehr ähnliche Methode ist die Computer-Tomographie (CT) (siehe Kapitel 3.2.4). Die CT hat eine sehr viel höhere Auflösung und kann daher Risse im Detail darstellen. Die hier gezeigten Messungen werden nur zum Vergleich hinzugezogen und in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern durchgeführt.

Für eine bessere Charakterisierung der verwendeten Materialien wurden einige Proben mit der Modal- beziehungsweise Schwingungsanalyse untersucht. Über die Resonanzfrequenzen der einzelnen Schwingungsmoden können verschiedene elastische Parameter wie das Elastizitätsmodul und das Schermodul berechnet werden. Im Nachhinein kann diese Messung an den bereits beschossenen Probekörpern wiederholt werden. Durch den Impakt verändern sich die elastischen Module der Probekörper und somit auch die Schwingungsfrequenzen. Ein Nachteil dieser Messmethode ist zum einen die Geometrie der Probekörper und zum anderen die

räumliche Auflösung der Ergebnisse. Die Geometrie spielt eine wesentliche Rolle zur Erfassung der Messdaten. Eine genauere Erläuterung erfolgt in Kapitel 4.4. Die räumliche Auflösung ist ein Problem, da sie praktisch nicht existiert. Bei der Modalanalyse kann im Vergleich zur UST ausschließlich ein globales Ergebnis bezogen auf den Probekörper erzielt werden. Es wird demnach ein Durchschnittswert für das gesamte Messobjekt berechnet. Eine lokale Verteilung, die gerade bei den Impaktversuchen von großem Interesse ist, kann nicht erfasst werden, da sich die Schädigungszone mit der Entfernung vom Krater immer weiter abschwächt. Es liegt also generell eher ein lokales Problem vor.

Neben diesen drei Hauptmessmethoden wurden auch Messungen mit der Methode der Phasenspektroskopie begonnen. Ähnlich wie die UST kann mit diesem Messverfahren eine geometrische Ausdehnung der Schädigung im Gestein gemessen werden. Es werden ebenfalls Ultraschallwellen verwendet, wobei der Phasenversatz gemessen wird, der durch eine Schädigung oder Verwerfung erzeugt wird. Bei dieser Messmethode ist die richtige Kombination von Sensorik und Messobjekt sehr wichtig. Bei den MEMIN-Probekörpern hat sich herausgestellt, dass in der gegebenen Kombination an Messtechnik und Probenkörpergröße keine eindeutig verwertbaren Ergebnisse gewonnen werden konnten. Ein kurzer Überblick ist im Anhang IX nachzulesen.

## 1.2 Das MEMIN-Projekt (Phase I)

MEMIN (Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network) ist ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Projekt, das sich mit der Grundlagenforschung von Meteoriteneinschlägen auf Planeten beschäftigt. Sieben verschiedene Teilprojekte haben an Laboreinschlägen bzw. in Zusammenhang mit diesen Laborexperimenten gearbeitet. Jedes Teilprojekt verfolgt ein eigenständiges Ziel, das für die Gesamtcharakterisierung von Impaktprozessen von Interesse ist. Letztlich sollen die Ergebnisse aller Projekte in Zusammenhang gesetzt und dargestellt werden.

Die Motivation des MEMIN-Projektes liegt in der Erkenntnis und dem Bewusstsein, dass Einschläge von Festkörpern auf die Oberfläche von Planeten mit Überschallgeschwindigkeit zu den bedeutendsten geologischen Prozessen gehören. Dokumentiert sind solche Prozesse auf Planeten, Monden, Asteroiden und Kometen mit fester Oberfläche in unserem Sonnensystem. Auf der Erdoberfläche werden laut der *Earth Impact Database* (Spray und Elliot [2011]) aktuell 184 Impaktkrater gezählt. Ein Großteil der Einschläge wurde in Sedimenten oder Sedimentgestein identifiziert. Verschiedene Untersuchungen (z. B. in Kieffer [1971], Melosh [1989], Love et al. [1993] und Housen und Holsapple [2003]) zeigen, dass der Anteil der Porosität im

Gestein und die Wassersättigung der Gesteine eine wichtige Rolle bei der Kraterbildung spielen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden auch im MEMIN-Projekt verschiedene Materialien (Sandstein, Tuff und Quarzit) unter anderem mit veränderter Wassersättigung für die Experimente verwendet (Kenkmann et al. [2011], Poelchau et al. [2013a]).

Für die Durchführung von Hochgeschwindigkeitsexperimenten bedarf es spezieller „Schießanlagen“, die auch als Kanonen bezeichnet werden. Voraussetzung solcher Kanonen ist, dass sie Kugeln im Millimeter- bis Zentimeterbereich auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen können. Die Impaktversuche wurden mittels einer horizontal angeordneten Leichtgas-Hochgeschwindigkeitskanone (LGG = light gas gun) in den Räumen des Fraunhofer Ernst-Mach-Institutes (EMI) in Freiburg und Efringen Kirchen durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist geprägt von der Laboreinrichtung des EMI. Zwei Leichtgaskanonen unterschiedlicher Größenordnung beeinflussen die Parameterwahl für Projektil und Probekörper. Auch die Tatsache, dass mehrere Projekte aus den einzelnen Versuchen verwertbare Informationen benötigen, beeinflusst die Wahl der Parameter. Für die Experimente werden Materialien verwendet, die einem Impact auf der Erde möglichst ähneln. Die Projektile sollen dementsprechend einem Meteoriten ähnlich sein. Als Probekörpermaterial wurden verschiedene Gesteinsarten erschlossen. Hauptsächlich wurden die Versuche mit Seeberger Sandstein durchgeführt. Als weitere Probekörpermaterialien wurde Taunus Quarzit mit höherer Dichte und Weiberner Tuff mit geringerer Dichte als Sandstein verwendet. Genauso wie die Dichte ist entsprechend auch die Porosität der Gesteine unterschiedlich und proportional zur Dichte. Die Größe der Probekörper wird an die Schussanlage angepasst. Für die kleinere Schussanlage (SLGG, small light gas gun) wurden Probekörper mit 20 cm Kantenlänge verwendet. Bei der großen Schussanlage (XLLGG, extra-large light gas gun) wurden Probekörper mit einer Kantenlänge bis zu 80 cm verwendet. In Kapitel 5 werden auch Ergebnisse mit 100 cm Kantenlänge angesprochen, die aus der Pilotstudie des Projektes stammen. Um nicht nur im Grundmaterial eine Variation der experimentellen Parameter zu haben, wurden einige Probekörper mit Wasser gesättigt, wobei die Sättigung von 50 % bis 90 % variiert.

Das Verhältnis von Kugel zu Geschwindigkeit sollte dem Verhältnis eines Meteoritenimpaktes ähneln. Die Projektile in Kugelform hatten einen Durchmesser von 5 mm bis 12 mm. Die Leichtgaskanonen des EMI sind in der Lage, eine solche Kugelgröße auf Geschwindigkeiten von bis zu 8000 m/s zu beschleunigen. Auch bei den Projektile wurde das Material variiert, es bestand jedoch immer aus einem Metall. Neben Stahl (AISI 4130 und D290-1 Stahl) wurde auch ein Meteoritengestein (Campo del Cielo) und Aluminium (55X G28J1) verwendet. Die Dichte des Stahls ähnelt der des Campo del Cielo und soll somit eine preislich günstigere Alternative zum Meteoritengestein darstellen (Poelchau et al. [2013a]). Die einzelnen

Experimentparameter für Projektil, Probekörper und Versuchparameter, wie zum Beispiel Impaktenergie und Projektilfluggeschwindigkeit, sind in Tabelle 1-2 am Ende des Kapitels aufgeführt. Detaillierte Informationen zu den Probekörpern und Projektilen werden in Kapitel 1.2.2 gegeben.

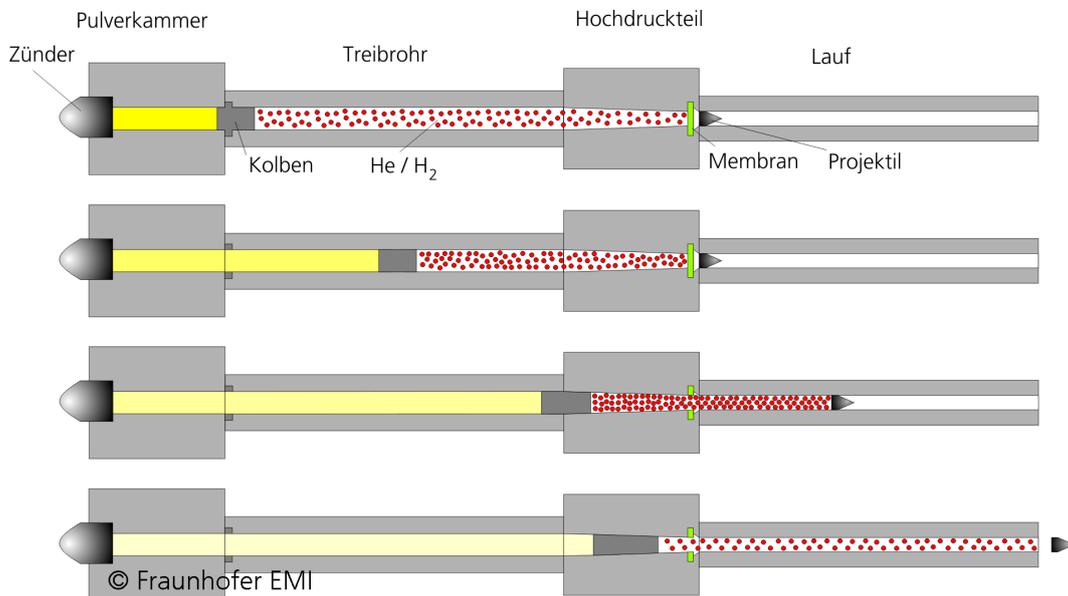


Abbildung 1-3: Schematischer Aufbau einer Leichtgaskanone des Ernst-Mach-Institutes (deutsche Version aus Lexow et al. [2013]).

In Abbildung 1-3 ist der schematische Aufbau einer Leichtgaskanone dargestellt. In die Pulverkammer des Schussrohres (links im Bild) wird ein Beschleunigungspulver eingefüllt (in der Abbildung links). Die Menge ist dabei abhängig von der erwünschten Geschwindigkeit der zu beschleunigenden Kugel und deren Masse. Durch einen separaten Auslöser außerhalb der Schussanlage wird das Beschleunigungspulver gezündet und dadurch ein Kolben in das Treibrohr gedrückt. Am Ende des Treibrohrs befindet sich eine Membran, die den Kolben vom Projektil trennt. Wird nun der Kolben durch die Zündung des Beschleunigungspulvers in das Treibrohr gedrückt, komprimiert sich das Gasgemisch (Wasserstoffgas). Sobald in dem Rohr ein bestimmter Druck überschritten wird, platzt die Membran auf. Durch das sich ausdehnende Gasgemisch wird die Kugel hinter der Membran auf Geschwindigkeiten bis zu 8000 m/s beschleunigt und trifft dann auf den Probekörper. Der Probekörper ist auf der anderen Seite des Rohres in einer Kammer (Targetkammer) mit Unterdruck aufgebaut (Abbildung 1-4). In der Targetkammer sind zusätzlich zum Probekörper ein *Ejecta*-Fänger gegenüber vom Probekörper sowie die Sensorik für die Schallemissionsanalyse (SEA) auf der Oberfläche des Probekörpers und in Bohrlöchern installiert. Außerhalb der Targetkammer wurden Hochgeschwindigkeitskameras (50, 54, 75 und 100 kfps (kiloframes per second))

aufgebaut (Hoerth et al. [2013]), sodass das Auftreffen des Projektils auf den Probekörper aufgezeichnet werden konnte. Die beiden Schussanlagen unterscheiden sich hauptsächlich in ihren Dimensionen. Die SLGG besitzt ein Kaliber von 40 mm mit einem Treibrohr von 1,8 m Länge. Daran schließt ein Lauf mit einem Kaliber von 8,5 mm und 1,5 m Länge an. Die SLGG erreicht Geschwindigkeiten von 8000 m/s bis 9000 m/s. Dagegen besitzt die XLLGG ein Kaliber von 154 mm mit einem 22 m langem Treibrohr und ein daran anschließenden Lauf mit einem Kaliber von 39 mm und einer Länge von 12 m. An der XLLGG werden Geschwindigkeiten um die 5000 m/s erreicht (Hoerth et al. [2013], Lexow et al. [2013], Poelchau et al. [2013a]).

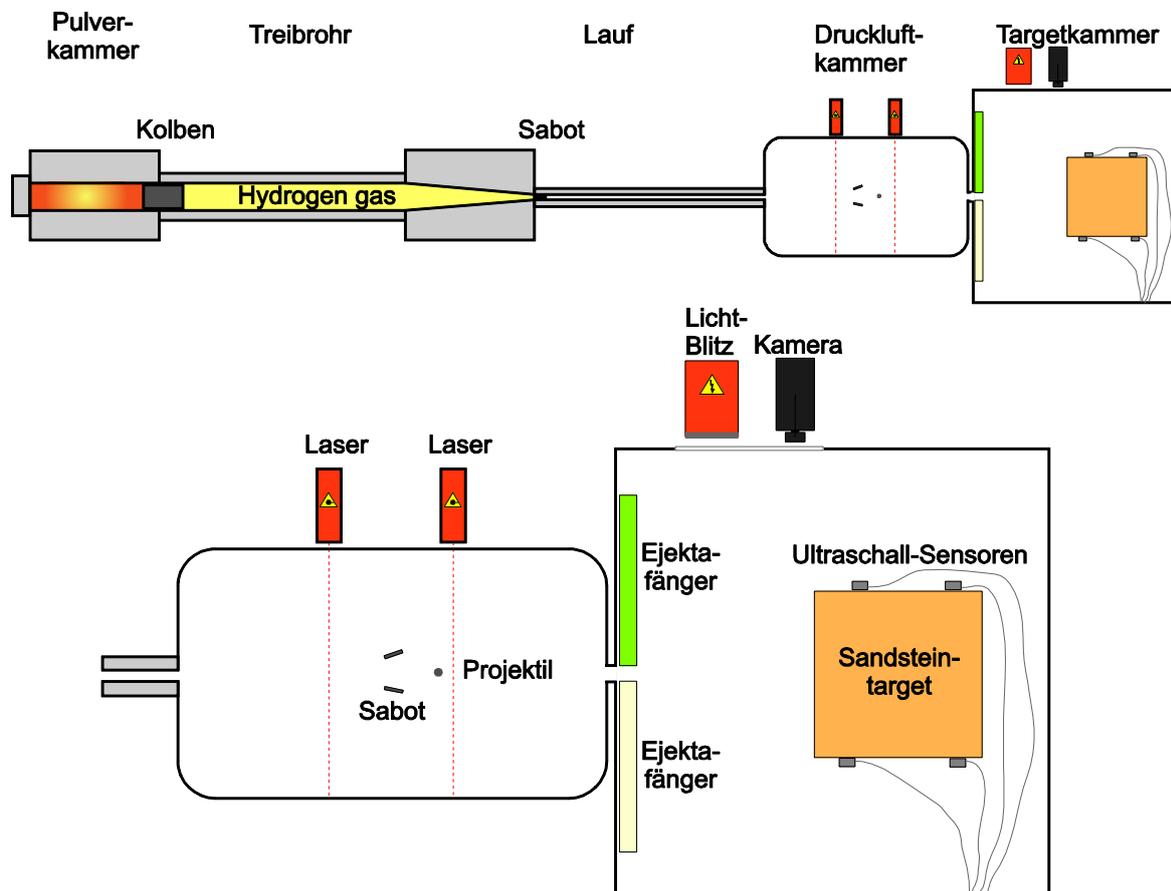


Abbildung 1-4: Oben: Vereinfachter schematischer Überblick einer zweistufigen Leichtgaskanone. Unten: Experimenteller Aufbau der MEMIN Experimente in der Targetkammer. Jeweils von oben betrachtet und nicht skaliert (modifiziert nach Poelchau et al. [2013a]).

### 1.2.1 Beschreibung der Impaktexperimente

Der typische Aufbau mit anschließender Durchführung der Experimente ist sehr zeitintensiv (etwa ein Arbeitstag) und mit der Beachtung vieler verschiedener Aufbauparameter verbunden. Das Experiment selber ist innerhalb weniger Minuten (max. 5 Minuten) abgeschlossen. Vier der sieben MEMIN-Teilprojekte sind bei jedem der Experimente anwesend gewesen und mussten verschiedenste Vorbereitungen treffen, um möglichst viele Informationen während der Experimente sammeln zu können. Aufgrund des hohen Aufwandes und der Beteiligung vieler Projekte bei den Experimenten, wurden bis zu sechs Experimente innerhalb einer Messwoche durchgeführt. Bei der XLLGG (*extra large light gas gun*) waren maximal drei Experimente pro Woche möglich, hier ist der Auf- und Abbau durch die Masse der Probekörper (Abbildung 1-5) aufwendiger als an der SLGG (*small light gas gun*).



Abbildung 1-5: Quarzit-Probekörper, der mit einem Kran aus der Targetkammer der XLLGG herausgehoben wird. Die Kantenlängen betragen hier 80 cm x 80 cm x 40 cm und das Gewicht liegt bei etwa 665 kg.

Bevor der Probekörper endgültig in der Targetkammer platziert werden konnte, wurde eine Zielscheibe auf die Impaktoberfläche aufgetragen (Abbildung 1-6, rechts). Der Mittelpunkt dieser Zielscheibe sollte möglichst identisch mit dem Impaktpunkt sein. Da die aufgetragenen Farben mit unterschiedlichen chemischen Elementen versetzt sind, können spätere chemische Analysen über die wiedergefundenen Elemente durchgeführt werden (Ebert et al. [2013]). Die unterschiedlichen Farben dienen der Rekonstruktion des Auswurfwinkels von dem ausgeworfenen Material. Gegenüber der Impaktoberfläche wurde ein *Ejecta*-Fänger angebracht, damit die Verteilung des

Auswurfmaterials (*Ejecta*) mittels der Farben nachvollzogen werden kann (Sommer et al. [2013]) (Abbildung 1-6, links). Um den Impact zu filmen, wurden außerhalb der Kammer eine Hochgeschwindigkeitskamera und Beleuchtungsmaterial aufgebaut. Dies dient der Rekonstruktion der Flugbahn der *Ejecta*, aber auch, um die charakteristischen Auswurfbilder zu erfassen (Hoerth et al. [2013]). Während der Experimente wurden die Schallemissionen des Impactes aufgezeichnet, die in dieser Arbeit und bei Moser et al. [2013b] diskutiert werden. Sensoren, Kabel und Messrechner wurden entsprechend vorbereitet. Details für den Aufbau der Schallemissionsanalyse (SEA) sind in Kapitel 3.1.1 nachzulesen.



**Abbildung 1-6:** Links: *Ejecta*-Fänger zum Auffangen der beim Impact ausgeworfenen Bruchstücke (*Ejecta*). Teilweise mit Vaseline (links) und Blumensteckmasse (rechts). Rechts: Auftragen der farbigen Zielscheibe für den Impact (vorne im Bild) und Anbringung der Sensortechnik für die Schallemissionsanalyse (hinten im Bild).

Nachdem der Versuchsaufbau abgeschlossen war, konnte die Targetkammer geschlossen und die Luft abgepumpt werden. War der Druck in der Targetkammer um den angesetzten Wert reduziert worden (auf bis zu 300 mbar bis 5 mbar, nahe Vakuum), konnten die letzten Vorkehrungen für den Start durchgeführt werden. Neben der Scharfstellung der Messinstrumente für die zerstörungsfreie Prüfung mussten auch die Hochgeschwindigkeitskamera und die Schussanlage entsprechend vorbereitet werden. Für die Schussanlage wurde, nachdem der Kolben, die Membran und das Projektil mit Sabot (eine Art Halterung für das Projektil, das sich während des Fluges vom Projektil abspaltet) in das Schussrohr eingebaut worden sind (Abbildung 1-3), auch das Beschleunigungspulver hinzugefügt (im vorderen Bereich des Schussrohres, Abbildung 1-7). Die Sicherheitsvorkehrungen bei dieser Art von Experimenten sind sehr groß, da hier explosive Stoffe verwendet werden. Genauere Informationen zur Leichtgaskanone sind unter Lexow et al. [2013] nachzulesen.



Abbildung 1-7: Blick auf die XLLGG. Zu sehen ist hier die Öffnung der Pulverkammer, in die das Beschleunigungspulver eingefüllt wird (Hoerth et al. [2013]).

Im Anschluss an den Schuss wurden für die erwarteten Aufzeichnungen von Rissereignissen innerhalb der Probekörper mittels SEA insgesamt zwei Minuten gewartet, bis alle Mitarbeiter wieder aus dem Zündraum (Aufenthaltsraum während des Schusses) durften. Dies sollte externe Geräusche (Rauschen oder Noise) reduzieren. Die Targetkammer konnte aufgrund des Unterdruckes und des aufgewirbelten Staubes nicht sofort geöffnet werden. Zuerst wurde die Kammer wieder mit Luft gefüllt. Damit sich der Gesteinsstaub etwas legen konnte, wurde circa eine halbe Stunde gewartet. Erst danach wurde die Kammer geöffnet und das Ergebnis der Experimente konnte besichtigt werden. Ist das Projektil mittig eingeschlagen? Wie sieht die Kraterstruktur aus? Sind alle Sensoren noch an Ort und Stelle? Danach wurden die *Ejecta*, die auf den Boden gefallen waren, eingesammelt und eventuelle Reste vom Projektil mit einem Magneten ausfindig gemacht. Später wurden wieder Tests zur Überprüfung der Messtechnik mit der SEA Messanlage durchgeführt.

Anschließend wurden noch der *Ejecta*-Fänger und der Probekörper aus der Targetkammer entfernt. Das Abwiegen des Probekörpers vor und nach dem Experiment lässt auf Verluste der Masse rückschließen, die durch den Impakt aus dem Probekörper entstanden sind. Danach wurde die Kammer sofort für den nächsten Impaktversuch vorbereitet. Weitere durchgeführte Arbeiten werden kurz in Kapitel 1.2.3 erläutert.

### 1.2.2 Probekörper und Projektile

Als Probekörpermaterial wurden verschiedene Gesteinsarten genutzt. Die meisten Versuche wurden mit Seeberger Sandstein (Abbildung 1-8, links) durchgeführt, der von der TRACO GmbH in Deutschland bezogen wurde. Dieser Sandstein wurde speziell ausgesucht. Bei dem Sandstein handelt es sich um einen fluviatil abgelagerten Sandstein aus dem Oberen Trias (Oberes Norium-Rheatium, 209-200 Ma (Stück et al. [2011])), abgebaut in einem Steinbruch. In verschiedenen Einrichtungen der MEMIN-Partner wurde der Sandstein auf seine Korngröße ( $100 \pm 25 \mu\text{m}$ ), Quarzgehalt (89 vol%), Rohdichte ( $2,05 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ ), durchschnittliche Porosität ( $23,1 \pm 0,5 \%$ ), uniaxiale Druckfestigkeit (trocken:  $67,3 \pm 2,7 \text{ MPa}$ ; 55 % gesättigt:  $55,8 \pm 1,5 \text{ MPa}$ ; 90 % gesättigt:  $58,4 \pm 0,8 \text{ MPa}$ ) und Zugfestigkeit (trocken:  $4,1 \pm 0,7 \text{ MPa}$ ; 55 % gesättigt:  $3,4 \pm 0,5 \text{ MPa}$ ; 90 % gesättigt:  $4,3 \pm 0,4 \text{ MPa}$ ) untersucht (Poelchau et al. [2013a]).



**Abbildung 1-8: Drei Probekörper aus den drei unterschiedlichen Materialien. Von links nach rechts: Trockener Seeberger Sandstein mit Krater nach dem Experiment; Trockener Taunus Quarzit vor dem Experiment mit Zielscheibe; Wassergesättigter Weiberner Tuff vor dem Experiment mit Zielscheibe und befestigten Sensoren.**

Als weitere silikatreiche Probekörpermaterialien wurden Taunus Quarzit (Abbildung 1-8, Mitte) und Weiberner Tuff (Abbildung 1-8, rechts) verwendet. Der Quarzit stammt von dem Taunus-Quarzit Werk GmbH & Co.KG in Deutschland. Es handelt sich um einen 405 Millionen Jahre alten Sandstein mit niederer variskisch-metamorpher Überprägung. Das Gestein hat eine Dichte von  $2,62 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  und eine Porosität von  $\leq 1 \%$ . Das Gestein besitzt eine erkennbare Schichtung, die Millimeter dicke grünliche Phyllo-Silikate enthält. Die Korngröße liegt bei  $185 \mu\text{m}$ , außerdem sind Minor Muskovite enthalten (persönlicher Kontakt: Poelchau [2013b]). Der Tuff wurde bei Kalenborn Naturstein GmbH in Deutschland erstanden. Es handelt sich um ein vulkanisches Gestein aus dem Quartär. Das Gestein ist sehr feinkörnig (Korngröße  $10 \text{ mm}$ ) und hochporös. Es liegt keine erkennbare Schichtung vor. Das Gestein enthält ca. 12 % größere Körnung, die von der feinkörnigen Matrix umgeben

ist (Stück et al. [2008]). Es handelt sich um einen Mix aus Quarzit, Schiefer, Bimsstein, Basaltgestein, Leuzit, Nephelin Phenokristallen, Hornblende, Augit, Plagioklas und Biotit. Die Dichte liegt bei  $1,42 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  und laut Stück et al. [2008] weist das Gestein eine Porosität von  $43,08 \pm 0,4 \%$  auf (persönlicher Kontakt: Poelchau [2013b]).

Ähnlich wie die Dichte und die Porosität spiegelt auch die Kompressionswellengeschwindigkeit die Unterschiede der Probekörper wieder. Tabelle 1-1 zeigt die gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten für jedes Probekörpermaterial für alle drei Raumrichtungen. Die angegebenen Werte wurden aus Einzelmessungen in der Mitte der Probekörper für jede Raumrichtung oder aus den Ultraschall-Tomographie (UST) Messungen gemittelt. In Tabelle 1-1 werden die Werte auf 50 m/s genau angegeben und zeigen somit einen gerundeten Wert. Die Ergebnisse werden für die drei Raumrichtungen einzeln gezeigt, da dort deutliche Unterschiede innerhalb des Sandsteins und des Quarzits zu erkennen sind. Diese Unterschiede werden auf die Schichtung im Gestein zurückgeführt. Bei dem Quarzit wurde nicht von einer Schichtung ausgegangen, bei genauerer Betrachtung werden aber Toneinlagerungen im Gestein sichtbar, die eine Minderung der Geschwindigkeit herbeiführen. Die Erkenntnisse der Schichtung stammen aus den Ergebnissen der UST, die noch ausführlicher in Kapitel 4.2 besprochen werden.

**Tabelle 1-1: Kompressionswellengeschwindigkeiten (in m/s) der drei verwendeten Probekörper in allen drei Raumrichtungen. Der Sandstein hat eine Kantenlänge von 50 cm, hier wurden nur Messungen in der Mitte der Probekörper durchgeführt. Der Quarzit und Tuff haben jeweils eine Kantenlänge von 20 cm, die Daten stammen hier aus der Ultraschall-Tomographie.**

<b>Probekörpermaterial</b>	<b>x-y</b>	<b>x-z</b>	<b>y-z</b>
Sandstein (D1)	3000±10	3050±10	2850±10
Quarzit (A22)	4500±100	4950±60	5000±80
Tuff (A25)	2050±30	2150±50	2100±60

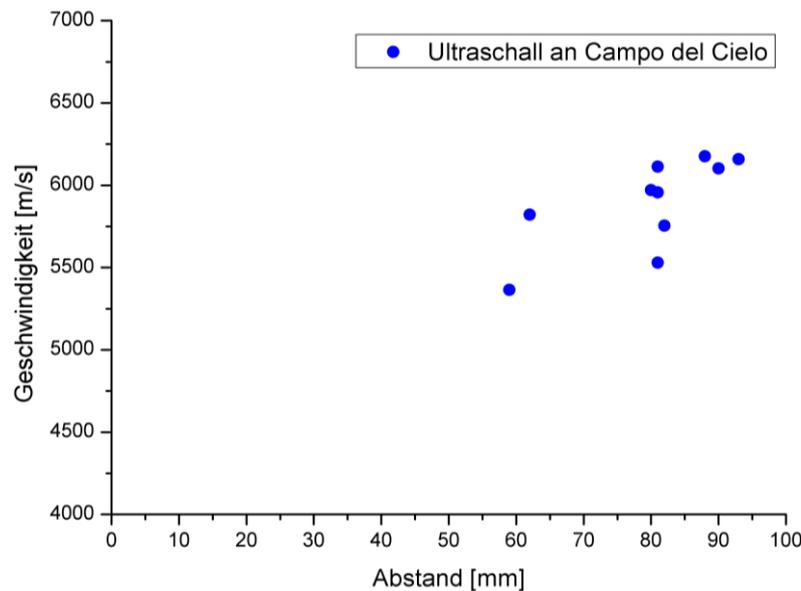
Alle Werte sind in m/s angegeben.

Die Probekörper wurden, ebenso wie die Projektile in der Größe variiert. Die kleinsten Probekörper besitzen eine Kantenlänge von 20 cm für alle Seiten. Die größten Probekörper besitzen eine Fläche von 80 cm x 80 cm für die Impaktoberfläche und 50 cm in der Tiefe. Teilweise wurden auch Probekörper mit Wassersättigung für die Impaktexperimente verwendet. Die Wassersättigung konnte nicht exakt bestimmt werden und wurde daher durch das Einwiegen vor den Experimenten abgeschätzt. Wannen unterhalb der Probekörper wurden verwendet, um das Wasser aufzufangen, das die Probekörper während der Lagerung in der Targetkammer wieder verloren (*ausgeschwitzt*) haben. Dieser Anteil wurde ebenfalls für die Abschätzungen des Wassergehalts berücksichtigt.



**Abbildung 1-9: Bruchstück vom Meteoritengestein Campo del Cielo (ca. 6 kg, 18 cm x 10 cm x 10 cm) (links), angefertigtes Projektil (10 mm Kugel, Campo del Cielo) für ein Impaktexperiment (Mitte) und ein Stück des Projektils nach dem Impact (rechts).**

Als Projektile wurden Kugeln mit einem Durchmesser von bis zu 12 mm verwendet. Das Material wurde bei den einzelnen Versuchen variiert, bestand jedoch immer aus einem Metall. Neben Aluminium (55X G28J1) und Stahl (AISI 4130 und D290-1 Stahl) wurde auch ein Meteoritengestein verwendet (Abbildung 1-9). Die Kugeln aus Meteoritengestein wurden aus einem auf die Erde gestürzten Meteoriten mit dem Namen Campo del Cielo (CdC) gefertigt. Der CdC gehört zu der Gruppe der Eisenmeteorite und beinhaltet neben 92 % Eisen (Fe) auch 6,6 m% Nickel (Ni) und 0,4 m% Kobalt (Co). Die Dichte des CdC variierte für die einzelnen Projektile zwischen  $7,83 \text{ g/cm}^3$  und  $7,91 \text{ g/cm}^3$  (Ebert et al. [2013], Poelchau et al. [2013a]) und die Kompressionswellengeschwindigkeit liegt bei etwa 6000 m/s. Dies wird auch in Abbildung 1-10 gezeigt, wo die Ergebnisse einer Ultraschalluntersuchung am CdC dargestellt werden. Die Daten wurden mit Durchschallungsmessungen ermittelt. Die verwendeten UPE-D und UPG-D Sensoren werden in Kapitel 3.2.2 näher beschrieben. Die Geschwindigkeit schwankt relativ stark. Dies könnte unter anderem an der starken Oxidation an der Oberfläche des Meteoriten oder an der sehr schlecht messbaren Messstrecke (die Oberfläche ist sehr uneben) liegen. Der D290-1 Stahl mit einer Dichte von  $8,1 \text{ g/cm}^3$  zeigt ähnliche Eigenschaften wie das Meteoritengestein. Die Hauptbestandteile sind Wolfram (W: 6,3 m%), Kobalt (Co: 5,1 m%), Molybdän (Mo: 4,8 m%), Chrom (Cr: 4,2 m%), Vanadium (V: 1,9 m%), Nickel (Ni: 0,3 m%) und Mangan (Mn: 0,2 m%) (Poelchau et al. [2013a]). Stahl hat eine durchschnittliche Kompressionswellengeschwindigkeit von 5100 m/s (Kuchling [1980]), wobei dies von der genauen Zusammensetzung abhängig ist. Für Aluminium wird eine Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  und eine Kompressionswellengeschwindigkeit von 5110 m/s nach Kuchling [1980] angenommen. Die Parameter für Projektil, Probekörper und Versuchsparameter (zum Beispiel Impaktenergie und Projektilfluggeschwindigkeit) sind in Tabelle 1-2 angegeben.



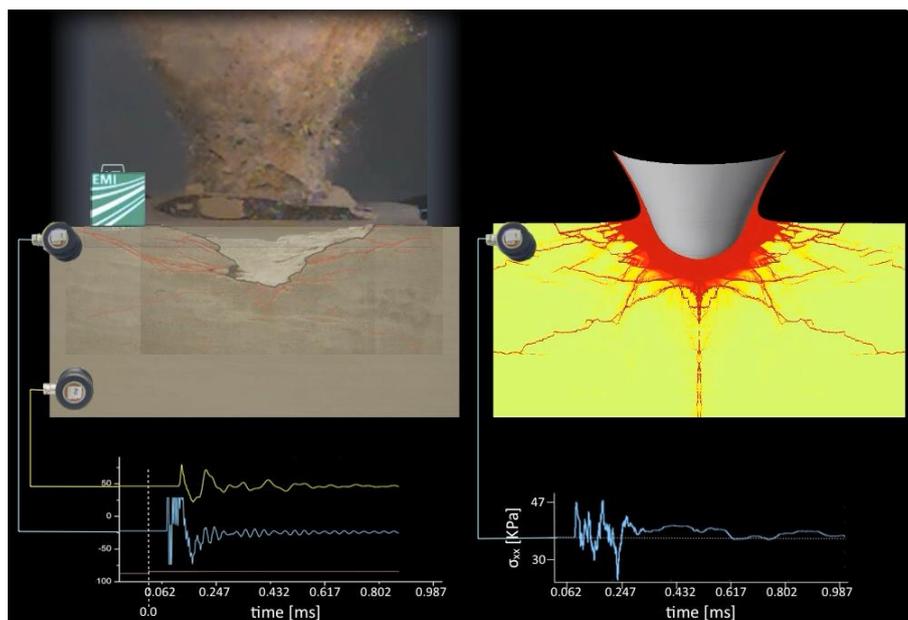
**Abbildung 1-10: Ultraschall-Messungen an einem Meteoriten (s. Abbildung 1-9, links). Durch unterschiedlich starke Oxidation an der Oberfläche entsteht eine große Spanne an Messwerten.**

### 1.2.3 Die Teilprojekte

Insgesamt beschäftigen sich sieben von ursprünglich acht Teilprojekten mit den verschiedensten Gegebenheiten und Aufgaben der Impaktexperimente. Projekt 3, das die geschädigten Probekörper mit Geoelektrik und elektromagnetischen Verfahren untersuchen sollte, wurde für die MEMIN-Forschungsgruppe nicht bewilligt und daher auch nicht bearbeitet.

Projekt 1 ist das Kernprojekt und verantwortlich für die Durchführung der Impaktversuche. Zusätzlich steuert Projekt 1 zum besseren Verständnis der Impakte bei, indem dort der Zeitpunkt des Impaktes mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet wurde (Hoerth et al. [2013]). Die Aufzeichnungen geben Aufschluss über die Form des Auswurfkegels bei Impakten und können helfen, die Flugbahnen einzelner Bruchstücke des Auswurfmaterials (*Ejecta*) zu rekonstruieren. Die Rekonstruktion der Flugbahn wird gestützt von Bruchstücken, die in dem *Ejecta*-Fänger direkt gegenüber der Probekörperoberfläche, an der der Impakt stattfand, eingefangen werden konnten. Im Laufe der Experimente wurde dazu übergegangen, eine dreifarbige Zielscheibe auf die Probekörperoberfläche aufzutragen. Somit können die aufgefangenen Bruchstücke über ihre Farbe zurückverfolgt werden. Über die Lage der *Ejecta* kann dann der Auswurfwinkel der Bruchstücke in Abhängigkeit von der Entfernung des Kratermittelpunktes ermittelt werden. Die Rekonstruktion der Flugbahnen wurde vorwiegend von Projekt 6 durchgeführt. Projekt 6 beobachtet in diesem Zusammenhang auch die Kraterstruktur und Größe in Abhängigkeit von Wassersättigung, Porosität und Schichtung der Probekörper (Dufresne et al. [2013], Sommer et al. [2013], Poelchau et al. [2013a]). Die Prozesse, die im Krater durch das

Aufeinandertreffen von Probekörper und Projektil ablaufen, wurden im Detail von Projekt 8 behandelt (Ebert et al. [2013], Kenkmann et al. [2013]). In Projekt 2 wird die Schädigung im Kraterbereich mikroskopisch untersucht und somit das sogenannte ‚crushen‘ (zerdrücken) der Poren erforscht, wobei die Verdichtung, Festigkeit und Spannung im geschockten, porösen Material genauer untersucht wird (Buhl et al. [2013]). Projekt 4, das in dieser Arbeit im Detail erörtert wird, war dafür zuständig, die Schädigung durch den Impakt im gesamten Probekörper durch zerstörungsfreie Prüfverfahren zu untersuchen und darzustellen (Moser et al. [2013], Moser et al. [2013b]). Ebenso wurden numerische Modelle der Impaktprozesse aufgestellt und durch die gemessenen Daten aus den Laborversuchen angepasst (Projekt 5) (Güldemeister et al. [2013a]). Projekt 7 untersuchte direkte Prozesse innerhalb des Gesteins. Dabei wurden die niederen Prozesse der Stoßwellenmetamorphose in Quarz unter Berücksichtigung der Porosität und Wassersättigung untersucht (Kowitz et al. [2013]).



**Abbildung 1-11: Vergleich zwischen experimentell erhaltenen Daten (links) und numerischer Berechnung (rechts) des Impaktes (persönlicher Kontakt: Wünnemann [2013]).**

In Abbildung 1-11 bekommt man einen Eindruck, wie die einzelnen Projekte miteinander in Verbindung standen. Dort wird eine Aufnahme eines Impaktexperimentes (Projekt 1, links) neben der numerischen Simulation eines Impaktes (Projekt 5, rechts) gezeigt. Ebenfalls zu sehen sind die von Projekt 4 verwendeten Sensoren mit den aufgezeichneten Signalen (im linken Bild), die Informationen für die numerischen Berechnungen liefern und ebenfalls in der numerischen Darstellung (hier auch als numerisches Signal) enthalten sind. Beide

Standbilder (experimentell und numerisch) zeigen zudem ein Schnittbild durch den entstandenen Krater. In beiden Schnittbildern sind die sichtbaren Risse rot markiert. Die Schädigungszone unterhalb des Kraters wird in dieser Arbeit untersucht und diskutiert (Projekt 4). In Projekt 2 wird die Zone direkt unterhalb des Kraters (ca. 1-2 cm tief) betrachtet. Hier entsteht eine Kompression des Materials. Anhand der Videos kann in Projekt 6 zusätzlich die Flugbahn der *Ejecta* rekonstruiert werden.

**Tabelle 1-2: Schussparameter für die Laborexperimente**

Targetbezeichnung (Experimentnummer)	Target- material	Targetgröße [cm]	Projektilmaterial	Projektildurch- messer [cm]	Impaktgeschwin- digkeit [m/s]	Impakt- energie [J]	Kammer- druck [mbar]	Schuss- Anlage
A3 (5124)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5000	838,50	5	SLGG
A5 (5125)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5100	872,64	100	SLGG
A6 (5126)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	4800	772,99	100	SLGG
A7 (5127)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	4900	804,3	100	SLGG
A8 (5128)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5100	873,94	100	SLGG
A11 (5181)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5300	941,02	100	SLGG
A12 (5183)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5250	919,21	60	SLGG
A13 (5182)	Sandstein	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5250	931,61	100	SLGG
A15 (5185)	Sandstein	20x20x20	Aluminium 55X28J1	0,5	6970	4352,85	1	SLGG
A16 (5186)	Sandstein	20x20x20	Aluminium 55X28J1	0,25	7750	672,70	1	SLGG
A20 (5339)	Quarzit	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5430	986,27	100	SLGG
A22 (5340)	Quarzit	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5320	943,89	100	SLGG
A24 (5341)	Tuff	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5570	1037,78	100	SLGG
A25 (5342)	Tuff	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5400	968,11	100	SLGG
A26 (5343)	Tuff	20x20x20	D290-1 Stahl	0,25	5480	1007,52	100	SLGG
D2 (3296)	Sandstein	50x50x50	Fe-Meteorite	1,0	4400	39688,00	~300	XLLGG
D3 (3298)	Sandstein	50x50x50	Fe-Meteorite	1,0	4560	42834,82	305	XLLGG
D4 (3299)	Sandstein	50x50x50	Fe-Meteorite	1,0	3500	25357,50	340	XLLGG
D5 (3300)	Sandstein	50x50x50	Fe-Meteorite	1,0	2500	12875,00	390	XLLGG
E1 (3382)	Sandstein	50x80x80	D290-1 Stahl	1,2	4560	76031,8	280	XLLGG
E2 (3383)	Sandstein	50x80x80	D290-1 Stahl	1,2	4580	76805,09	310	XLLGG
E3 (3384)	Sandstein	50x80x80	Fe-Meteorite	1,2	4590	74654,81	292	XLLGG
E4 (3450)	Sandstein	50x80x80	D290-1 Stahl	1,2	4680	80338,00	275	XLLGG
E5 (3451)	Tuff	50x80x80	D290-1 Stahl	1,2	4757	82731,80	270	XLLGG
E6 (3452)	Quarzit	40x80x80	D290-1 Stahl	1,2	4709	81059,55	295	XLLGG

Die Werte stammen von den Experimenten und sind teilweise auch bei Poelchau et al. [2013a] nach zu lesen.

## 2. Hintergrund

Das folgende Kapitel ist sehr kurz gehalten und soll eine Brücke zwischen den beiden Fachrichtungen Geophysik und Zerstörungsfreie Prüfung schlagen. Während die Geophysik sich mit dem Aufbau der Erde beschäftigt und sich dabei der physikalischen Grundlagen bedient, beschäftigt sich die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) mit der Analyse von Bauwerken oder Bauteilen im Bau- und Maschinenwesen (z. B. Häuser, Brücken, Bauteile aus Metall oder Karbon). In beiden Fachrichtungen wird bei den Untersuchungen die Kenntnis über das Verhalten elastischer Wellen mit einbezogen, jedoch werden jeweils andere Dimensionen (zum Beispiel bei der Wellenlänge) betrachtet.

### 2.1 Geophysik

Die Geophysik beschäftigt sich mit der Erforschung und Beschreibung der Erde mit Hilfe geophysikalischer Messmethoden und bedient sich dabei physikalischer Grundlagen. Durch die Vermessung physikalischer Felder wird auf den Aufbau der Erde, physikalische Vorgänge und lokale Anomalien unterhalb der Erdoberfläche geschlossen. Zur Erkundung und Messung der Daten werden aufwendige und kostspielige Messkampagnen durchgeführt, die einige Wochen oder sogar Monate bzw. Jahre (vor allem bei zeitlich veränderlichen Feldern) in Anspruch nehmen können (Berckhemmer [1990]). Es gibt weltweite Messstationen, die dauerhaft die Erschütterungen der Erde aufzeichnen und somit eine Lokalisierung von Erdbeben auf wenige Meter genau ermöglichen. Aus solchen Dauerüberwachungen können dann auch die tektonischen Bewegungen der Erdplatten erfasst werden. Messungen mit Georadar, Magnetotellurik, Reflektionsseismik oder zum Beispiel Geoelektrik werden meist für lokale Messungen herangezogen. Ein Beispiel für eine lokale Messung stellt die Suche nach einem Salzstock oder die Untersuchungen an Impaktkratern dar. Die Schädigung, die durch den Impakt bei den MEMIN-Experimenten unterhalb der Krater entsteht, wird auch als lokale Schädigung betrachtet. Ein sehr gut untersuchter Impaktkrater ist der Meteor Krater (Barringer Krater) in Arizona (Abbildung 2-1). Er ist der erste Krater, der auf der Erde entdeckt worden ist und besitzt einen Durchmesser von etwa 1200 m und eine Tiefe von 180 m (Shoemaker [1987]). Es ist bekannt, dass sich die Schädigung grundsätzlich radialsymmetrisch in alle Richtungen (im Untergrund) ausbreitet (Ackermann und Godson [1975]). Somit hat die Kraterstruktur im Untergrund einen noch größeren Durchmesser. Bei einem Umfang der Erde von circa 40.074 km (World Geodetic System 1984 (WGS 84) NGA [1984]) kann somit auch eine Kraterstruktur als ein lokales Problem in der Geophysik behandelt werden.

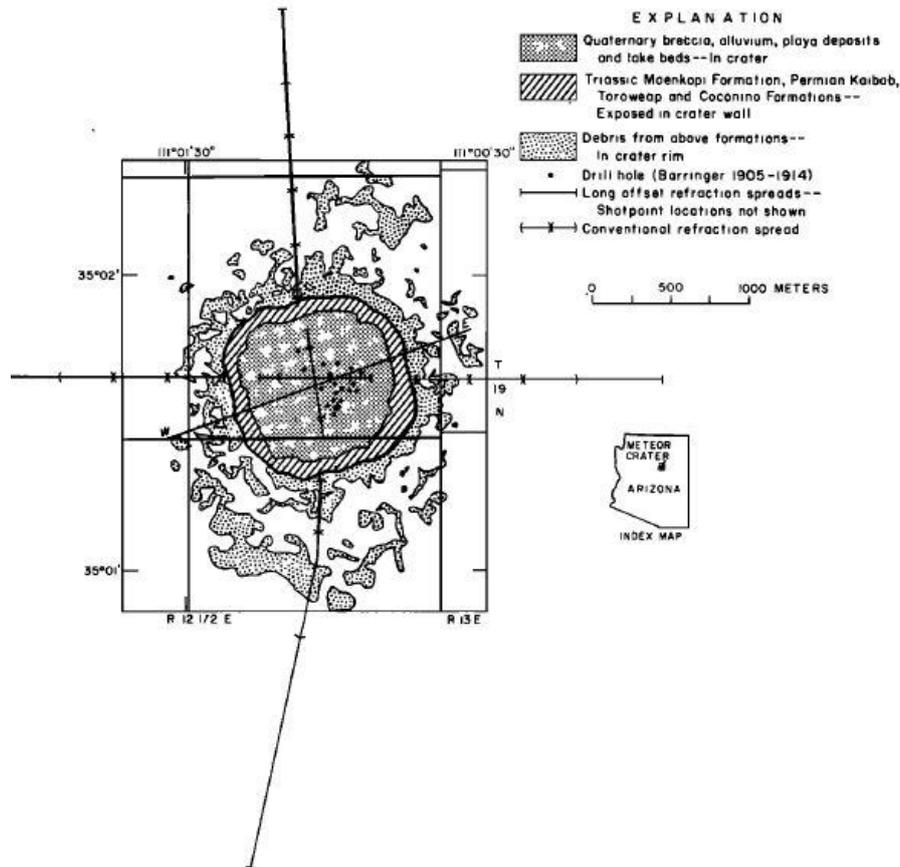


Abbildung 2-1: Geologische Karte des Meteor Kraters in Arizona mit seismischen Profilen (Ackermann und Godson [1975]).

## 2.2 Zerstörungsfreie Prüfung

Anders als die Geophysik hat die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) im Bereich des Bauwesens und des Maschinenwesens das Ziel, den Zustand eines Materials oder Bauteils zu charakterisieren. Weitere Bereiche, in denen zerstörungsfreie Prüfmethoden auch angewendet werden, sind die Medizintechnik, Wehrtechnik und die Entwicklung neuer Materialien. Die zerstörungsfreien Prüfmethoden orientieren sich oft an geophysikalischen Messmethoden. So kann die Schallemissionsanalyse (SEA) (Kapitel 3.2.1) mit seismischen Analysen der Erdbebenlokalisierung verglichen werden, Ultraschallmessungen können mit Seismik-Messungen gleichgesetzt werden und das Radargerät beruht wie das Georadar auf elektromagnetischer Strahlung (Große [2011]). Gängige Methoden der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen sind zum Beispiel die Infrarot-Thermographie (beruhend auf Wärmestrahlung), der Ultraschall (US) und das Impakt-Echo-Verfahren, die SEA, radiographische Verfahren, Potentialfeldmessungen und Standardmessungen, wie die mit einem Rückprallhammer oder die Endoskopie (Sichtmessungen) (Große [2011]). Die ZfP soll von der Grundidee her die Qualität und Sicherheit im Bauwesen und in der Fertigung von Baustoffen bzw. Metallen sicherstellen. Daher muss damit gerechnet werden, dass es

zu einer Schadensermittlung oder sogar zu einer Wertminderung kommt. Durch die verschiedensten Randbedingungen und die große Anzahl unterschiedlichster Geometrien im Bauwesen ist es bislang nicht gelungen, die einzelnen Messungen zu vereinheitlichen (Große [2011]). Ultraschall gehört zu den gängigsten Verfahren der ZfP. Da Ultraschall als ungefährlich eingestuft werden kann und weil er, ähnlich wie Licht, gut gebündelt werden kann, wird Ultraschall in den verschiedensten Anwendungsgebieten als zerstörungsfreie Prüfmethode angewendet (Vogel [1995]).

Auch die Modalanalyse ist eine Methode, die im Bereich der Geophysik angewendet wird. In der ZfP werden mit diesem Prüfverfahren die elastischen Konstanten der Probekörper ermittelt. Auch in der Geophysik die elastischen Parameter von Bedeutung. Meist werden die elastischen Parameter nur für bestimmte Materialien direkt und nur an Proben gemessen oder über andere Parameter (Wellengeschwindigkeiten, Spannung und Dehnung, Poissonzahl, Schermodul, Kompressionsmodul) berechnet. Aber auch die Eigenschwingungen der Erde können bestimmt werden. Seismometer, die auf der ganzen Erde verteilt sind, nehmen die Schwingungen auf und können so dauerhafte Schwingungen und deren Frequenzen, aber auch solche von lokalen Erdbeben, aufzeichnen (siehe unter Anderem bei Rosat et al. [2005]). Die Tomographie, wie sie in den Kapiteln 3.2.2 und 3.2.4 vorgestellt wird, ist vergleichbar mit den Methoden der Teleseismischen Tomographie oder Lokalbeben tomographie. Hierbei werden Erdbeben und die daraus resultierende Wellenausbreitung innerhalb der Erde für eine Analyse des Untergrundes genutzt (siehe unter Anderem bei Ritter et al. [1997]).

### **2.3 Zusammenhang zwischen Geophysik und zerstörungsfreier Prüfung**

Es hat sich gezeigt, dass die zerstörungsfreien Prüfverfahren von den Erfahrungen und der Messtechnik in der Geophysik profitieren konnten und auch in Zukunft Parallelen in Betracht gezogen werden müssen. Viele Messtechniken finden sich in beiden Fachrichtungen wieder. So sind Ultraschall (US) bzw. Seismik, Schallemissionsanalyse (SEA) bzw. Seismologie, RADAR bzw. Georadar, Vibrations- bzw. Eigenschwingungsanalyse methodisch jeweils eng miteinander verwandt und meist nur in unterschiedlichen Größenskalen zu betrachten (Große [2011]).

Die vorliegende Arbeit testet die zerstörungsfreien Prüfmethoden und evaluiert deren Einsatz in der Natur an terrestrischen Kratern mit geophysikalischen Messmethoden. Ähnlich wie bei der hier angewendeten Ultraschall-Tomographie (UST) (Kapitel 3.2.2) wird in der Geophysik Reflektionsseismik für die Darstellung des Untergrundes verwendet. Bei den hier vorgestellten Experimenten ist es mit der UST möglich, Messungen von allen Seiten der Probekörper in x-, y- und z-Richtung durchzuführen. Diese Möglichkeit ist auf der Erde nicht gegeben, hier werden ausschließlich

Messungen von der Oberfläche aus in die Tiefe vorgenommen. In einigen Fällen werden auch Bohrlöcher an der Erdoberfläche für vertikale Messungen verwendet. Dabei werden Wellen in die Erde gesandt. Durch die Reflektion an Schichtgrenzen können die modifizierten Wellen wieder aufgezeichnet werden und geben dann ein sehr präzises Bild des Untergrundes wieder. Die Ultraschallprüfung wird in dieser Arbeit in Form von Durchschallung ausgeführt. Da die Oberfläche innerhalb der Krater sehr porös ist, werden keine Messungen im Krater durchgeführt. Daher werden Messungen in Reflektion vorerst ausgeschlossen. Zusätzlich ist die Probekörperoberfläche deutlich von der Kraterstruktur bestimmt und lässt daher nur wenig Platz zur Auflage der Sensoren. Ähnlich der Modalanalyse (MA) (Kapitel 3.2.3), die die Schwingungscharakteristik von Materialien ausnutzt, wird die Vibrationsseismik angewendet. Dazu wird eine bestimmte Frequenz mit einem Vibroseis in den Untergrund emittiert und das reflektierte Signal analysiert. Bei der MA wird das Prüfobjekt ebenfalls in Schwingung versetzt, hier mit Hilfe eines Hammers. Mit einem an dem Prüfkörper befestigten Sensor können die uniaxialen oder triaxialen Schwingungskomponenten aufgezeichnet und die Schwingungsmoden identifiziert werden. Der Vorteil in der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ist in jedem Fall die Größe des Prüfobjektes. Es ist hier sehr viel einfacher, detaillierte Messungen durchzuführen, da der Probekörper oft von mehreren Seiten zugänglich ist und, bei guter Dokumentation die enthaltenen Materialien bekannt sind. Der kleine Umfang der Probekörper führt jedoch oft zu schwierigen Messbedingungen. Zum Beispiel muss bei den Versuchen darauf geachtet werden, die passenden Frequenzen zu verwenden, damit die gesuchte Geometrie überhaupt erfasst werden kann. Die Messmethoden ermöglichen letztlich einen Aufschluss darüber, welche Erwartungen an die geophysikalischen Messungen gestellt werden können. Zusätzlich können die Ergebnisse aus den ZfP-Verfahren mit weiteren zerstörenden Verfahren bestätigt werden.

### 3. Methodische und experimentelle Grundlagen

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Grundlagen der angewendeten Messmethoden. Einführend wird auf die charakteristischen elastischen Eigenschaften von Materialien eingegangen, die für die Messmethoden von Bedeutung sind. Anschließend werden die angewandten Methoden, das jeweils dafür verwendete Messsystem und das Prinzip der Messung dargestellt. Zusätzlich werden spezifische experimentelle Voraussetzungen für die durchgeführten Experimente erörtert. Da sich diese Arbeit vorwiegend damit auseinandersetzt, welche Messmethoden zur Analyse von Schädigungszonen (hier unterhalb von Impaktkratern) geeignet sind, wird sich bei der Anwendung der Methoden auf genau diese Problemstellung konzentriert. Die hier verwendeten Methoden wurden bereits in verschiedenen Dissertationen, Artikeln oder Büchern sehr genau beschrieben. Auf die fachbezogene Literatur wird im jeweiligen Unterkapitel hingewiesen.

#### 3.1 Charakteristische Eigenschaften von Material und Messung

Für die Untersuchungen an Naturgestein, so wie auch bei allen anderen Materialien, sollten einige Materialeigenschaften bekannt sein oder man sollte sich zumindest dieser Eigenschaften bewusst sein. Diese Kenntnis ist vor allem in Hinblick auf die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten wichtig. In Kapitel 1.2.2 wurde bereits näher auf die Charakterisierung von Probekörper und Projektil eingegangen.

Alle hier diskutierten Messungen beruhen auf den elastischen Eigenschaften der Probekörper. So ist die Kenntnis über die Ausbreitung der elastischen Wellen vor allem für die Schallemissionsanalyse (SEA) und die Ultraschall-Tomographie (UST) eine wichtige Grundlage. Die Frequenzen elastischer Wellen, die hier in Form von Ultraschall (US) verwendet werden, bewegen sich im Bereich von 15 kHz bis etwa 10 GHz (Vogel [1995]). In Festkörpern werden hauptsächlich die Raumwellen betrachtet, die sich kugelförmig um die Quelle herum im Medium ausbreiten. Die Kompressionswelle, welche in der Ausbreitungsrichtung wie eine Druckwelle schwingt, wird immer zuerst registriert. Daher stammt auch der Name P-Welle (P = primär) (Abbildung 3-1). Die zweite Welle ist die Scherwelle, die sich quer zur Ausbreitungsrichtung bewegt. Sie wird auch als S-Welle (S = sekundär) bezeichnet (Telford et al. [1990]) (Abbildung 3-1).

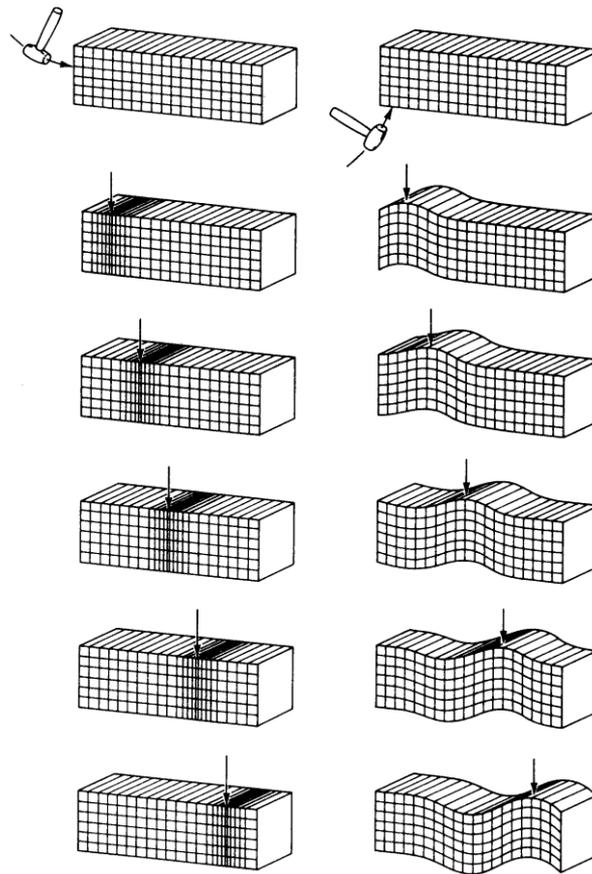


Abbildung 3-1: Schwingungsformen der Kompressionswelle (links) und Scherwelle (rechts) (Berckhemmer [1990]).

In dem einfachsten Fall des homogenen isotropen Körpers kann eine kleine Auslenkung in einem ideal elastischen Festkörper über das Hook'sche Gesetz folgendermaßen beschrieben werden:

$$T_{ij} = E_{ijkl} * D_{kl}. \quad (3.1)$$

Dabei werden der Spannungstensor ( $T$ ) und der Deformationstensor ( $D$ ) in Beziehung zueinander gebracht. In Große [1996] ist nachzulesen, dass die Verknüpfung über den Elastizitätstensor ( $E$ ) beschrieben wird:

$$E_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{ik} \delta_{jk}), \quad (3.2)$$

mit  $\lambda$  und  $\mu$  als Lamé'sche Konstanten und  $\theta$  als Dilatation (Volumendilatation) ergibt sich aus Symmetrieüberlegungen für den Spannungstensor in einem homogenen isotropen Körper:

$$T_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu D_{ij}. \quad (3.3)$$

Über die Lamé'schen Konstanten können wiederum die elastischen Parameter berechnet werden, die auch durch die Modalanalyse gemessen werden können (Kapitel 3.2.3). Dabei bezeichnet  $E$  das Elastizitätsmodul (Young-Modul):

$$E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}; \quad (3.4)$$

$K$  das Kompressionsmodul:

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu; \quad (3.5)$$

$G$  das Schermodul:

$$G = \frac{E}{2 + 2\sigma} \quad (3.6)$$

und  $\sigma$  die Poissonzahl (Querkontraktionszahl):

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (3.7)$$

Die Theorie und Herleitung zur Ausbreitung elastischer Wellen ist gut erforscht und wird in verschiedenen Arbeiten eingehend beschrieben (unter anderem in Aki und Richards [1980], Telford et al. [1990], Große und Reinhardt [1993], Vogel [1995], Große [1996], Shearer [1999] und Udias [1999]). Letztlich kann über die Betrachtung der elastischen Parameter auch eine Herleitung für die Geschwindigkeit der Kompressionswelle

$$v_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \sigma)}{\rho(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad (3.8)$$

und der Scherwelle

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (3.9)$$

vorgenommen werden (siehe zum Beispiel Telford et al. [1990]).

Die beiden Wellentypen breiten sich in einem homogenen Medium unabhängig voneinander aus. Bei einer Änderung der elastischen Eigenschaften oder der Dichte kommt es zu einer Kopplung der beiden Wellen. In der Geophysik wird für viele Gesteine in erster Näherung  $\mu \cong \lambda$  und damit:  $v_S = \frac{1}{\sqrt{3}} v_P$  gesetzt (Große [1996]). Nach Telford et al. [1990] liegt die Scherwellengeschwindigkeit immer im Bereich von 0 % bis 70 % der Kompressionswellengeschwindigkeit. Die Scherwellengeschwindigkeit wird in Flüssigkeiten null, da dort keine Scherkräfte entstehen. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Wellentypen kann unter anderem bei Graff [1975] und Große [1996] nachgelesen werden.

Neben den elastischen Eigenschaften wurde bereits die Dichte der Probekörper angesprochen. Sie ist eine charakteristische Eigenschaft jedes Materials und wird durch die Masse ( $m$  in kg) pro Volumen ( $V$  in  $m^3$ ) angegeben:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.10)$$

Für die hier verwendeten Probekörper wurde vor den Experimenten die Dichte bestimmt, indem sie gewogen und mit dem bekannten Volumen verrechnet wurden. Dabei wurde von ideal zugeschnittenen Probekörpern ausgegangen. Bei den Probekörpern mit Krater musste zuerst das Volumen des Kraters bestimmt werden (Dufresne et al. [2013]), um zum Beispiel für die Modalanalyse eine genauere Angabe der Dichte zu erhalten.

Ein weiterer Aspekt der Materialeigenschaften ist die Inhomogenität durch eine vorhandene Schichtung (siehe Tabelle 1-1) oder ein Konglomerat an verschiedenen Gesteinskörnungen (beim Tuff deutlich erkennbar, Abbildung 1-8). Dabei kann eine Inhomogenität nur erfasst werden, wenn sie größer als die verwendete Wellenlänge ist.

Über:

$$f = \frac{v_P}{\lambda} \quad (3.11)$$

kann die Frequenz berechnet werden, die benötigt wird, um eine Struktur mit einer bekannten Größe zu finden. Für einen Sandstein mit 3000 m/s und einer gesuchten

Struktur von 1 mm ergibt sich eine benötigte Frequenz von mindestens 300 kHz. Versuche haben gezeigt, dass bei dieser Frequenz die Welle zu stark gestreut wird, weshalb für die Ultraschall-Tomographie eine Frequenz von nur 20 kHz verwendet wurde. Eine solch kleine Frequenz ist nur möglich, weil bei den Messungen davon ausgegangen wird, dass es sich um ein sehr feines und breitgestreutes Netz aus Rissen handelt, welches die Ultraschallwellen stärker als ein einzelner großer Riss beeinflusst (Pilkington und Grieve [1992]). Anhand dessen wird auch deutlich, dass Effekte wie die Dämpfung der Welle, Anisotropie und Randeffekte in sehr kleinen Probekörpern sich stark auf die Messungen auswirken (Große [1996]).

Für die Auswertung aller Messungen ist auch die Messkette der jeweiligen Messtechnik entscheidend. Wie in Große [1996] beschrieben, wird das aufgezeichnete Signal (die Übertragungsfunktion) von den einzelnen Komponenten der Messkette (siehe jeweiliges Kapitel) beeinflusst. Die folgenden Ausführungen sind somit nur eine Verallgemeinerung der angewandten Grundlagen und müssen an die jeweilige Messtechnik angepasst werden. Die Antwortfunktion  $Rec(f)$  eines Ultraschall-Impulses  $S(f)$  kann von den Übertragungsfunktionen der Messkette eliminiert werden, soweit diese bekannt sind. Dies geschieht mit einer Dekonvolution (Entfaltung) der beiden Zeitsignale. Dabei ist das gemessene Signal ( $Rec(f)$ ) vollständig bestimmt durch die Übertragungsfunktion  $TF_G$  des Gebers (oder der Quelle z. B. ein Hammer),  $TF_P$  des Probekörpers,  $TF_E$  des Empfängers und  $TF_M$  der Messeinheit. Daraus ergibt sich nach Große [1996]:

$$Rec(f) = S(f) * TF_G(f) * TF_P(f) * TF_E(f) * TF_M(f). \quad (3.12)$$

Im Zeitbereich entspricht die Dekonvolution einer Division der Antwortfunktion im Frequenzbereich. Dabei gilt: Sollte eine der Komponenten keinen Einfluss auf die Antwortfunktion haben, so besitzt diese den Wert  $TF(f) = 1$ . Häufig werden einige Komponenten wie Koppelmittel und Kabel vernachlässigt, was durchaus verträglich ist, sofern sie die Messkette nicht weiter beeinflussen. Je nach Messaufgabe und Art der Auswertung muss bestimmten Komponenten der Formel (3.12) besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Oft spielt  $TF_G$  eine wichtige Rolle, da zum Beispiel in der Ultraschall-Durchschallung ein Sensor als Quelle verwendet wird. Da jeder Sensor seine eigene Charakteristik aufweist, sollte diese für die Messung bekannt sein. Letztlich muss man sich des Einflusses der Komponenten bewusst sein, da bei gleichen Messungen mit unterschiedlichen Messsystemen diese nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Bei den hier diskutierten Anwendungen sind die meisten Messungen zusätzlich nicht reproduzierbar. Alleine der Aufbau ist von der Größe und Beschaffenheit der Probekörper abhängig (Abbildung 3-2, Tabelle 3-1). Die Aufzeichnung mit der SEA

kann nur einmalig während der Impaktexperimente durchgeführt werden. Die Wiederholung kann nur mit einem neuen Probekörper und einem neuen Projektil ausgeführt werden. Da es sich um ein Naturmaterial handelt, sind die Probekörper nie 100-prozentig identisch (zum Beispiel bezogen auf die Homogenität beziehungsweise Heterogenität, Masse und Größe).



Abbildung 3-2: Experimenteller Aufbau in der Targetkammer an der XLLGG. Von links nach rechts: in einem Holzkasten eingebauter *Ejecta*-Fänger, Sandstein- Probekörper mit an der Oberfläche platzierten Ultraschall-Sensoren.

Tabelle 3-1: Spezifische Eigenschaften der verschiedenen Probekörper und Projektil.

Parameter	Probekörper			Projektil		
	Sandstein	Quarzit	Tuff	Aluminium	Stahl	CdC
Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	$2,05 \pm 0,04$ <sup>(1)</sup>	$2,62 \pm 0,2$ <sup>(2)</sup>	$1,42 \pm 0,01$ <sup>(2)</sup>	$2,7$ <sup>(3)</sup>	$8,1$ <sup>(1)</sup>	$7,83 - 7,91$ <sup>(1), (4)</sup>
Elastisches Modul [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	$\sim 14800$ <sup>(5)</sup>	$50000 - 75000$ <sup>(6)</sup>	$10000 - 40000$ <sup>(7)</sup>	$70000$ <sup>(5)</sup>	$210000$ <sup>(5)</sup>	---
P-Wellen-Geschwindigkeit [ $\text{m}/\text{s}$ ]	$\sim 3000$ <sup>(8)</sup>	$\sim 4800$ <sup>(8)</sup>	$\sim 2100$ <sup>(8)</sup>	$5110$ <sup>(5)</sup>	$5100$ <sup>(5)</sup>	$\sim 6000$ <sup>(9)</sup>

CdC = Campo del Cielo, <sup>(1)</sup> Poelchau et al. [2013a], <sup>(2)</sup> persönlicher Kontakt Dr. M. H. Poelchau, <sup>(3)</sup> Kenkmann et al. [2011], <sup>(4)</sup> Ebert et al. [2013], <sup>(5)</sup> Kuchling [1980], <sup>(6)</sup> Schifferli [2008-2013a], <sup>(7)</sup> Schifferli [2008-2013b], <sup>(8)</sup> Tabelle 1-1, <sup>(9)</sup> Abbildung 1-10, --- = Keine Angaben

In Abbildung 1-5 (S. 11) wird zum Beispiel ein Quarzit-Probekörper gezeigt, der einen sehr großen Grad an Heterogenität aufweist (große Bereiche an Toneinlagerungen). Der Probekörper ist durch das Impaktexperiment fast auseinander gebrochen. Er

musste in Klarsichtfolie verpackt werden, damit er beim Transport nicht komplett zerfällt. Eine solche Heterogenität wurde bei den Quarzit-Probekörpern mit 20 cm Kantenlänge nicht gefunden. Die Versuche sind daher nicht direkt miteinander vergleichbar. Auch die Projektile, die handgeschliffen werden, weisen Unterschiede in Größe und Masse auf (Poelchau et al. [2013a]). Aber nicht nur die verwendeten Materialien sind nicht reproduzierbar, auch der technische Teil des Impaktversuches ist nicht exakt wiederholbar. Die Fluggeschwindigkeit des Projektils ist von vielen Parametern (unter anderem von der Masse des Projektils, Druck in dem Schießrohr und der Masse vom Kolben) abhängig. Die meisten dieser Parameter werden in Abbildung 1-4 (S. 10) angeführt und sind charakteristisch für die Schussanlage. Detaillierte Beschreibungen über die Schwierigkeiten der Benutzung einer solchen Schussanlage und die wichtigsten Parameter liefert der Artikel Lexow et al. [2013]. Der Artikel zeigt, dass kleinste Variationen die Fluggeschwindigkeit der Projektile beeinflussen und so die Impaktenergie nicht exakt wiederhergestellt werden kann (Vergleich Tabelle 1-2, S. 19). Somit sind alle Versuche - auch wenn sie in vielen Punkten als gleichwertig betrachtet werden können - nur in Relation zueinander zu betrachten, aber nicht als Wiederholung eines Versuchs anzuerkennen.

Nicht nur die Schallemissionsmessungen während der Impakte sind nicht reproduzierbar, sondern auch die Messungen vor und nach den Versuchen mit Ultraschall (US) und Modalanalyse (MA) zeigen einen Fehlerbereich, der für die Auswertung unbedingt beachtet werden muss. Gerade bei den UST-Messungen ist es besonders schwierig den Fehler zu bestimmen. Für die kleinen Probekörper mit 20 cm Kantenlänge werden insgesamt 1324 Einzelmessungen benötigt (es wurden 15 Blöcke mit 20 cm, ein Block mit 50 cm und 1 Block mit 80 cm Kantenlänge ausgewertet). Eine solche Messung ist allein aus zeitlicher Sicht nicht beliebig oft wiederholbar und wird in der Regel nur einmal durchgeführt. Für eine Fehlerabschätzung wurden partiell Messungen wiederholt (Kapitel 6.1).

### **3.2 Messmethoden**

Für eine optimale Charakterisierung der Schädigung durch die Impaktexperimente wurden die Probekörper vor, während und nach den Experimenten mit zerstörungsfreien Prüfmethoden untersucht. Nicht jede Messmethode kann zu jedem Zeitpunkt durchgeführt werden. Aus Signalamplitude, Frequenzverteilung, Laufzeit und Wellengeschwindigkeit können Aussagen über die innere Struktur der zu prüfenden Objekte gemacht werden (Finck et al. [2002]). Daher wurden Ultraschallmessungen (US) für eine tomographische Berechnung vor und nach dem Experiment – nicht bei jedem Probekörper – durchgeführt, um den direkten Vergleich beider Zustände zeigen zu können. Auch die Modalanalyse (MA) wurde an einigen Probekörpern zu Vergleichszwecken vor und nach dem Experiment durchgeführt.

Während der Experimente wurde die Schallemissionsanalyse (SEA) verwendet, um den Impakt sowie Risse nach dem Impakt aufzeichnen zu können. Zu Vergleichszwecken mit den am Lehrstuhl durchgeführten Messmethoden wurden Computer-Tomographie-Messungen an Kompaktsystemen am WIWeB (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe), bei EADS (European Aeronautic Defence and Space Company), GE (General Electric) und am NECTAR (Neutronen Computer-Tomographie und Radiographie mit schnellen Neutronen, Institut Radiochemie der Technischen Universität München) durchgeführt. Die Messmethode der Phasenspektroskopie wurde zur weiteren Analyse vor und nach den Experimenten angestrebt. Testmessungen ergaben jedoch keine eindeutigen Ergebnisse für die verwendeten Probekörper (siehe Anhang IX). Die Auswertung der Ergebnisse von Schallemissionsanalyse (SEA), Ultraschall-Tomographie (UST) und Modalanalyse (MA) werden in Kapitel 4 näher behandelt.

### **3.2.1 Schallemissionsanalyse (SEA)**

Die Schallemissionsanalyse (SEA) stellt in der zerstörungsfreien Prüfung eine einmalige Methode dar. Sie wird als einzige Methode während der Energiefreisetzung der gesuchten Schädigung eingesetzt (Große et al. [2004], Moser et al. [2013b]). Die Freisetzung elastischer Wellen während einer Gefügeveränderung in einem unter Spannung stehenden Material wird als Schallemission bezeichnet. Es handelt sich dabei um spontane dynamische Vorgänge (Kurz [2006]). Die entstehenden Wellen breiten sich kugelsymmetrisch als Raumwelle in dem Material aus und können mit einem geeigneten Messsystem aufgezeichnet werden. Anschließend können aus den aufgezeichneten Signalen Rückschlüsse auf die Ursache der Gefügeveränderung und dem aktuellen Zustand des Materials gemacht werden (Große [1996], Schuhmacher und Straub [2011]). Die Auswertung dieser Signale wird dann als SEA bezeichnet. Arbeiten wie Große [1996], Köppel [2002], Große et al. [2004], Finck [2005], Schechinger [2005], Kurz [2006] und Große und Ohtsu [2008] beschäftigen sich eingehend mit der Herangehensweise der SEA, wobei dort vorwiegend die Anwendung im Bauwesen, also in Zusammenhang mit Beton und Stahl, näher untersucht wird. Wenn auch die Verwendung von Naturmaterialien wie Sandstein, Tuff und Quarzit sich nur in einzelnen Parametern von der Messung und der Auswertung der Schallemissionen unterscheidet, so stellen der Messaufbau der Impaktexperimente und die hervorgerufenen Signale durch den Impakt keine alltägliche Aufgabe dar. Bei jeder neuen Messung erhält man neue Erkenntnisse über die nötigen Vorkehrungen beim Aufbau der Messtechnik, bei der Aufzeichnung und der Auswertung der Signale. Die zu messenden Schallemissionen, die nach dem Impakt entstehen, können mit Mikrorissen, wie sie bei Erdbeben auch oft registriert

werden, in Relation gesetzt werden (Moser et al. [2013b]). Die Arbeiten von Sachse und Kim [1987] und Ono [1994] zeigen die ersten Schritte in diesem Bereich.

Generell wird zwischen parameterbasierter und signalbasierter SEA unterschieden. Der Unterschied liegt in der Aufzeichnung und der daraus resultierenden Auswertung der Daten. Während bei der parameterbasierten Vorgehensweise nur einzelne Parameter dokumentiert und ausgewertet werden, wird bei der signalbasierten Vorgehensweise das komplette Signal aufgezeichnet und lässt daher eine umfangreichere Auswertung der Daten zu. Der Vorteil der parameterbasierten Methode ist das geringere Datenvolumen, das bei der Aufzeichnung entsteht (Große [2005], Kurz [2006], Große und Ohtsu [2008]). Typische Parameter sind der Signalbeginn, die Signaldauer, die Maximalamplitude, die Anstiegszeit, die Counts (Schwellwertüberschreitungen) und der Energiegehalt. Allerdings gleicht eine parameterbasierte Aufzeichnung einem *Black-Box*-Verfahren, weil das Signal nicht mehr eindeutig als Schallemission zurückverfolgt werden kann. Es kann sich ebenso gut um ein Störgeräusch handeln (Schechinger [2005]). Die signalbasierte Aufzeichnung hingegen lässt die mutmaßliche Schallemission und die einhergehenden Prozesse quantitativ erfassen. Eine Auswertung erfolgt erst nach der Aufzeichnung und die Signale müssen als einzelne Zeitreihen vorliegen (Schechinger [2005]). Für die Impaktprozesse wurde die signalbasierte Aufzeichnung gewählt. Mit dem Beginn der computerbasierten Aufzeichnung wurden die Auswertetechniken der seismischen Datenanalyse auch im Bauwesen eingesetzt (Ohtsu et al. [1991], Ouyang et al. [1991]). Schallemissionen benötigen eine hohe Datenübertragungsrate und gehen mit hohen Frequenzen (20 kHz bis mehrere MHz) einher. Inzwischen ist die Technik fähig, dieses Datenvolumen zu beherrschen, sodass auch die Lokalisierung von Schallemissionen durchaus machbar ist (siehe zum Beispiel Moser et al. [2013b]).

### **a. Messprinzip**

Bei der Schallemissionsanalyse (SEA) ist es das Ziel, akustische Signale, die bei Bruch- oder Rissbildung entstehen, mit Hilfe von Sensorik und Messtechnik zu registrieren, in ein digitales Signal umzuwandeln und zu interpretieren (Große [1996]). Die digitalen Signale können anschließend weiterverarbeitet werden. Vergleichbar ist die SEA mit Messungen in der Seismologie und der Beobachtung von Erdbeben (Große [2011]). Wird ein Material (hier: Sandstein, Quarzit oder Tuff) mechanisch beansprucht, entstehen winzige Risse, die sich unter andauernder Belastung zu einen Bruch entwickeln können. Die Bildung von Rissen und Brüchen gehen einher mit der Freisetzung von elastischer Energie, die sich in Form von Schallwellen im Körper ausbreiten. Die sich ausbreitenden elastischen Wellen können im Ultraschallbereich detektiert werden.

Bei der SEA wird von einem rein passiven Verfahren gesprochen, das direkt mit der Schadensgröße verbunden ist (Große und Ohtsu [2008], Große [2011]). In Abbildung 3-3 ist das Prinzip von aktiven und passiven zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) verdeutlicht. Bei einem passiven Verfahren entsteht die Quelle (Source) im Prüfobjekt (z. B. durch Rissausbreitung) und das ausgesendete Signal wird von Sensoren (Receivern) aufgenommen. Entgegen dazu wird bei aktiven Verfahren ein Signal durch eine externe Quelle (Hammer, Impulsgeber, Rüttler o. ä.) an der Oberfläche des Prüfobjektes erzeugt und das Signal von Sensoren aufgezeichnet.

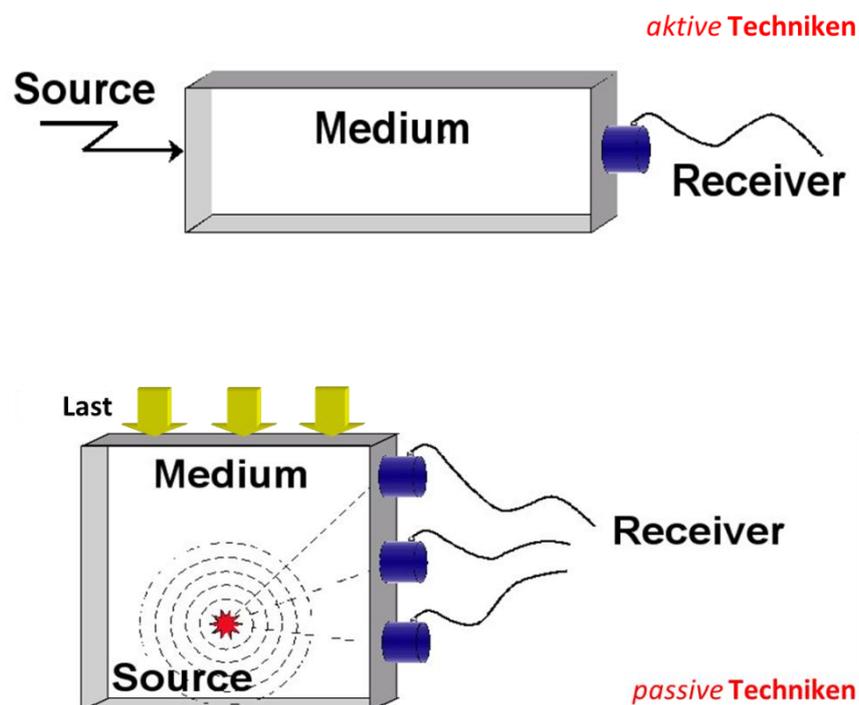


Abbildung 3-3: Prinzipskizze zur Erklärung von aktiven und passiven ZfP-Techniken (Große und Ohtsu [2008]).

Bei den Impaktversuchen ist auf den ersten Blick nicht eindeutig zu sagen, ob das SEA Verfahren noch als passives Verfahren bezeichnet werden kann. Die aufzuzeichnenden Signale werden hier mechanisch durch den Aufprall der Projektile erzeugt. Somit wurde die Quelle aktiv ausgelöst. Da ein Ziel der SEA jedoch die Aufzeichnung später folgender Entlastungen im Gestein ist, handelt es sich hierbei wiederum um ein passives Verfahren. Zudem stellt das Projektil einen wichtigen Teil des Experimentes dar. Somit wird die Quelle zwar extern gesteuert, die Messung kann jedoch im Weiteren als passiv bezeichnet werden. Ein weiterer Grund zur Diskussion liefert die Tatsache, dass die SEA immer mit Zerstörung einhergeht und somit oft fälschlicherweise als zerstörende Prüfmethode bezeichnet wird. Hierbei muss bedacht

werden, dass diese Messmethode während der Schädigung eines Objektes angewendet wird und nicht, wie die meisten anderen Verfahren, vor und/oder nach dem Versagen des Objektes (Große [1996]). Ebenfalls sollte bedacht werden, dass die Belastung im Probekörper vorhanden ist und das Versagen mit und auch ohne der Messtechnik der SEA eintreten würde. Somit ist die SEA eine zerstörungsfreie Messmethode, die während des Versagens alle wichtigen Information festhält, aber nicht zum Versagen beiträgt.

Anders als bei anderen ZfP-Verfahren kann bei der SEA das komplette registrierte Signal ausgewertet und eine Aussage über den Prozess des Versagens oder das Material gegeben werden. Die Verfahren, die vor und/oder nach dem Versagen angewendet werden (hier: Ultraschall, Phasenspektroskopie, Modalanalyse), dienen dazu, eine Aussage über die geometrische Verteilung und den Grad der Schädigung zu machen (Kapitel 3.2.2 und 3.2.3).

Für die Auswertung der Schallemissionen ist es notwendig, über das zu untersuchende Objekt so viele Informationen hinsichtlich Materialeigenschaften zu sammeln, wie möglich. Die hier verwendeten Naturmaterialien sollten vorwiegend homogen sein. Das bedeutet, dass die Heterogenität, die im Gestein durch Einschlüsse, Schichtungen und eventuelle Luft- beziehungsweise Gaseinschlüsse vorhanden ist, für die Schallwellenausbreitung nicht relevant sein sollte. Der Anteil, der von der vorhandenen Heterogenität der Naturmaterialien beeinflusst wird, ist verantwortlich für eine Veränderung der Wellenform und einen Verlust am Energieanteil der elastischen Wellen.

Es gibt verschiedene Ansätze der Signalverarbeitung beziehungsweise der Auswertung von Schallemissionen. Wird ein Quellsignal  $S(t)$  komplett aufgezeichnet, so wird es durch die Übertragungsfunktion  $TF_P(t)$  des Probekörpers und der Charakteristik  $TF_M(t)$  der Messinstrumente in das aufgezeichnete Signal  $Rec(t)$  verändert. Dieser Vorgang wird als Konvolution bezeichnet und folgendermaßen mathematisch ausgedrückt:

$$Rec(t) = S(t) * TF_P(t) * TF_M(t). \quad (3.13)$$

Diese Formel stellt eine Vereinfachung der Formel (3.12) dar. Ist  $TF_M(t)$  durch die Kalibrierung der Messgeräte bekannt, so kann dieser Anteil durch eine Dekonvolution aus dem Signal herausgerechnet werden. Durch die Verwendung von möglichst nur einem Sensortypen wird diese Berechnung vereinfacht (Schechinger [2005]).

Für die Überlegung, welche Art der Auswertung möglich und sinnvoll ist, muss man sich darüber bewusst sein, welche Informationen in einen Quellsignal  $S(t)$  enthalten sind. Die Charakteristik des Signals wird bestimmt durch den zeitlichen Verlauf des

Bruchprozesses, die Energie und die Abstrahlcharakteristik. Die Abstrahlcharakteristik wiederum ist abhängig vom Bruchtyp und der Orientierung der Quelle (Schechinger [2005]). Die vom Bruch ausgehende Wellenausbreitung wird vorwiegend von den physikalischen Größen der Raumwellengeschwindigkeit und den elastischen Modulen des Materials beeinflusst, in dem sich die Welle ausbreitet (siehe Kapitel 3.1). Mit den Laufzeitgradienten (Abstand jedes Sensors zur Quelle über die Laufzeit für jeden Sensor) lässt sich mit der SEA die Kompressionswellengeschwindigkeit des Materials bestimmen. Die Ultraschallmessung (s. Kapitel 3.2.2) kann ebenfalls zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeiten hinzugezogen werden. Die elastischen Module werden mit Hilfe der Modalanalyse (s. Kapitel 3.2.3) erfasst (Große [1996]). Die Ausbreitung von elastischen Wellen in Festkörpern wird in Kapitel 3.1 angesprochen und näher in der Literatur (z. B. von Große [1996] und Schechinger [2005]) beschrieben.

Eine der wichtigsten und spannendsten Aufgaben der SEA stellt die Lokalisierung der aufgezeichneten Signale dar. Dies geschieht ähnlich wie die Lokalisierung in der Erdbebenerkundung und soll eine dreidimensionale Information über die Lage der Quelle ergeben. Auch die zeitliche Komponente als vierte Dimension ist für die SEA von großer Bedeutung. Für die Auswertung werden die Ankunftszeiten der direkten elastischen Welle an jedem Sensor oder die Laufzeitunterschiede benötigt, wobei der Entstehungszeitpunkt der Quelle nicht bekannt ist. Für eine Bestimmung des Quellherdes sind mindestens vier Sensoren notwendig (Maji und Shah [1988], Finck [2005], Schuhmacher und Straub [2011]), allerdings gilt hier: je mehr Sensoren für die Auswertung verwendet werden können, umso besser wird das Ergebnis (z. B. Große [1996] und Moser [2009]). Dabei ist es wichtig, dass die Sensoren möglichst gleichmäßig, aber nicht symmetrisch über dem Probekörper verteilt sind. Wenn sich viele Sensoren auf einer Seite des Probekörpers befinden, kann es passieren, dass sich dies auf das Ergebnis der Lokalisierung auswirkt, in dem das Ergebnis quasi in Richtung der Sensoranhäufung gezogen wird. Ist die Sensoranordnung möglichst symmetrisch aufgebaut, kann es zu nicht nachvollziehbaren Symmetrieeffekten kommen. Um die Herdcoordinate  $\mathbf{x} = (x,y,z)$  zum Zeitpunkt  $t$  bestimmen zu können, müssen die Positionen  $\mathbf{x}_{Si}$  (von mindestens vier Sensoren) und die Ersteinsatzzeiten  $t_{Si}$  der Kompressionswelle bekannt sein. Mit der bekannten Kompressionswellengeschwindigkeit kann dann über das folgende Gleichungssystem das Signal lokalisiert werden:

$$t_{Si} = t + \frac{1}{v_p} (\mathbf{x}_{Si} - \mathbf{x}). \quad (3.14)$$

Diese Formel ist in der Praxis durch nicht exakte Auswertungen von Sensorpositionen und Ersteinsatzbestimmungen immer fehlerbehaftet. Bei Informationen von mehr als

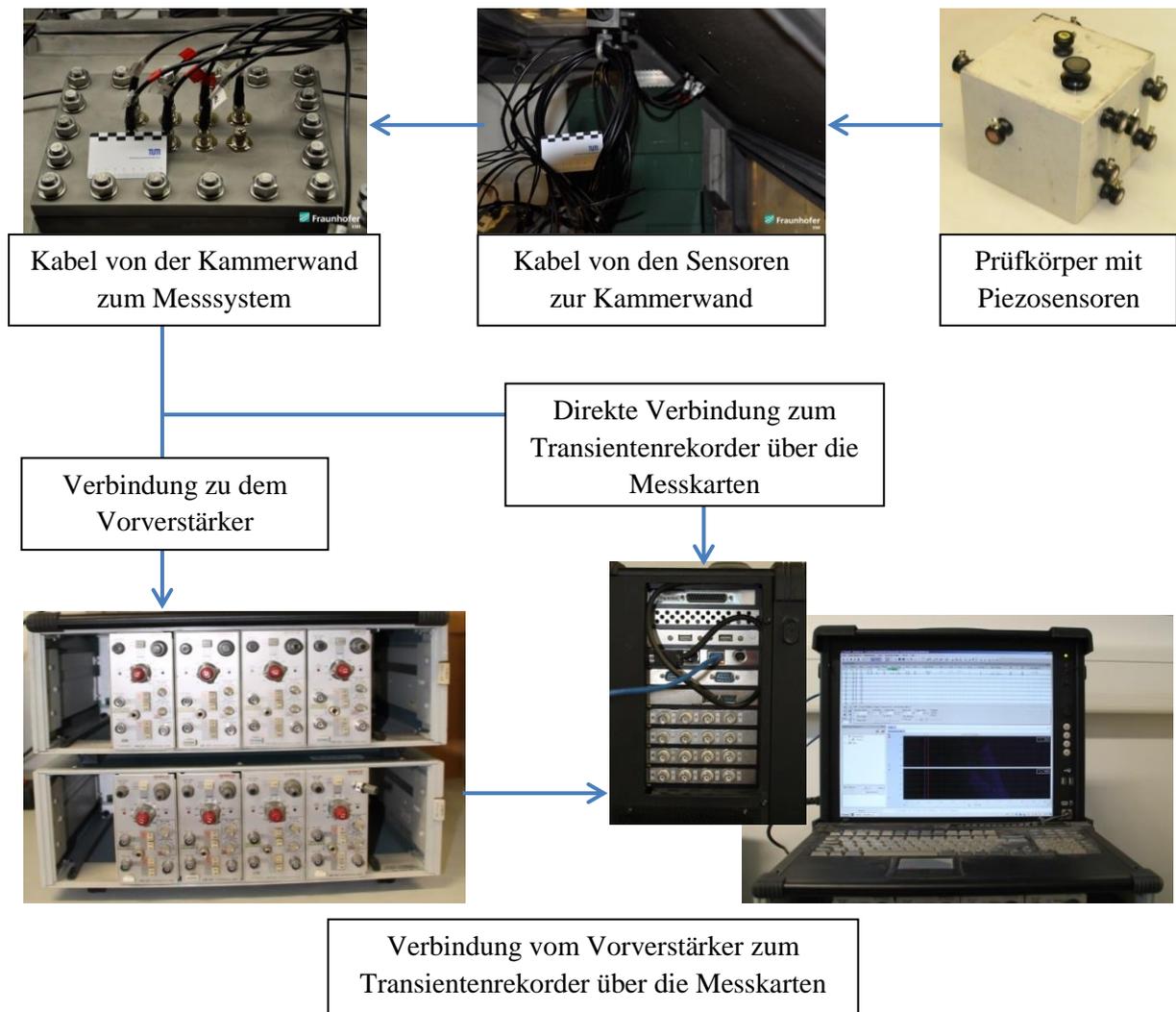
vier Sensoren kann das Gleichungssystem iterativ gelöst werden und minimiert so den Fehler (Finck [2005]).

Autoren wie Berthelot und Robert [1987], Labusz et al. [1988], Ohtsu et al. [1991], Große [1996], Schechinger [2005] und McLaskey und Glaser [2007] haben sich bereits erfolgreich mit der dreidimensionalen Lokalisierung von Schallemissionen beschäftigt. In dieser Arbeit wird für die Lokalisierung das am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung vorhandene Programm HypoAE (ausführlich beschrieben in Große [1996] und im nächsten Abschnitt der Messinstrumente kurz behandelt) verwendet.

Da es sich in dem MEMIN-Projekt um ein gemeinschaftliches Vorhaben handelt, ist es auch wichtig, Informationen zu sammeln, die für andere Projekte von Vorteil sind. Für die numerische Auswertung (Projekt 5) ist die Rekonstruktion der Wellenausbreitung von besonderer Bedeutung. Die Information dafür kann der zeitliche Versatz der ankommenden Welle an den Sensoren liefern. Aus dem entstehenden Gradienten vom Verhältnis Ankunftszeit zu Abstand, kann die durchschnittliche Geschwindigkeit der Welle berechnet werden, die als erste an den Sensoren ankommt. Auch kann aus der entstehenden Funktion abgelesen werden, ob es sich um eine lineare beziehungsweise kugelförmige Ausbreitung der Welle handelt oder ob die vorhandene Schichtung im Sandstein und Quarzit (Kapitel 4.2) eine elliptische Ausbreitung der Welle hervorruft (Kapitel 4.3 und Anhang VI).

## **b. Messsystem, Sensorik und verwendete Auswertungsprogramme**

Im Allgemeinen sieht die Messkette der Schallemissionsanalyse (SEA) folgendermaßen aus: Piezoelektrische Sensoren registrieren die elastische Welle auf der Oberfläche des Prüfkörpers. Das entstandene analoge Signal wird über einen Vorverstärker geleitet, der das ankommende Signal analog filtert und verstärkt. Wird ein Trigger verwendet, ist dies der Zeitpunkt, an dem entschieden wird, ob es sich laut Triggerbedingung um ein Signal handelt oder nicht (Kurz [2006]). Es ist jedoch auch möglich eine kontinuierliche Messung (bei den Impaktexperimenten wird kontinuierlich aufgezeichnet) zu starten, bei der keine Triggerbedingung festgelegt wird. Anschließend, wenn das Signal als solches identifiziert ist, wird es an den Transientenrekorder weitergeleitet. In der Regel besteht dieser aus einem PC mit mindestens einer Messkarte an der einzelne Steckplätze für die Sensoren vorgesehen sind (hier zwei Messkarten mit jeweils acht Steckplätzen). Die Messkarte führt eine A/D-Wandlung der Signale durch, sodass diese auf der Festplatte gespeichert werden und für die Auswertung in einem entsprechenden Programm dargestellt werden können (Kurz [2006]) (Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4: Prinzip für die Messkette der Schallemissionsanalyse. Der Weg über die Kammerwand ist abhängig vom Versuchsaufbau.**

Für die Aufzeichnung, die Darstellung der Signale und eine erste Aussage kurz nach den Versuchen wurde bei den hier beschriebenen Experimenten das *TransAS* (bzw. *TranAx*) Messsystem der Firma *Elsys* verwendet (Abbildung 3-5). Das *TransAS* Programm ist sehr gut geeignet, um individuelle Messungen durchzuführen. Das System ermöglicht es verschiedene Parameter selbst zu bestimmen und auch die Art der Abspeicherung frei zu wählen (Abbildung 3-5, unten). Das bedeutet, dass zum Beispiel die Abtastrate, die Auflösung, der Triggerzeitpunkt (Trigger = Auslöser), die Triggerbedingungen und der Aufnahmebereich eigenständig für jeden Sensor festgelegt werden können. In dem Programm kann auch die Datendarstellung individuell angepasst werden.

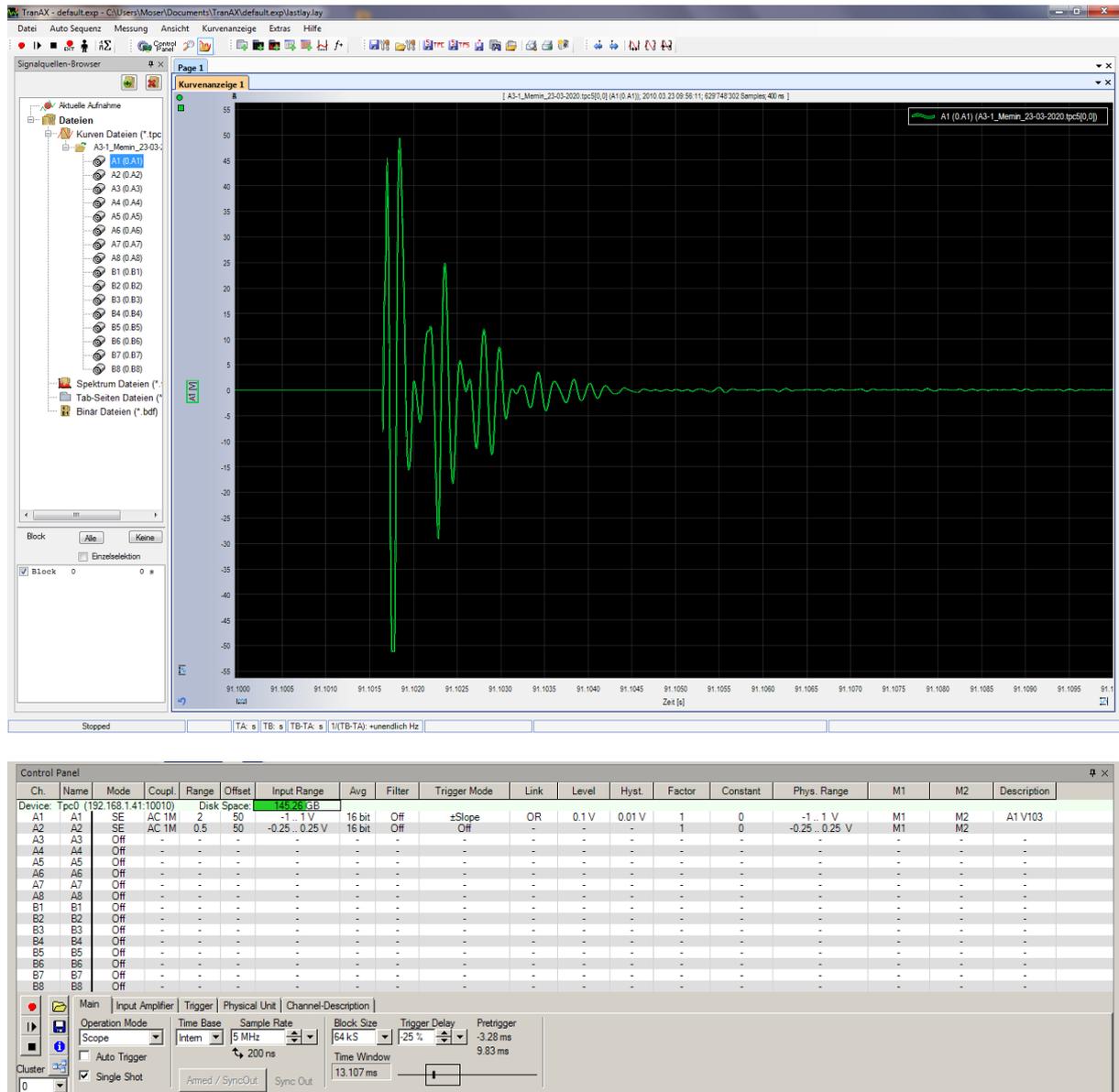


Abbildung 3-5: Grafische TransAX Oberfläche. Oben: Kurvenanzeige für die gemessenen Schallemissionen. Die Abszisse zeigt die Zeit in Sekunden, die Ordinate die Amplitude in Volt. Unten: In dem Control Panel können die Messparameter für jeden Kartensteckplatz (A1-A8 und B1-B8) sowie generelle Einstellungen wie Aufnahmebedingungen und Trigger eingestellt werden.

Mit dem vorhandenen Messsystem ist es möglich, 16 Sensoren, verteilt auf zwei Messkarten mit bis zu 16 Bit (entspricht 65536 Amplitudenwerten), gleichzeitig zu befestigen und messen zu lassen. Die Dynamik des Systems lässt sich über den dekadischen Logarithmus berechnen (Große [1996]):

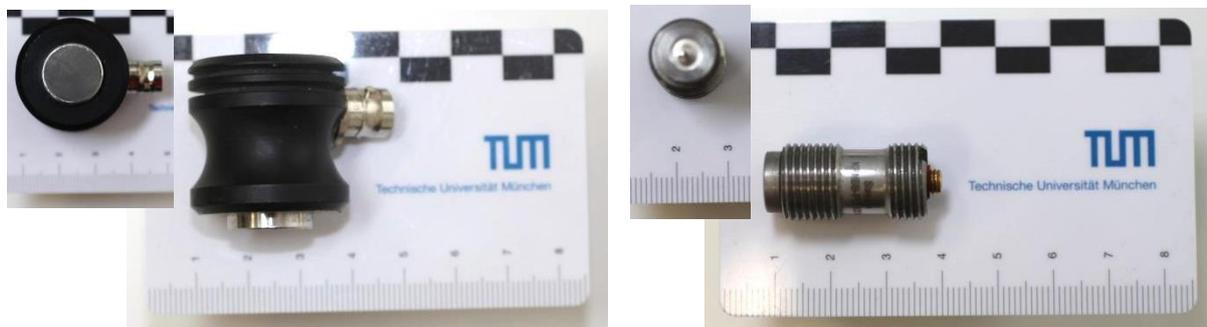
$$\text{Dynamik} = 20 \log_{10} 2^n \quad \text{mit } n \in N (\text{Auflösung}). \quad (3.15)$$

Für das hier verwendete 16-Bit-System ergibt sich für die Dynamik somit etwa 96 dB. Dies entspricht einer sehr guten Amplituden-Auflösung, bei der die Signale nur selten

übersteuern. Da es bei den durchgeführten Experimenten jedoch darum ging, sehr verschiedene Signale (Impakt = hohe Amplitude, Risse = kleine Amplitude) aufzuzeichnen, wurden hier die Sensoren unterschiedlich angesteuert, beziehungsweise wurden einige Sensoren über ein T-Stück zweimal abgegriffen und unterschiedlich verstärkt.

Für die Impaktexperimente wird eine kontinuierliche Aufzeichnung verwendet. Eine getriggerte Aufzeichnung ist bei der hohen Dynamik der Signale und des schlechten Verhältnisses vom Signal zum Rauschen (Noise) (S/N-Verhältnis) in der Zeit nach dem Impakt nicht geeignet. Hinzu kommt, dass es sehr lange dauern kann, bis es nach der Aktivierung der Messtechnik zum Start des Experimentes kommt. Die Messung könnte auf Signale triggern, die nicht zum Experiment gehören und somit einen Frühstart der Messung erzeugen. Bei der kontinuierlichen Aufnahme wurde daher bei jedem Experiment die Zeit bis zum Auslösen des Schusses mit gemessen. Als Abtastrate wurde eine Abtastung von 2.0 MHz bis 2.5 MHz gewählt. Eine solch hohe Abtastrate führt zu einem sehr gut zeitlich aufgelösten Signal, aber auch zu einer großen Datenmenge (Datensätze mit bis zu 45 Gb wurden registriert). Eine noch höhere Abtastrate war nicht möglich, da dies der Messrechner nicht unterstützt hat. Für die Aufzeichnung wurden an verschiedenen Sensoren unterschiedliche Bereiche gewählt. So wurde für einige Sensoren ein Messbereich von 100 V (+/- 50 V) gewählt, sodass das gesamte Impaktsignal aufgezeichnet wurde, ohne die Amplituden abzuschneiden. Um eine bessere Auflösung der nachfolgenden Signale zu erhalten wurde der zweite Teil der Sensoren für einen Bereich von 0,2 V (+/- 0,1 V) eingestellt. Der Amplituden-Offset betrug jeweils 50 %.

Die Sensoren stammen teilweise von der Firma Olympus und tragen die Bezeichnung Panametrics-NDT V103 (siehe Abbildung 3-6, links), im Folgenden nur noch als V103 bezeichnet. Zusätzlich wurden Sensoren der Firma KRNB-PC (Glaser type) (siehe Abbildung 3-6, rechts) verwendet.



**Abbildung 3-6: Piezoelektrische Ultraschallsensoren. Links: Panametrics-NDT V103 Olympus mit  $\varnothing=12\text{mm}$  Messfläche. Rechts: Glaser-type KRNB-PC mit Quasi-Punktkontakt.**

Die hier verwendeten Sensoren funktionieren nach dem Piezoelektrischen Prinzip. Solche Sensoren sind in der Lage mechanische Schwingungen in elektrische Signale umzuwandeln (Kurz [2006]). Diese Elemente reagieren auf Druck- bzw. Zugspannungen, es kommt zu einer elastischen Deformation der Elemente. Schwingungssensoren beinhalten meist Piezoelemente die lediglich in eine Raumrichtung sensitiv sind. Bei den verwendeten Sensoren ist die Sensitivität senkrecht in Richtung der Auflagefläche am Prüfkörper. Die Deformation führt zu einer elektrischen Polarisierung der Elemente und die entstandene Ladungstrennung kann dann kapazitiv als Spannung (V) abgegriffen werden (Kurz [2006]). Die Zeitkurven werden im *TransAS* Programm wiedergegeben. Der Aufbau der Sensoren ist sehr komplex, in Abbildung 3-7 wird der KRNB-PC Sensoren schematisch dargestellt.

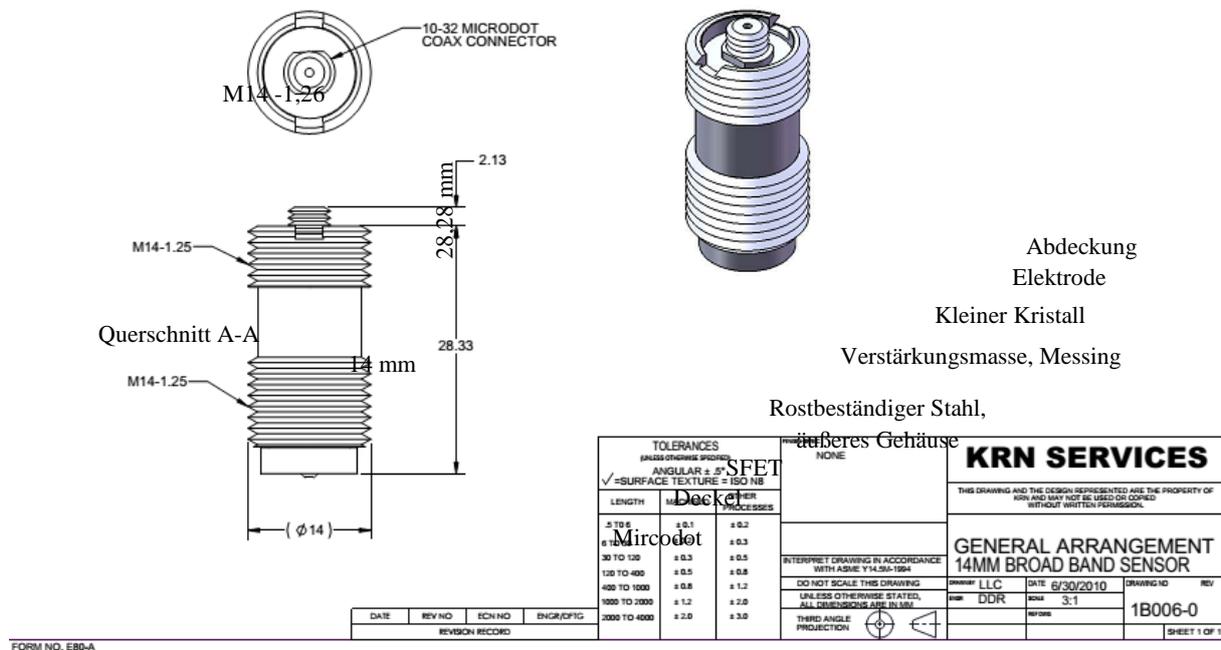
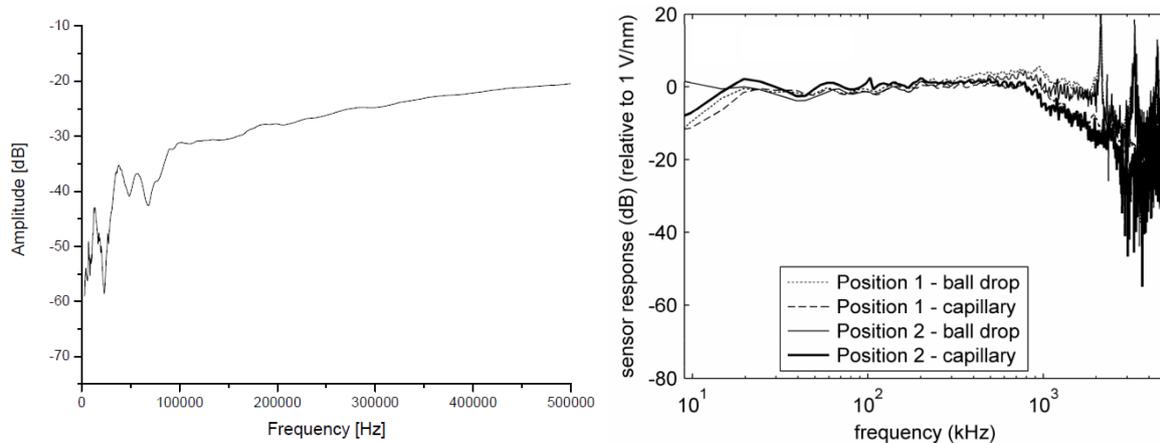


Abbildung 3-7: Abmessungen bzw. Prinzipskizze eines KRNB-PC Sensoren (Datenblatt, angepasst).

Die hier verwendeten Sensortypen sind breitbandige Sensoren. Die Charakteristik breitbandiger Sensoren sieht vor, dass ein solcher Sensor über ein breites Frequenzband sensitiv ist (Kurz [2006]). Es gibt entsprechend auch resonante Sensoren, die nur für bestimmte Frequenzen (Frequenzspitzen) sensitiv sind. Das Problem bei resonanten Sensoren ist, dass man bei der Messung genau wissen muss, welche Frequenzen die akustischen Emissionen haben werden. Jeder Sensor besitzt eine Übertragungsfunktion, die die Empfindlichkeit des Sensors beschreibt. In der Übertragungsfunktion wird die Abhängigkeit der Amplitude und der Phase von der Signalfrequenz dargestellt (Finck [2005]). Abbildung 3-8 zeigt die

Übertragungsfunktionen der hier verwendeten Sensoren. Dargestellt wird die Amplitude in dB über der Frequenz (Hz).



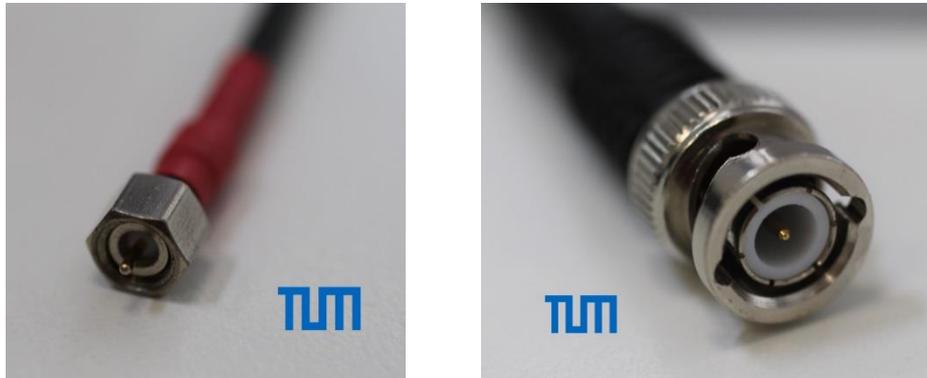
**Abbildung 3-8:** Frequenzverhalten für einen V103 (links, (Richter [2009])) und für einen KRNB-PC, ermittelt aus vier verschiedenen Versuchen (rechts, (McLaskey [2011])).

Der V103 ist ein Kontaktsensor mit einer Mittenfrequenz von 1 MHz. In Abbildung 3-8 (links) wird die Übertragungsfunktion von 0 Hz – 500 kHz dargestellt. Im Bereich von ca. 100 kHz – 500 kHz zeichnet sich ein relativ lineares (keine Schwankungen) und über alle Frequenzen gleichmäßiges Verhalten ab. Unterhalb von 100 kHz sind jedoch starke Schwankungen in der Übertragungsfunktion deutlich erkennbar. Für die KRNB-PC Sensoren sieht die Übertragungsfunktion etwas anders aus. Abbildung 3-8 (rechts) zeigt eine Abdeckung von 10 kHz bis 3 MHz. Im Bereich von 20 kHz bis 1 MHz zeigt das Frequenzverhalten eine nahezu breitbandige Charakteristik. Unterhalb von 20 kHz ist ein leichtes Gefälle erkennbar (McLaskey [2011], Malm [2012]).

Weitere wichtige Aspekte von Schwingungssensoren werden in den Arbeiten von Krautkrämer und Krautkrämer [1986], Große [1996] und Finck [2005] dargestellt.

Weitere Unterschiede der Sensoren sind schon im Sichtbereich erkennbar. Die V103 haben eine Kontaktfläche von 14 mm im Durchmesser, wovon 12,5 mm sensitive Kontaktfläche darstellen. Dahingegen kann bei den KRNB-PC Sensoren von einem Quasi-Punktkontakt gesprochen werden. Die Kontaktfläche ist etwa 1 mm im Durchmesser (Abbildung 3-6, S. 39). Je kleiner die Kontaktfläche der Sensoren ist, umso kleiner ist auch der daraus resultierende Fehler, der bei einer Lokalisierung der Schallemissionen bedacht werden muss. Ein weiterer sichtbarer Aspekt sind die Anschlüsse. Während der V103 einen rechtwinkligen BNC-Anschluss (BNC, Bayonet Neil Concelman) (Abbildung 3-9) am hinteren Ende des Sensorkopfes aufweist (Abbildung 3-6, S. 39) und keine explizite Befestigungsart erkenntlich ist, haben die

KRNBB-PC einen UNF 10 - 32 (*Microdot*)-Stecker (siehe Abbildung 3-9) und ein äußeres Schraubgewinde, das an einer Befestigungsvorrichtung eingeschraubt werden kann (Abbildung 3-6, S. 39).



**Abbildung 3-9: Großaufnahme der Kabelformate. Microdot-Anschluss für KRN Sensoren (links) und BNC-Anschluss für V103 Sensoren (rechts).**

Zwischen den Sensoren und dem Messrechner wurden Vorverstärker geschaltet. Dieser Vorgang ist nötig, da die Signale von Schallemissionen meistens sehr schwach sind und daher verstärkt werden müssen. Das bedeutet, dass das S/N-Verhältnis verbessert wird. Bei den hier beschriebenen Experimenten wurden für die V103 Vorverstärker der Firma *TEKTRONIX*<sup>®</sup> (Typ: *TM 504*) verwendet. In diesen Geräten sind bereits analoge Filter eingebaut, die sich stufenweise zwischen 0,1 Hz und 1 MHz einstellen lassen und somit einige nieder- und hochfrequente Störeinflüsse eliminieren können (Kurz [2006]). Für die KRNBB-PC Sensoren wurden die dazugehörigen Vorverstärker verwendet. Die Sensoren können nicht über die *TEKTRONIX* Vorverstärker geleitet werden, da sie eine Speisespannung benötigen. Die *KRN AMP* Vorverstärker lassen zudem nur zwei Einstellungsmöglichkeiten zu. Entweder wird das Signal mit 35 dB verstärkt oder die Sensoren bekommen nur eine Speisespannung zugeteilt.

Die Verbindung zwischen Sensor, Vorverstärker und Messrechner erfolgt jeweils über ein BNC- oder ein Microdot Kabel, je nach benötigter Anschlussart (Abbildung 3-9, S. 42). Einflüsse der Anschlussart von Sensoren sind bisher jedoch nicht bekannt und können daher in dieser Arbeit vernachlässigt werden. Meist sind messbare Einflüsse eher auf die Kabel selbst zurückzuführen, wenn diese durch die häufige Benutzung oder in der Herstellung eine schlechte Isolierung aufweisen oder die Auslagen zu lang werden.

### c. Versuchsaufbau

Die Messtechnik für die Schallemissionsanalyse (SEA) ist die einzige Technik, die während der Impaktexperimente angewendet wird und stellt somit eine *in situ* Messung dar. Vereinfacht kann gesagt werden, dass ein Messrechner über Kabel mit den Sensoren auf der Probekörperoberfläche verbunden ist und somit die Impaktgeräusche aufgezeichnet werden können (Abbildung 3-4, S. 37).

Durch den allgemeinen Versuchsaufbau der Impaktexperimente ist der Messaufbau um einiges aufwendiger und komplizierter als bei den meisten SEA Messaufgaben. Die Probekörper für die MEMIN -Experimente werden in einer Kammer aufgebaut, in der ein Unterdruck erzeugt wird (Abbildung 3-10). Da der Messrechner und die Vorverstärker nicht in der Kammer stehen können (unter anderem, weil die Messung manuell gestartet werden muss, die Kammer mindestens eine halbe Stunde vor dem Versuch abgepumpt wird und wegen des Unterdruckes), müssen die Kabel, die den Rechner mit den Sensoren verbinden, über extra Steckplätze in der Wand der Kammer nach außen zum Messrechner und den Vorverstärkern geführt werden. In Abbildung 3-11 wird das Innere der SLGG Targetkammer gezeigt. Der Probekörper ist mittig in der Kammer aufgebaut und die Sensoren für die SEA sind auf der Probekörperoberfläche verteilt. Die BNC-Kabel werden von den Sensoren zu den Steckplätzen auf der rechten und linken Seite in der Kammerwand geführt, damit sie außerhalb der Kammer mit dem Messrechner verbunden werden können. Der Messrechner ist – wie oben begründet – außerhalb der Kammer positioniert. In Abbildung 3-12 wird dies für die XLLGG Schussanlage gezeigt (Messrechner und Vorverstärker (rechts) und dem Aufbau vom EMI für die Hochgeschwindigkeitskamera (links)). Teilweise wird der Messrechner direkt über die BNC-Steckplätze an die Targetkammer geführt, ein anderer Teil wird zuerst mit einem Vorverstärker in Serie geschaltet und von dort mit der Kammer verbunden. Wie viele der Sensoren vorverstärkt werden, wurde für jedes Experiment separat festgelegt. Erst während der Versuche konnte ausprobiert werden, ob es besser ist, die Signale über einen Vorverstärker laufen zu lassen, oder ob das reine Signal ausreicht. Das Ergebnis zeigt, dass sich je nach Aufgabe der Auswertung die eine oder andere Vorgehensweise anbietet. Für die Impaktanalyse und den Vergleich zur Numerik ist das komplette Signal von Interesse. Für kleinere Ereignisse nach dem Impakt können Detailaufzeichnungen nützlicher sein.

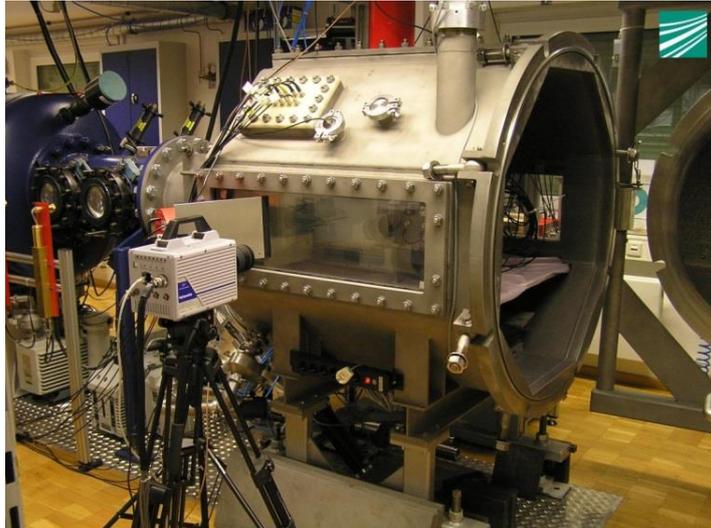


Abbildung 3-10: Targetkammer der SLGG am EMI in Freiburg mit der Möglichkeit ein Vakuum zu erzeugen.

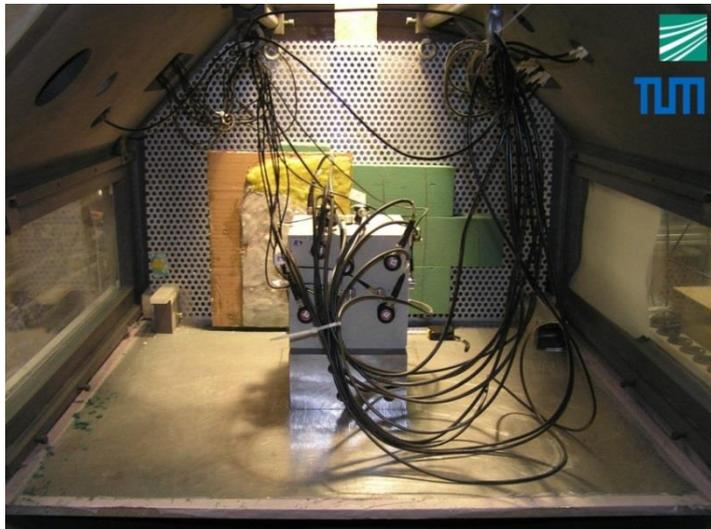


Abbildung 3-11: Ein Blick in das Innere der SLGG Targetkammer mit Sandstein- Probekörper, SEA Sensorik und *Ejecta*-Fänger im Hintergrund.



Abbildung 3-12: Aufbau der SEA Messtechnik außerhalb der XLLGG Targetkammer. Von links nach rechts: Blitzlicht (EMI), Hochgeschwindigkeitskamera (EMI), SEA Messtechnik mit Transienten-Rekorder (TUM) und Vorverstärker (TUM).

Insgesamt ist jeder Aufbau für die SEA Messung an die unterschiedlichen Schussanlagen anzupassen. In Abbildung 3-13 wird das Innere der XLLGG Schussanlage gezeigt, die sehr viel größer ist, als die der SLGG (Abbildung 3-10) und sogar begehbar. Jedoch müssen auch hier die Kabel wieder über BNC-Steckplätze nach außen geführt werden. Um die Kabel bestmöglich vor Absplitterungen des Probekörpers zu schützen, wurden die Kabel mit Kabelbindungen zusammengefasst (Abbildung 3-11). Bei der XLLGG Anlage wurde extra ein Steg gebaut (Abbildung 3-13, links unter dem TUM Logo im Bild) damit nicht durch die Anordnung eine Stolperfalle entsteht und dadurch versehentlich die Sensoren abgerissen werden. Auf der Impaktoberfläche wurden die Sensoren durch Holzkonstruktionen ebenfalls vor Gesteinsbrocken geschützt (Abbildung 3-2, S. 29).



**Abbildung 3-13:** Ein Blick in das Innere der begehbaren XLLGG Targetkammer mit Sandstein Probekörper und SEA Sensorik. Um den Probekörper herum ist ein Holzkasten zum Auffangen des ausgeworfenen Materials. Unten links ist ein Steg zum Schutz der Kabel zu sehen.

Die Sensoren müssen gut auf der Oberfläche des Probekörpers befestigt werden. Die V103 Sensoren wurden mit Heißkleber auf die Oberfläche geklebt (Abbildung 3-14). Nach den ersten Versuchen zeigte sich, dass diese Befestigung für die Experimente mit geringerer Energie ( $\sim 672$  J, siehe Tabelle 1-2) ausreichte und die Sensoren nach dem Experiment noch gut an der Oberfläche hafteten (Abbildung 3-14). Bei den Experimenten mit erhöhten Energiewerten (bis zu 82731 J, siehe Tabelle 1-2, S. 19) hatten die Sensoren keinen Halt mehr auf der Oberfläche, nachdem sie von der ersten Energiewelle erreicht wurden (Abbildung 3-15). Daher wurden die Sensoren zusätzlich mit Halterungen versehen, die an dem Probekörper festgeschraubt wurden

(Abbildung 3-16). Die KRNB-PC Sensoren müssen generell zur Fixierung in Halterungen eingeschraubt werden. Diese Halterungen werden ebenfalls mit Heißkleber an der Oberfläche befestigt und wiederum mit Schrauben fixiert (Abbildung 3-17). Zusätzlich wurde auf die Oberfläche, genau dort, wo die Sensorspitze den Probekörper berührt, Sekundenkleber aufgetragen. Der getrocknete Sekundenkleber soll die raue Oberfläche der zurechtgesägten Probekörper ausgleichen und so eine gute Ankopplung gewährleisten. Bei den V103 Sensoren wird diese durch den Heißkleber erreicht.



**Abbildung 3-14: V103 Sensor für die SEA mit einer großen Menge Heißkleber für eine bessere Fixierung an der rauen Oberfläche.**



**Abbildung 3-15: Abgefallener Sensor durch hohen Energiegehalt der durchlaufenden elastischen Welle.**



**Abbildung 3-16: Extrahalterung für eine bessere Fixierung der V103 Sensoren.**



**Abbildung 3-17: Halterung für die KRNB-PC Sensoren, hier zusätzlich mit Schrauben am Probekörper fixiert.**

Bei einigen Experimenten an der XLLGG wurden KRNB-PC Sensoren auch in Bohrlöchern versenkt. Dies soll es ermöglichen einen höheren Energieanteil der Impaktsignale zu erhalten und dadurch eine eventuelle Stoßwelle noch registrieren zu können. Auch diese Sensoren mussten über eine spezielle Halterung in die Bohrlöcher eingelassen und an der Oberfläche befestigt werden. Die Halterungen wurden extra dafür angefertigt und bestehen aus einem Rohr, das auf der einen Seite ein Innengewinde hat, sodass die Sensoren ins Innere des Rohres eingeschraubt werden können (Abbildung 3-18). Auf der anderen Seite ist ein Außengewinde, damit das Rohr in die Fixierungshilfe (Abbildung 3-19) eingeschraubt werden kann, die wiederum an dem Probekörper befestigt wird. Gerade bei den in den Bohrlöchern eingebetteten Sensoren ist die Beanspruchung während der Experimente hoch.



**Abbildung 3-18: Sensorhalterung für die Sensoren in den Bohrlöchern. Hier nach einem Experiment mit teilweise gesättigtem Sandstein. Durch das Sandstein-Wasser-Gemisch kommt es zu starken Verschmutzungen der Sensorik.**



**Abbildung 3-19: Äußere Fixierung der Halterung für einen Bohrloch-Sensor.**

In Abbildung 3-18 ist deutlich zu erkennen, dass die Sensoren während der Experimente stark verschmutzen können. Auch die Befestigung der Sensoren (Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15, S. 46) und die Möglichkeit, dass die Sensoren abfallen und somit auf den Boden aufschlagen (Abbildung 3-15), führt dazu, dass die Sensoren von Zeit zu Zeit getestet und neu kalibriert werden müssen.

### 3.2.2 Ultraschall-Tomographie

Bei der Ultraschall-Tomographie (UST) handelt es sich um eine modifizierte Form der Ultraschallprüfung (USP). Für die Ultraschallprüfung wird das Wissen ausgenutzt, dass die Wellenausbreitung stark in Zusammenhang mit den Eigenschaften des Materials steht, in dem sich die Welle ausbreitet. Außerdem ist in einem isotropen Material die Wellengeschwindigkeit konstant (Pilkington und Grieve [1992], Ahrens

und Rubin [1993], Xia und Ahrens [2001], Ai [2006]). An Grenzflächen oder durch eine Heterogenität hingegen verändert sich die Welle durch Brechung, Reflexion und Dispersion, beziehungsweise wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit beeinflusst (O'Connell und Budiansky [1974], Pilkington und Grieve [1992], Moser et al. [2013b]). Die allgemeine Aufgabe der Ultraschallprüfung ist die Bestimmung von Ort, Form, Größe und Orientierung von Fehlstellen oder einer Inhomogenität im Untersuchungsobjekt (Spies und Rieder [2009]). Bei den hier verwendeten Probekörpern dient sie der Visualisierung der Schädigungszone unterhalb des Kraters beziehungsweise im Innern des Probekörpers. Die Ultraschallprüfung wird hier im Durchschallungsverfahren (auch Impuls-Laufzeit-Verfahren genannt) angewendet. Durch die dreidimensionale Betrachtung der Probekörper, können tomographische Schnittebenen erzeugt werden, die ein detaillierteres Bild der Schädigungszone ergeben. Bereits frühere Arbeiten von Polansky und Ahrens [1990], Ai [2006], Kenkmann et al. [2011], Buhl et al. [2013] und Moser et al. [2013] haben auf unterschiedliche Weise gezeigt, dass bei einem Impakt eine quasi hemisphärische Ausbreitung der Schädigung mit dem Krater als Mittelpunkt angenommen werden kann.

Die einfachste Methode in der Ultraschallprüfung stellt das Impuls-Laufzeit-Verfahren dar, das eine Aussage über die vorherrschende Wellengeschwindigkeit im Prüfkörper treffen kann. Bei diesem Verfahren werden zwei Sensoren gegenüber platziert und in Durchschallung angewendet. Dementsprechend erhält man bei dieser Messung lediglich einen Durchschnittswert der Wellengeschwindigkeit über den gesamten Laufweg der Wellen. Sind verschiedene Materialien im Prüfobjekt vorhanden, die teilweise eine höhere oder niedrigere Materialgeschwindigkeit haben, so erhöht oder erniedrigt sich auch die Durchschnittsgeschwindigkeit. Neben der Laufzeitauswertung in der Ultraschallprüfung, hat sich auch die Auswertung der Amplituden durchgesetzt. Hierbei wird sich zu Nutze gemacht, dass Fehlstellen oder Ähnliches zu einer Amplitudenabnahme führen, da die Welle an Fehlstellen gedämpft bzw. gestreut wird und daher an Energie verliert (Große [1996]).

Die UST verfolgt das Ziel einer besseren Auflösung im Prüfkörper, sodass nicht die durchschnittliche Geschwindigkeit über eine Linienmessung gezeigt wird, sondern eine dreidimensionale Auflösung mit Punktinformationen. Das bedeutet, dass graphische Schnittbilder wie bei der Computer-Tomographie (CT) erzeugt werden können, die eine gewisse Auflösung innerhalb eines Messrasters aufweisen (Moser et al. [2013]).

Generell werden Tomographie-Verfahren als bildgebende Verfahren beschrieben, welche das Innere eines Objektes mit Messungen an der Oberfläche darstellt. Eine der bekanntesten Anwendungen ist laut Schickert [2004] die Computer-Tomographie in der Medizintechnik. Ein typisches Anwendungsgebiet des Ultraschallverfahrens ist

neben der Medizintechnik auch die Schweißnahtprüfung, das Bauwesen oder die Prüfung von Klebungen im Maschinenwesen (Große [2011]). Die Tomographie stellt eine nicht invasive Erfassung von räumlich verteilten Objekten (zwei- oder dreidimensional) dar, die aus mehreren Einzelmessungen zusammengefügt wird (Trächtler [2001]). Jedoch wird die Tomographie nicht nur in der Medizin, sondern auch in der Geowissenschaft und in der Physik angewendet. In den Geowissenschaften (Geophysik) wird zum Beispiel ein Bild des Erduntergrundes durch reflektionsseismische Messungen gefertigt. Einer der Unterschiede zwischen tomographischen Messungen in der Medizin und der Technik liegt in der Anzahl der verwendeten Messpunkte. In der Medizin ist es wichtig eine sehr hohe Auflösung zu erhalten. Hier müssen sehr kleine Details im Körper aufgelöst werden. Die Messungen befinden sich daher in einem Bereich von  $10^4$  bis  $10^6$  Messpunkte pro Aufnahme (Michael [2001]). Oft wird nur ein Ausschnitt aus dem menschlichen Körper betrachtet, zum Beispiel Teile des Kopfes, damit die Auflösung entsprechend hoch ist (region of interest). Das Messraster liegt dann im Mikrometerbereich ( $\mu\text{m}$ ) und kleiner. Bei der ZfP und den Geowissenschaften hingegen liegt die Anzahl der Messpunkte eher im Bereich von etwa 10 – 1000 Messpunkten und damit im Bereich von Zentimeter (cm) bis Meter (m) (Ackermann und Godson [1975], Zeis et al. [1989], Moser et al. [2013]).

Die Heterogenität der Prüfmaterialien führt zur Dämpfung der Schallwellen und limitiert so die Auflösung. Es kommt zu einem Rauschen (Noise) im Signal. Prinzipiell können nur Fehlstellen oder Objekte gefunden werden, die größer als die größte Heterogenität (z. B. Zuschläge) im Material sind, durch die die Welle laufen muss (Große [2011]). Bei längerem Laufweg nimmt auch die Dämpfung des Signals zu.

### **a. Messprinzip**

Innerhalb dieser Arbeit wurde die Ultraschall-Durchschallung in Transmission als grundlegendes Prinzip für die Ultraschall-Tomographie (UST) verwendet. Die einfachste und am schnellsten durchführbare Auswertung beim Ultraschallverfahren wird über die Laufzeit der Ultraschallwelle, hier der Kompressionswelle, ausgeführt. Es ist bereits bekannt, dass die seismischen Geschwindigkeiten eines Materials von vielen kleineren Rissstrukturen deutlich stärker beeinflusst werden, als wenn es nur einige wenige große Rissstrukturen aufweist (Pilkington und Grieve [1992]). Das Ultraschallverfahren ist rein mathematisch relativ einfach zu erklären.

Für die Messung wird der Zusammenhang zwischen der Entfernung der verwendeten Sensoren ( $s$ ), der Laufzeit der Welle ( $t$ ) und der im Material vorherrschenden

Geschwindigkeit ( $v$ ) herangezogen (Große [1996], Moser et al. [2013], Moser et al. [2013b]):

$$v = \frac{s}{t}. \quad (3.16)$$

Die Messung erfolgt über zwei Sensoren. Über den Impulsgeber wird ein Ultraschallimpuls in das Prüfobjekt gesendet und auf der gegenüberliegenden Seite wird das Signal von dem Impulsempfänger registriert. Da bei der Ultraschallmessung meistens die Wellengeschwindigkeit im Material von Interesse ist, sollte vor allem der Laufweg bekannt sein. Die Zeit, die die Welle vom Gebersensor zum Empfängersensor benötigt, wird gemessen. Dabei ist es wichtig, dass der Zeitpunkt des Geberimpulses mit aufgezeichnet wird. Der zeitliche Abstand zwischen dem Zeitpunkt, an dem die erste Welle am Empfängersensor registriert wird, und dem Zeitpunkt, an dem das Gebersignal ausgesendet wird, ergibt die Laufzeit der Welle. Hierbei muss die Totzeit des Sensors beachtet werden. Diese wird ermittelt, in dem eine Messung an einem Probekörper mit bekannter Laufzeit durchgeführt wird. Die Totzeit ist vom verwendeten Sensor abhängig. Meist wird die Kompressionswelle für diese Art der Messung verwendet, da diese die schnellste Welle in Feststoffen ist, und daher am einfachsten identifiziert werden kann.

Bei einer Ultraschallmessung sollte jedoch bedacht werden, dass es sich im Wesentlichen um eine Durchschnittsgeschwindigkeit über den gesamten Weg handelt (Moser et al. [2013b]). Sollten in dem gemessenen Material Einschlüsse mit höherer oder niedrigerer Geschwindigkeit enthalten sein, so wird die Durchschnittsgeschwindigkeit dementsprechend erhöht oder erniedrigt. Bei einer Ultraschallmessung wird zudem angenommen, dass sich die Wellen auf dem schnellsten Weg ausbreiten. Dies muss nicht unbedingt auch der kürzeste Weg sein (Abbildung 3-20). Sollte die Welle also über einen Umweg laufen oder eine Heterogenität vorhanden sein, so erhöht sich die Laufzeit und die Geschwindigkeit der Welle wird als langsamer interpretiert.

Die UST soll genau das Problem einer Durchschnittsgeschwindigkeit umgehen und die Aussagekraft dieser Methode erhöhen. Bei vielen Prüfkörpern sollen Einschlüsse oder Fehlstellen charakterisiert und lokalisiert werden. Daher werden Messungen rund um den Prüfkörper gemacht. Für eine möglichst genaue Auflösung muss das Messraster entsprechend eng gewählt sein und in alle drei Raumrichtungen durchgeführt werden. Eine ähnliche Herangehensweise wurde bereits von Ahrens und Rubin [1993], Xia und Ahrens [2001] und Ai [2006] zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes unterhalb von experimentellen Kratern verwendet. Hierbei wurde der beschossene Probekörper anschließend in  $1 \text{ cm}^3$  Würfel geschnitten und an jedem Würfel eine Ultraschallmessung durchgeführt. Diese Methode bringt eventuell genauere

Ergebnisse als die hier durchgeführte UST, da sie den jeweiligen Würfel einzeln betrachtet. Jedoch ist diese Methode nicht mehr zerstörungsfrei und damit ist der Probekörper nicht mehr für andere Messungen verfügbar. Die Aufteilung des Probekörpers in kleinere Würfel kann außerdem zu neuen Rissen oder zu der Ausweitung bereits vorhandener Risse führen. Die gleiche Problematik besteht bei der Methode von Xia und Ahrens [2001], bei der die Probekörper in 1 cm dicke Platten geschnitten werden und dann die US-Geschwindigkeiten gemessen werden.

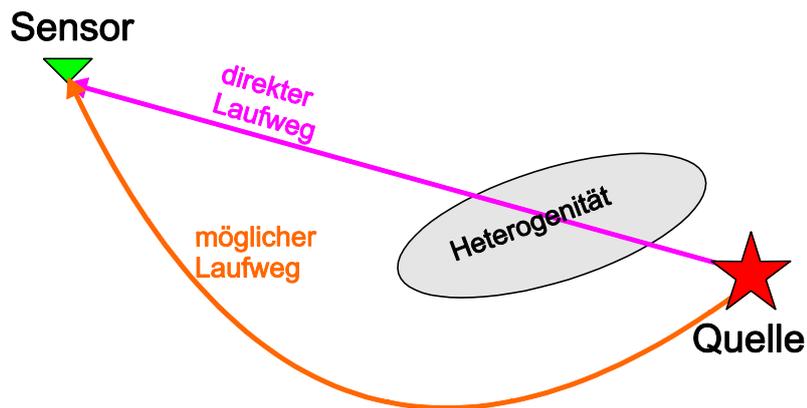


Abbildung 3-20: Schematische Darstellung des direkten Laufweges einer Welle und des angenommenen Laufweges einer Welle im dreidimensionalen Raum, beeinflusst durch die Heterogenität des Prüfobjektes.

Bei einer einfachen US-Durchschallung, also bei einer einzelnen Punktmessung, spricht man von einem A-Scan. In der Geophysik wird die daraus resultierende Amplitudendarstellung als Seismogramm bezeichnet. Wird eine solche Messung entlang einer Linie mehrmals wiederholt, erhält man einen B-Scan (ein seismisches Profil). Der nächste Schritt zu einer höheren Auflösung ist eine flächendeckende Messung, die als C-Scan bezeichnet wird. Wird ein solcher C-Scan in verschiedenen Ebenen ausgewertet, so erhält man einen D-Scan (ähnlich der 3D Seismik) und damit eine räumliche Abbildung vom Inneren des Prüfobjektes (Große [1996], Friese et al. [2008]). Im Falle der UST kann somit von einer Art D-Scan gesprochen werden, da auch hier flächendeckende Messungen (C-Scans) in allen drei Raumrichtungen zu einer dreidimensionalen Aussage, und somit auch über das Innere des Probekörpers, führen. In Abbildung 3-21 wird das Prinzip von A-, B- und C-Scan schematisch dargestellt. Bei der Durchführung eines A-Scans kann man das Signal nicht eindeutig interpretieren, da es nur eine Aussage über eine einzige (nicht bekannte) Strecke enthält. Deshalb sollte mindestens ein B-Scan durchgeführt werden. Sollte im Bereich der Messung eine Heterogenität auftauchen, so spiegelt sich diese als Hyperbel in der charakteristischen Darstellung eines B-Scans wieder (Amplitudendarstellung, siehe Abbildung 3-21, hier ohne Hyperbel, da keine Störung enthalten ist). Für eine

Darstellung von Fehlstellen außerhalb dieses B-Scans wird die erweiterte Messung eines C-Scans oder für eine noch bessere Auflösung die eines D-Scans angestrebt (Schickert und Hillger [2009]). Abbildungsverfahren von Fehlstellen in Prüfobjekten oder die Dickenmessungen über B- und C-Scans sowie eine Rekonstruktion über SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) sind bereits erprobt worden und zeigen gute Ergebnisse (Schickert et al. [2003], Friese et al. [2008], Krause et al. [2008], Schickert und Hillger [2009]). Hierbei wird jedoch jeweils davon ausgegangen, dass das zu prüfende Objekt lediglich von einer Seite zugänglich ist. Somit wird hier nicht in Transmission, sondern in Reflektionen gemessen.

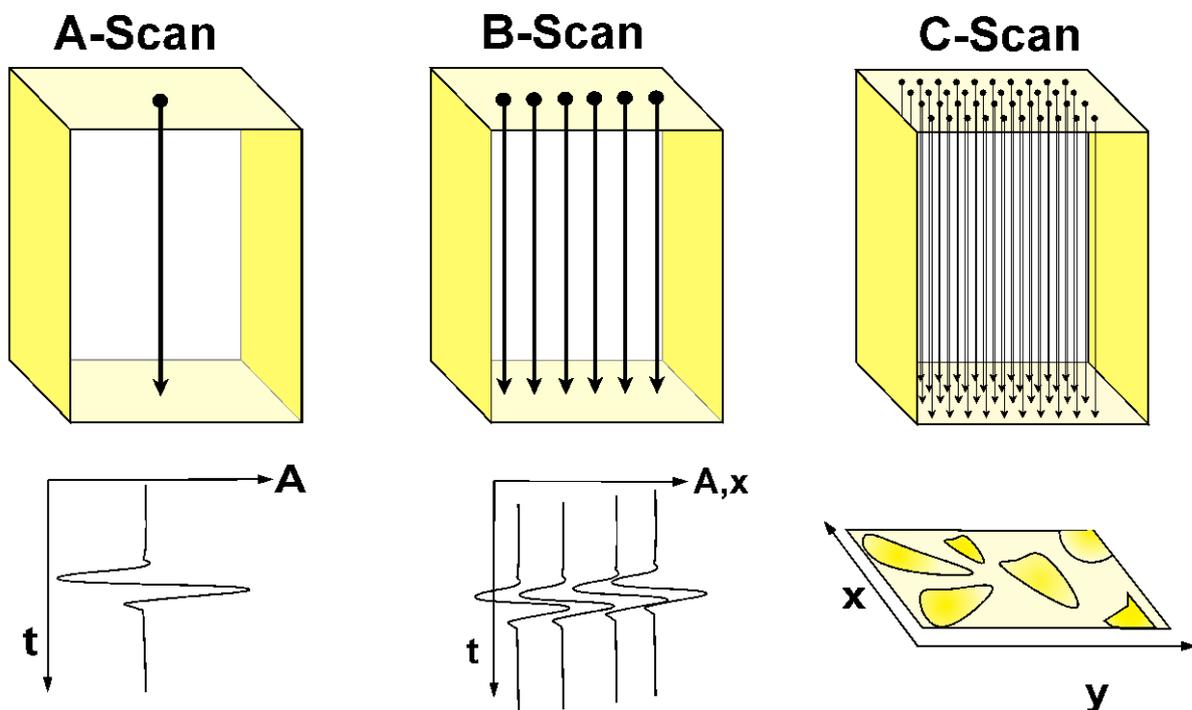


Abbildung 3-21: Schematische Darstellung zur Erläuterung von A-, B- und C-Scan in der Ultraschalltechnik. Oben: Versuchsschema; Unten: Ergebnisdarstellung (Große [1996]).

Ein wichtiger Aspekt bei der Ultraschallprüfung ist die Ankopplung der Sensoren an das Prüfobjekt, da sich Lufteinschlüsse stark auf die Ausbreitung des Ultraschalls auswirken. Daher werden bei Ultraschallmessungen verbreitet Koppelmittel (Wachs, Ultraschallgel, Klebstoffe oder andere viskose Flüssigkeiten) verwendet, die solche Lufteinschlüsse und eine unebene Oberfläche ausgleichen sollen (Große [1996], Große [2011]). Hierzu wurden einige Test durchgeführt (siehe Kapitel 6.1), die die Wahl des hier verwendeten Wachses als Koppelmittel stützen.

Eine Möglichkeit, um eine Geometrie oder Fehlstellen aufzufinden, bieten die kommerziell erhältlichen Scherwellentomographiergeräte (z. B. A1220) der Firma *Acoustic Control System*, die mit Reflektionen von Transversalwellen arbeiten. In

diesem Fall wird das Gerät mit dem Impuls-Echo-Verfahren angewendet. Das Messsystem besteht aus mehreren Einzelprüfköpfen. Die Hälfte der Einzelprüfköpfe dienen als Gebersensoren und die andere Hälfte als Empfängersensoren. Die Signale der Gebersensoren werden gebündelt in das Prüfobjekt gesendet und an einer Schichtgrenze oder an Fehlstellen reflektiert und an den Empfängersensoren wieder registriert. Dieses System ist besonders dann von Interesse, wenn das Prüfobjekt nur von einer Seite zugänglich ist. Oft wird das Impuls-Echo-Verfahren verwendet, um die Dicke des Prüfobjektes zu ermitteln. Voraussetzung ist jedoch die Wellengeschwindigkeit im Prüfobjekt hinreichend genau zu kennen. Eine Anwendung eines Ultraschall-Prüfkopfarrays zur Untersuchung von Betonbauteilen wird in Friese et al. [2008] gezeigt. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurden extra zwei A1220 Prüfköpfe so modifiziert, dass jeder Sensor in den Prüfköpfen einzeln angesteuert werden kann. Ein Prüfkopf wurde als Geber und der andere als Empfänger eingerichtet. Damit erhält man zwei Sensorprüfköpfe mit jeweils 24 Einzelsensoren, die für eine Durchschallung verwendet werden können. Da so aber alle Sensoren eine eigene Messeinheit bilden und das Signal nicht mehr gebündelt wird, ist das Signal zu schwach für die sehr dichten Materialien. Die Überlagerung von Messdaten aus verschiedenen Positionen der Sende- und Empfängerprüfköpfe führt zu einem besseren S/N-Verhalten (Friese et al. [2008]). Die Prüfköpfe sind in der modifizierten Bauart für das hier gestellte Problem nicht anwendbar und wurden deshalb in dieser Arbeit nicht weiter verwendet.

Statt der Geschwindigkeitswerte kann auch eine Auswertung mittels der Amplituden bzw. der Energie für die UST durchgeführt werden. Die Veränderung der Amplitude durch Risse oder andere Strukturen spiegelt den Energieverlust der Welle wieder. Bei den hier durchgeführten Messungen wurden die Sensoren mit der Hand über das Messraster geführt. Der Anpressdruck kann bei einer Handmessung nicht konstant gehalten werden und wurde auch nicht während der Messungen erfasst. Die Amplitudenauswertung kann nur bestehen, wenn der Anpressdruck bei jeder Messung gleich bleibt. Bei einem schwächeren Anpressdruck ist der Kontakt zwischen Sensor und Probekörper von Beginn an nicht optimal und die Energie wird schlechter übertragen, beziehungsweise kann schon an der Oberfläche des Probekörpers verloren gehen. Somit ist eine Amplitudenauswertung nur bei konstantem Anpressdruck sinnvoll.

#### **b. Messsystem, Sensorik und verwendete Auswertungsprogramme**

Die Messtechnik für die Ultraschall-Tomographie (UST) ist bisher nicht automatisiert und daher mit großem Messaufwand verbunden. Das optimale Verhältnis zwischen Automatisierungsgrad, Anwendungsnutzen und Anwendbarkeit ist noch nicht gefunden (Große [2011]). Für eine möglichst einfache und schnelle Handhabung der

Daten wurden vorhandene Messsysteme genutzt. In diesem Fall wurden zwei Messsysteme kombiniert. Die Sensoren und der Ultraschallimpulsgeber wurden von der Firma *Geotron* verwendet. Die Sensoren UPE-D (Ultraschall Piezoelektrischer **E**mpfänger-Dehnwelle) und UPG-D (Ultraschall Piezoelektrischer **G**eber-Dehnwelle) (Abbildung 3-22) dienen dabei als Ultraschallsensoren. Der UPG-D-Sensor wird mit dem Ultraschallgeber verbunden, gleichzeitig wird der Ultraschallgeber mit dem Messrechner verbunden, damit der Zeitpunkt des Ultraschallimpulses als Trigger für die Messung mit aufgezeichnet wird. Das Triggersignal kann, je nach Art und Stärke des Signals verstärkt werden, sodass ein eindeutiger Signalausschlag (Ersteinsatz) erzielt wird. Der UPE-D-Sensor wird direkt an die Messkarte im Messrechner angeschlossen. Mit den geeigneten Programmen kann über diesen Aufbau entweder eine Einzelmessung oder eine Messserie durchgeführt werden.

Für die Tomographie-Messungen wurde das Messprogramm *FreshCon* verwendet. Dieses Programm ermöglicht es mehrere Messungen hintereinander durchzuführen. Ursprünglich wird *FreshCon* für die Überwachung der Aushärtung von Beton oder Mörtel verwendet. Mit dem Messsystem ist es möglich, über eine bestimmte Zeit eine gewünschte Anzahl von Messungen durchzuführen. Die Messungen werden automatisch mit einem vorher definierten Zeitintervall durchgeführt. Für die UST kann die Anzahl der Messpunkte im Messraster angegeben werden. Das Zeitintervall zwischen den Einzelmessungen kann individuell angepasst werden. Die Messkette für die UST, wie sie hier angewendet worden ist, kann in Abbildung 3-23 nachvollzogen werden. Nachdem die Messung durchgeführt worden ist, können mit dem dazugehörigen Auswertungstool *SmartPick* die Ersteinsätze des Signals, die der UPE-D-Sensor registriert, gepickt werden (Abbildung 3-24).



Abbildung 3-22: Geotron Sensoren. Ein Sensor fungiert als Geber (UPG-D) und ein Sensor als Empfänger (UPE-D). Die Kontaktfläche an der Spitze beträgt bei beiden etwa 2-3 mm im Durchmesser.

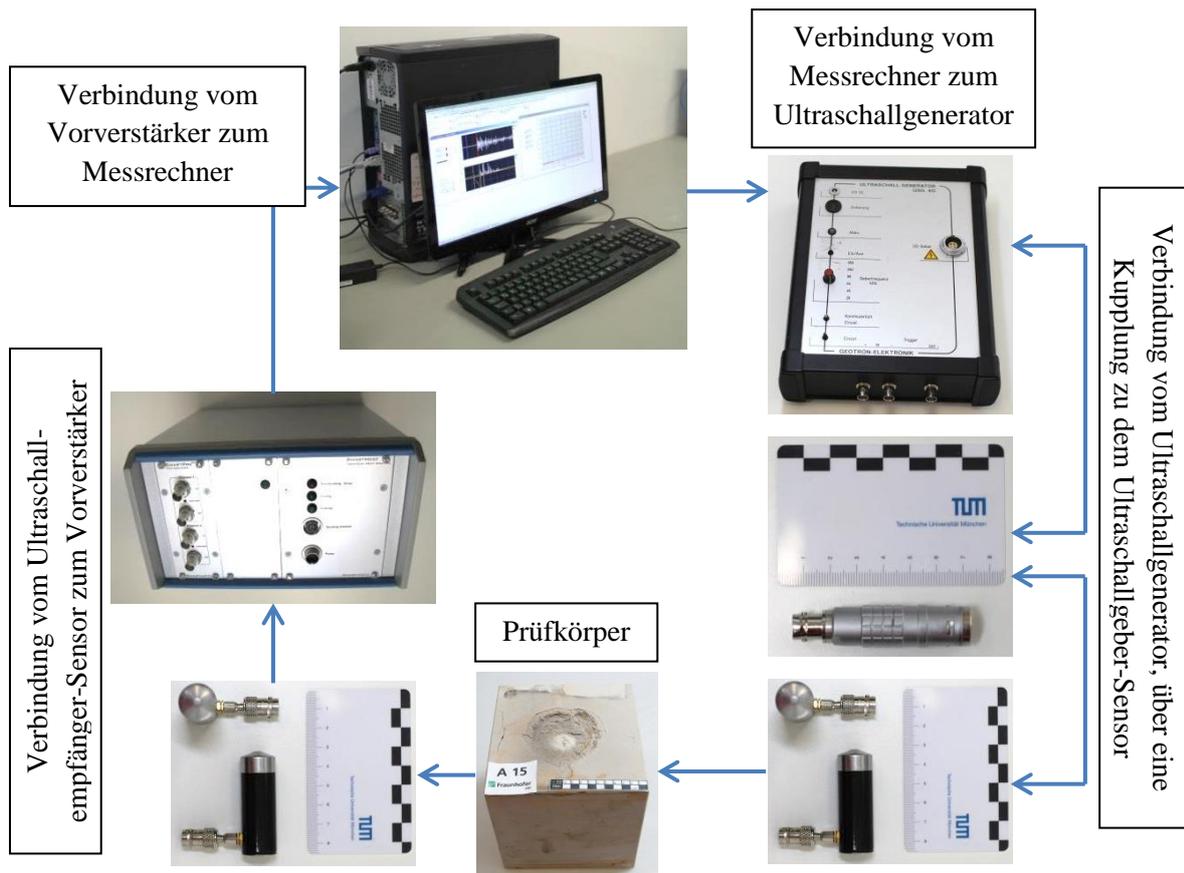


Abbildung 3-23: Typische Messkette der Ultraschall-Tomographie.

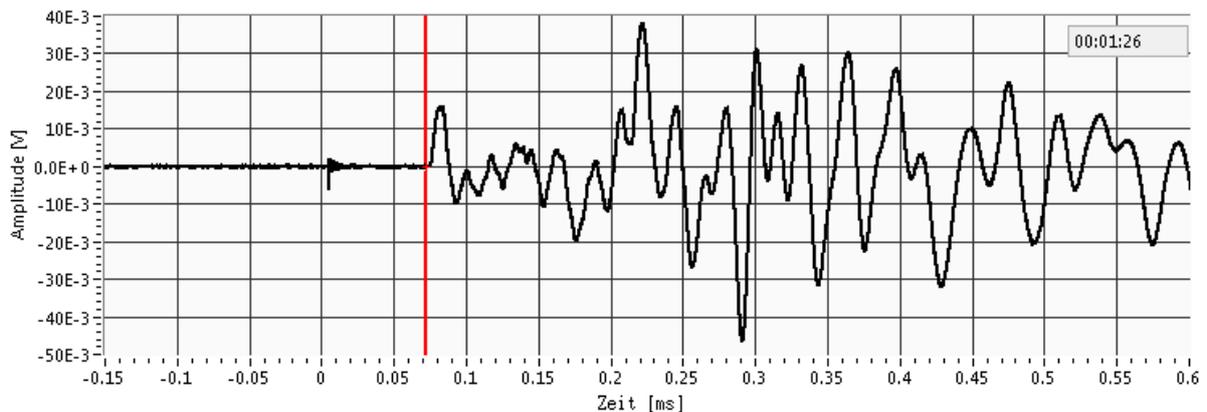


Abbildung 3-24: Typisches Ultraschall-Signal eines Sandstein-Probekörpers aus der Ultraschall-Tomographie, dargestellt mit dem *SmartPick* Programm. Auf der Ordinate ist die Amplitude und auf der Abszisse die Zeit aufgetragen. Der rote Cursor zeigt den Zeitpunkt der untersuchten Welle an.

Für die Auswertung der Daten werden diese in das Programm *SmartPick* geladen und der Ersteinsatz für jedes Signal gepickt. Über die gepickte Zeit und die bekannte Strecke wird nach Formel (3.16) (S. 51) die Geschwindigkeit der Welle für diesen Messpunkt berechnet. Die berechneten Geschwindigkeiten werden in eine Excel

Tabelle geschrieben, die die Messpunkte (mit den gemessenen Geschwindigkeiten) an der Oberfläche beschreibt. Zur Visualisierung der Geschwindigkeiten wurde ein *MATLAB* Programm (Anhang V) entwickelt. Das Programm verwendet die angefertigten Excel Tabellen und berechnet für jeden Gitterpunkt in dem Probekörper, also auch im Inneren des Probekörpers, die Geschwindigkeit. Es entsteht ein dreidimensionales Bild. Bei der Visualisierung der Daten war vor allem die Überlegung wichtig, wie die darzustellende Geschwindigkeit berechnet wird.

Mit der Annahme des kürzesten Laufweges, kann davon ausgegangen werden, dass sich in einen Punkt  $(x_i, y_i, z_i)$  im Probekörper drei Einzelmessungen treffen (Abbildung 3-25). Das bedeutet, die im Punkt  $(x_i, y_i, z_i)$  vermutete Geschwindigkeit kann über die Ergebnisse dieser drei sich treffenden Messungen dargestellt werden. Für die hier verwendeten Probekörper wurde immer die schnellste der drei Linienmessungen als *tatsächlicher* Geschwindigkeitswert angenommen. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass die schnellste Linienmessung durch die wenigsten Störungen auf ihrem Laufweg beeinflusst wird. Die berechnete Geschwindigkeit an dem Punkt  $(x_i, y_i, z_i)$  kann somit nicht wirklich als *tatsächliche* Geschwindigkeit bezeichnet werden, aber als die Geschwindigkeit, die der tatsächlichen Geschwindigkeit am nächsten kommt. Aus diesem Grund werden in den Darstellungen der tomographischen Bilder keine absoluten Geschwindigkeitswerte angegeben, sondern die normierte Geschwindigkeit in Prozent. Der höchste Geschwindigkeitswert ist somit 1 (= 100 %). Diese Darstellung ist auch deshalb sinnvoller, da die Ergebnisse so untereinander besser zu vergleichen und zu interpretieren sind, auch weil die unterschiedlichen Probekörper unterschiedliche Materialgeschwindigkeiten haben. Wird der prozentuale Abfall der Geschwindigkeit gezeigt, wird deutlich sichtbar, dass einige Probekörper eine wesentlich umfassendere und tiefer gehende Schädigung aufweisen als andere. Diese Unterschiede liegen am Probekörpermaterial und an der Impaktenergie. Der zweite Grund für eine prozentuale Abweichung der Geschwindigkeiten liegt an der Messung selbst. Da mit längerer Lagerung die Geschwindigkeiten der Probekörper variieren, zeigen gleiche Materialien starke Unterschiede in der Geschwindigkeit. Solche Unterschiede können zum Beispiel durch Schwankungen der Luftfeuchtigkeit oder der Temperatur entstehen. Da die Probekörper nicht alle im gleichen Raum, geschweige denn in der gleichen Stadt aufbewahrt werden, kommen die Variationen zustande. Auf Grund der Menge und Größe der Probekörper war es nicht möglich alle Probekörper unter den gleichen und gleichbleibenden Bedingungen (zum Beispiel Klimaraum oder Ähnlichem) zu lagern.

Die unbedingte Verwendung von Koppelmitteln wurde bereits erwähnt. Jedoch ist es auch wichtig die Messung präzise durchzuführen. Dazu gehört, dass die Messung möglichst genau am Messraster entlang läuft, aber auch, dass die Sensoren direkt gegenüber platziert und senkrecht zur Messfläche an den Probekörper angelegt werden. Dies ist besonders wichtig, da die Richtungscharakteristik der verwendeten

Sensoren nicht in allen Raumrichtungen gleich ist (Abbildung 3-26). Man spricht bei dieser Eigenschaft von Abstrahlkeulen. Diese sind abhängig vom Sensor und sollten durch Kalibrierung der Sensoren überprüft werden.

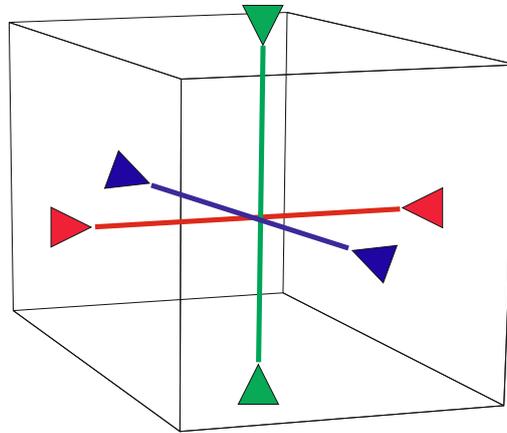


Abbildung 3-25: Prinzip zur Berechnung der Ultraschall-Tomographie-Darstellung. Die rote, blaue und grüne Linie stellen jeweils eine Durchschallungsmessung dar, die Dreiecke die Positionen der Sensoren.

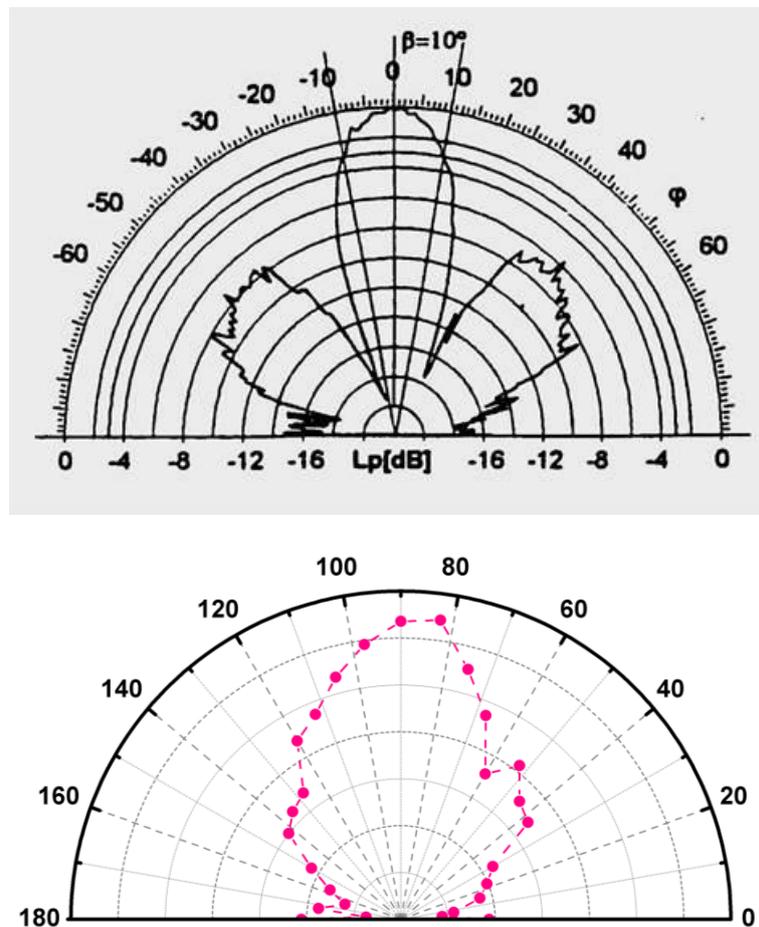


Abbildung 3-26: Beispiele für die Richtungscharakteristik von Ultraschallaufnehmern, gemessen von Langen [1993] (oben) und Große [1996] (unten).

### c. Versuchsaufbau

Um eine Ultraschall-Tomographie (UST) durchzuführen und mit dem Ergebnis eine Aussage machen zu können, ist die Auflösung der Messung wichtig. Dabei ist einerseits zu beachten, das Messraster eng genug zu wählen, um die gesuchte Struktur auflösen zu können. Andererseits sollte das Messraster für eine UST nicht zu eng sein, da sonst die Anzahl der Messungen im angemessenen zeitlichen Rahmen nicht mehr manuell durchführbar sind. Für diese Arbeit wurde ein durchgehendes Messraster mit 1 cm Abstand zwischen den Messpunkten verwendet (Punkte in Abbildung 3-27). Für die Probekörper mit 20 cm Kantenlänge wurde das Messraster auf allen Oberflächen verwendet. Bei den größeren Probekörpern war es nicht möglich, von allen Seiten zu messen, sodass die Oberfläche mit dem Krater und die gegenüberliegende Oberfläche (für die Lagerung ist dies die Auflagefläche) nicht durchschallt wurden.

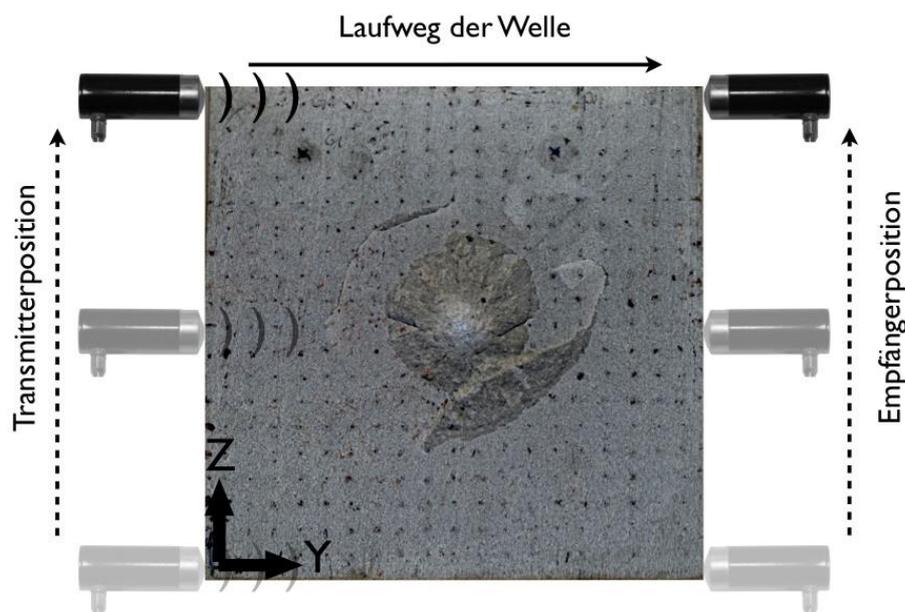


Abbildung 3-27: Verlauf einer Linienmessung bei der Ultraschall-Tomographie. Das Sensorpaar wandert entlang des Messrasters von einer Kante zur gegenüberliegenden Kante (Dura [2013]).

Eine komplette Tomographie an einem Probekörper mit 20 cm Kantenlänge und einem Messraster von 1 cm benötigt insgesamt 7.001.316 Einzelmessungen. Komplette bedeutet in diesem Fall, dass von jedem Messpunkt auf der Probekörperoberfläche eine Messung zu jedem anderen Messpunkt durchgeführt wird. In dieser Arbeit werden nur Messergebnisse vorgestellt, bei denen eine UST in Durchschallung durchgeführt worden ist. Das heißt, der Sender und der Empfänger liegen bei jeder Messung gegenüber mit einem Abstand einer Probekörperkantenlänge. Bei den

Probekörpern mit 20 cm Kantenlänge werden somit nur 1323 Einzelmessungen benötigt. Dabei besteht jede Einzelmessung aus einem gemittelten Wert, der wiederum aus sechs Messungen ermittelt wird. Das verwendete Messprogramm macht dabei in kurzen zeitlichen Abständen die sechs Messungen und zeigt dann nur noch den gemittelten Wert an. Abbildung 3-27 zeigt den schematischen Ablauf der Messung. Für die Messung werden die oben beschriebenen zwei Sensoren verwendet, wobei der eine als Signalegeber und der andere als Signalempfänger fungiert. Die beiden Sensoren werden an der Probekörperoberfläche direkt gegenüber angesetzt, sodass der Abstand genau der Kantenlänge des Probekörpers entspricht. Nach einer Messung werden die Sensoren im Messraster versetzt, bis an allen Messpunkten innerhalb einer Reihe einmal gemessen worden ist, wobei immer nur in eine Richtung gemessen wird (siehe auch Moser et al. [2013]). Es gibt daher keine Rückmessung, Sender und Empfänger tauschen nicht die Seite. Die Durchschallungsmessungen werden durchgeführt, bis alle Messungen beendet sind. Danach werden die Signale auf ihren Ersteinsatz gepickt (Abbildung 3-24). Anschließend wird die Zeit, die das Signal vom Geber zum Empfänger benötigt, und die Strecke, die das Signal bei einem geraden Strahlenweg zurücklegen würde, verwendet, um die Geschwindigkeit der Kompressionswelle zu berechnen.

Die Geschwindigkeiten jeder Einzelmessung werden dann in eine *Excel*-Tabelle eingefügt. Mit Hilfe der *Excel*-Tabelle und des *MATLAB*-Programms werden die Geschwindigkeiten miteinander verrechnet. In Kapitel 4.3 werden die Ergebnisse der Tomographie gezeigt.

### 3.2.3 Modalanalyse

Jedes elasto-mechanische Objekt besitzt dynamische Eigenschaften, die mittels der Modalanalyse erfasst werden können. Die Modalanalyse ist die erweiterte Messung einer Schwingungsanalyse. Bei der Schwingungsanalyse werden die Schwingungsfrequenzen beziehungsweise die elastischen Moden des zu untersuchenden Objektes gemessen. Der Unterschied zur Modalanalyse besteht in der Anzahl der Messpunkte. Während bei der Schwingungsanalyse gezielt Punkte angeregt werden, um bestimmte Schwingungen zu erhalten, wird bei der Modalanalyse ein Messraster angelegt. Auf diesem Messraster kann entweder der Impulshammer für die Anregung, der messende Sensor oder beide bewegt werden. Die Frequenzbilder zeigen die Frequenzen der Schwingungen, über die die Schwingungsmoden und deren Oberschwingungen berechnet werden. In einem dreidimensionalen Bild können die Schwingungen nachvollzogen werden. Mit Hilfe der Schwingungsfrequenzen der Grundmoden wird auf die elastischen Module geschlossen. Man spricht dann von dynamischen Modulen (*dynamisches* Elastizitätsmodul, *dynamisches* Schermodul usw.) (Jones und Façaoaru [1984]). In Gegensatz zu statistischen Modulen.

Das hier vorgestellte Messverfahren wird in vielen Industriezweigen angewendet und dient der Qualitätssicherung. Die Messungen sollen eine Strukturbeurteilung ermöglichen und werden meistens zur Lokalisierung unerwünschter Schwingungen herangezogen. Im Bauwesen wird die Schwingungsanalyse meist zur Bestimmung der elastischen Parameter von Baumaterialien verwendet. Schließlich kann damit die Reproduzierbarkeit bzw. die Qualität einzelner Mischungen (Beton oder Ähnliches) überprüft werden. Die Messung wird jedoch bisher meistens manuell durchgeführt und kann daher nicht für eine industrielle Nutzung für schnelle und standardisierte Serienprüfungen angewendet werden (Hertlin und Herkel [2003]).

Die Messungen an den hier untersuchten Probekörpern sollen eine Aussage über die Änderung der elastischen Moden vor und nach den Experimenten geben. Es soll so ein prozentualer Abfall der elastischen Moden gemessen und anhand dessen ein Schädigungsgrad abgeschätzt werden. Die Modalanalyse liefert nur globale Ergebnisse, also nur Ergebnisse für den gesamten Prüfkörper, die nicht wie bei der Ultraschall-Tomographie zu einer graphischen Darstellung der E-Modul-Verteilung beitragen können. Bei einer Messung werden die Schwingungsmoden des gesamten Objektes betrachtet. Je größer dabei die Schädigung ist, umso eher kann diese mit der Schwingungsanalyse erfasst werden (Große [2011]). Die Modalanalyse kann letztlich eine Aussage machen, ob ein Prüfobjekt geschädigt ist oder nicht. Dazu ist es wichtig, die Frequenzen des ungeschädigten Prüfobjektes zu kennen. Wird das Prüfobjekt über einen bestimmten Zeitraum immer wieder gemessen, so kann der Schädigungsgrad über die Zeit hinweg dargestellt werden.

Die Modalanalyse ist nicht nur zur Erfassung der Schwingungsfrequenzen nützlich, sondern wird auch zur Erstellung eines Modalmodells herangezogen. Dabei beschreiben Frequenz, Dämpfung und Modenform das Strukturverhalten. Bei der Berechnung des Modalmodells wird auf die Erfahrung zurückgegriffen, dass sich eine erzwungene dynamische Verformung als Summe ihrer Modenformen darstellen lässt. Bei Anregung der Objektstruktur schwingen alle Elemente dieser Struktur mit gleicher Frequenz und spiegeln somit eine Mode wieder. Generell wird zwischen den drei Grundschwingungsmoden der Longitudinal-, Torsional- und Flexurschwingung unterschieden. Die Resonanzfrequenz ist dabei abhängig von der Geometrie, der Masse und den elastischen Eigenschaften. Die Geometrie sollte möglichst einfach sein. Prismen oder Zylinder zeigen dabei eine besonders gut geeignete Geometrie. Auch die Verwendung eines homogenen Probekörpers ist von Vorteil, da dann zwei elastische Parameter, Elastizitätsmodul  $E$  und Schermodul  $G$  (oder Poissonzahl  $\sigma$ ) für eine Berechnung ausreichen (Jones und Façaoaru [1984]).

Für die numerischen Berechnungen der Impaktprozesse ist das elastische Modul einer der Parameter, die als bekannt vorausgesetzt werden. Um die Berechnungen möglichst kompatibel mit den Impaktexperimenten machen zu können, sollen mit Hilfe der

Schwingungsanalyse die elastischen Parameter bestimmt werden. Allerdings handelt es sich sowohl bei der Modalanalyse als auch bei der Schwingungsanalyse, wie bereits erwähnt, um globale Messungen. Somit können auch die elastischen Parameter nur für das gesamte Objekt bestimmt werden (Hertlin und Herkel [2003]). Dies ist begründet durch die Tatsache, dass die elastischen Moden aus den Schwingungsfrequenzen des angeregten Objektes berechnet werden (Ohtsu [2011]). Durch den Impaktkrater entsteht ein lokaler Einfluss auf die elastischen Parameter.

### a. Messprinzip

Jedes Objekt, das etwa durch einen Hammer oder durch eine einfache Berührung, also durch äußere Einflüsse angestoßen wird, gerät somit in Schwingungen. Die Charakteristik dieser Schwingungen, also bei welcher Frequenz die Schwingungsmoden auftreten, ist abhängig von den Materialparametern und wird zusätzlich durch Schädigungen, Heterogenität und Anisotropie im Material beeinflusst (Birch [1960], O'Connell und Budiansky [1974], Jones und Façoaru [1984], Weiler und Große [1995], Ai [2006], Ohtsu [2011]). Die bevorzugte Frequenz, bei der ein Körper schwingt, wird als Resonanzfrequenz bezeichnet (Hertlin und Herkel [2003]). Die dabei auftretenden Effekte, wie Beugung, Brechung, Reflektion und Dämpfung, werden hier nicht weiter berücksichtigt.

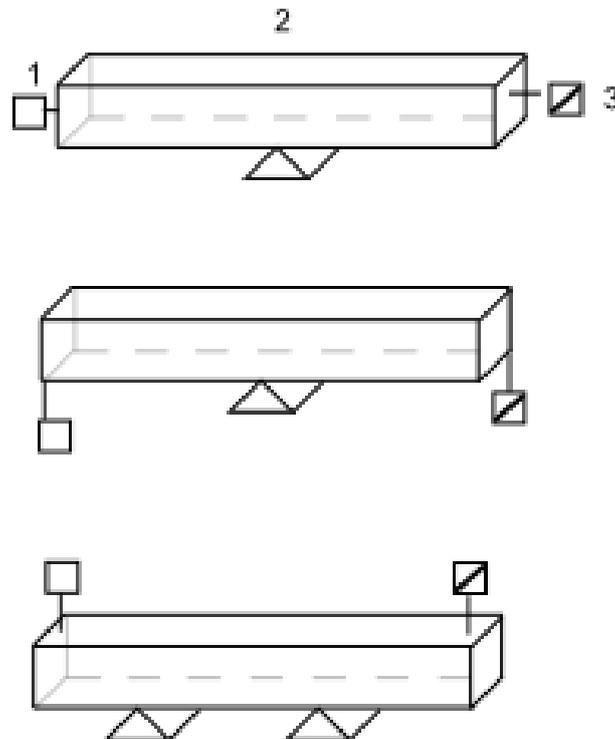


Abbildung 3-28: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Anregung der Longitudinalschwingung (oben), der Torsionalschwingung (Mitte) und der Flexurschwingung (unten).

1 bezeichnet den Erregerimpuls, 2 den Probekörper und 3 den Beschleunigungssensor (modifiziert nach Jones und Façaoaru [1984]).

Der allgemeine Messaufbau ist relativ einfach. Je nach Schwingungsmode, die gemessen werden soll, muss der Aufbau jedoch angepasst werden. In Abbildung 3-28 wird der schematische Aufbau für die drei Grundschwingungen dargestellt. Bei der Longitudinalschwingung müssen Bewegungssensor und Erregerquelle (meist ein Hammer) gegenüber platziert werden. Die Welle kann sich dann in Richtung der Anregung ausbreiten und vom Sensor aufgezeichnet werden (siehe auch Abbildung 3-1, S. 25). Für die Torsionalschwingung werden der Sensor und die Quelle (Hammer) auf der gleichen Oberfläche, jedoch in den schräg gegenüberliegenden Ecken, positioniert. Wird der Probekörper nur an einer Ecke angeregt, entsteht eine Drehung des Körpers, die in der gegenüberliegenden Ecke ihr Maximum erreicht. Diese Schwingungsmode beruht auf dem Schermodul. Die Flexuralschwingung entspricht einer Biegung, sodass der Sensor und die Quelle wieder auf der gleichen Oberfläche angebracht werden. Beide werden mittig auf der Seitenkante positioniert. In Abbildung 3-28 werden zusätzlich die Knotenpunkte für etwaige Lagerungspyramiden gezeigt. Die entsprechenden Knotenpunkte können über:

$$\Lambda = 2l \quad (3.17)$$

berechnet werden. Dabei ist  $\Lambda$  die Wellenlänge und  $l$  die Länge des Probekörpers. Diese Berechnung gilt jedoch nur für harmonische Schwingungen. Anhand von Abbildung 3-29 werden die ersten beiden harmonischen Schwingungen und die dazugehörigen Knotenpunkte gezeigt. Der Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz und der Geometrie des (homogenen) Probekörpers wird mit der Kontinuumsmechanik vollständig gelöst (Bergmann und Schaefer [1974]).

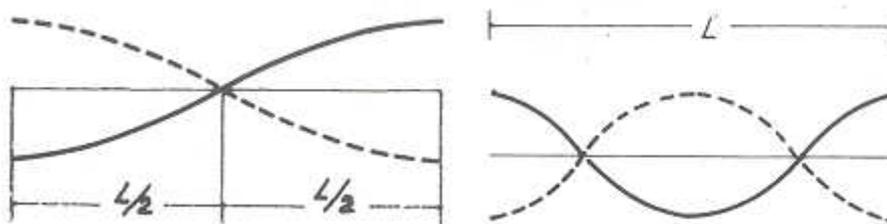


Abbildung 3-29: Zwei Formen einer stehenden Welle zur Erklärung von Knotenpunkten bei der Schwingungsanalyse. Je nach Schwingungsmode gibt es eine andere Anzahl an Schwingungsknoten, an denen keine Auslenkung stattfindet. Die Knoten verteilen sich symmetrisch auf die gesamte Strecke. Die Länge ist hier mit  $L$  benannt (Jones und Façaoaru [1984]).

Die Masse des verwendeten Sensors sollte  $\leq 3\%$  der Probekörpermasse sein, damit die Messung wenig beeinflusst wird. Der hier verwendete Sensor besitzt eine Masse von  $8,13 \pm 0,01$  g. Die Probekörper wiegen zwischen 13.000 g und 22.000 g. Die Masse des Sensors beträgt damit unter 1 % des Probekörpers. Die Befestigungshilfe sollte ebenfalls keine große Masse haben, aber dennoch reproduzierbar sein. Hierzu eignet sich Wachs sehr gut. Der Probekörper sollte so gelagert werden, dass er in seiner Schwingung nicht beeinträchtigt wird. Eine gute Möglichkeit ist die Lagerung auf Schaumstoff. Aber auch die Aufhängung in den Knotenpunkten der Grundschwingungsformen stellt eine Möglichkeit dar (Jones und Façaoaru [1984], Erfurt [2002]). Für eine optimale Berechnung sollte der Probekörper frei schwingen können, damit er frei von Kopplungseffekten und unabhängig von der Umgebung betrachtet werden kann (Jones und Façaoaru [1984], Weiler und Große [1995]). Mit dem Erhalt der Frequenzspitzen für Longitudinal-, Torsional- und Flexuralmoden können auch die elastischen Parameter berechnet werden (Ohtsu [2011]). Dies geschieht über die folgenden Formeln nach Jones und Façaoaru [1984] und Weiler und Große [1995]:

Torsionalschwingung:

$$G_{tors} = \frac{f_{tors}^2}{k^2} * \frac{ml}{A} * 4 * R \quad (3.18)$$

mit

$$R = 1$$

für Objekte mit rundem Profil und

$$R = \frac{\frac{b+h}{h+b}}{4\frac{b}{h} - 2,52\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21\left(\frac{b}{h}\right)^6}$$

für Objekte mit rechteckigem Profil.

Longitudinalschwingung:

$$E_{long} = \frac{f_{long}^2}{k^2} * \frac{ml}{A} * 4 * C \quad (3.19)$$

mit

$$C = 1 + \frac{k^2 \pi^2 \sigma^2 M}{Al^2}$$

und

$$M = \frac{\pi r^4}{4}$$

für Objekte mit rundem Profil, bzw.

$$M = \frac{bh^3}{12}$$

für Objekte mit rechteckigem Profil.

Flexuralschwingung:

$$E_{flex} = \frac{f_{flex}^2}{(2k+1)} * \frac{ml}{M} * \frac{64}{\pi^2} * T \quad (3.20)$$

mit

$$T = \frac{1}{2} + \frac{(2n+1)^2}{8} \pi^2 \frac{M}{Al^2} \left[ 1 + \frac{2(1+\sigma)}{k} \right]$$

$$+ \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{(2n+1)^2}{8} \pi^2 \frac{M}{Al^2} \left[ 1 + \frac{2(1+\sigma)}{k} \right] + \frac{(2n+1)^4}{64} \pi^4 \frac{I^2}{A^2 l^4} \left[ 1 - \frac{2(1+\sigma)}{k} \right]^2}$$

mit

$$q = r/2l$$

für Objekte mit rundem Profil und

$$q = h/l\sqrt{12}$$

für Objekte mit eckigem Profil.

$G$  und  $E$  bezeichnen wie in Kapitel 3.1 das Scher- bzw. Elastizitätsmodul mit der Einheit  $\text{N/mm}^2$ .  $k$  beschreibt die dimensionslose Ordnungszahl,  $A$  [ $\text{mm}^2$ ] ist der Querschnitt,  $m$  [kg] die Masse,  $l$  [mm] die Länge,  $h$  [mm] die Höhe und  $b$  [mm] die Breite des Probekörpers.  $M$  [ $\text{kg}\cdot\text{mm}^2$ ] ist das Flächenträgheitsmoment.  $R$ ,  $C$  und  $T$  sind Korrekturfaktoren für die Geometrie des Probekörpers und  $f_{tors}$  [Hz],  $f_{long}$  [Hz] und  $f_{flex}$  [Hz] sind die gemessenen Frequenzen der Torsional-, Longitudinal- und Flexuralschwingung.

Über die elastischen Konstanten können dann wiederum die Wellengeschwindigkeiten des Materials bestimmt werden (siehe Formel (3.8) und (3.9)) (Weiler und Große [1995]). Die Zusammenhänge aller elastischen Konstanten sind in Kapitel 3.1, auch mit weiterführender Literatur, dargestellt.

### b. Messsystem, Sensorik und verwendete Auswertungsprogramme

Für die Modalanalyse werden neben dem Prüfobjekt, ein Impulsgeber, ein Sensor und ein Messsystem benötigt. Das Prüfobjekt kann mit und ohne Schädigung geprüft werden und wird in dieser Arbeit durch die Naturgesteine mit und ohne Impaktkrater gestellt. Bei dem Impulsgeber, dem Sensor und dem Messsystem gibt es verschiedene Anbieter auf dem Markt. Für die hier vorliegende Arbeit wurde ein Hammer als Impulsgeber sowie Sensoren (uniaxial und triaxial) der Firma *Bruel & Kjaer* und *Kistler* verwendet (Abbildung 3-30). Die Sensoren sind Beschleunigungssensoren, die entweder nur in eine Richtung (uniaxial) oder in alle drei Raumrichtungen (triaxial) sensitiv sind. Dabei wird die mechanische Beschleunigung in ein elektrisches Signal umgewandelt und eine *Fast Fourier Transformation* (FFT) in Form eines Amplitudenspektrums berechnet (Moser et al. [2013]). Das Messsystem stammt von der Firma *LMS* und wird für die Auswertung der Frequenzspektren verwendet (Kapitel 4.4). In Abbildung 3-31 wird die Messkette der Modalanalyse gezeigt. Sensor und Hammer können jeweils über die *LMS* Versorgungseinheit mit dem Rechner verbunden werden, sodass auch die Kraft (beziehungsweise die Stoßfunktion) des Hammers mit aufgezeichnet wird. Dies dient einer genaueren Auswertung, da dann die Amplituden des Beschleunigungssensors mit der gemessenen Kraft des Hammers verrechnet werden kann. Das bedeutet, dass mit Hilfe der Stoßantwort die Übertragungsfunktion ermittelt werden kann und somit sind alle Messungen für einen Durchgang komplett miteinander vergleichbar.

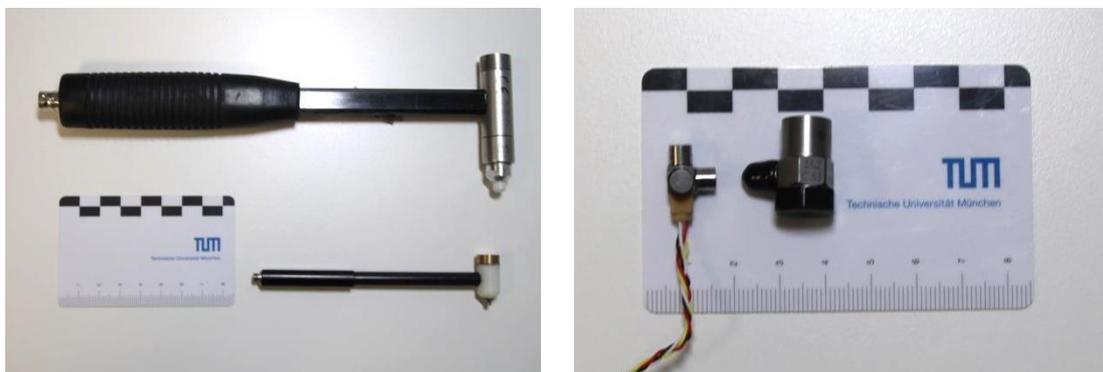


Abbildung 3-30: Zwei Impulshämmer (links) und zwei Beschleunigungssensoren (rechts). Die Hammergröße ist abhängig von der zu messenden Frequenz. Der linke Sensor arbeitet triaxial und der rechte Sensor uniaxial.

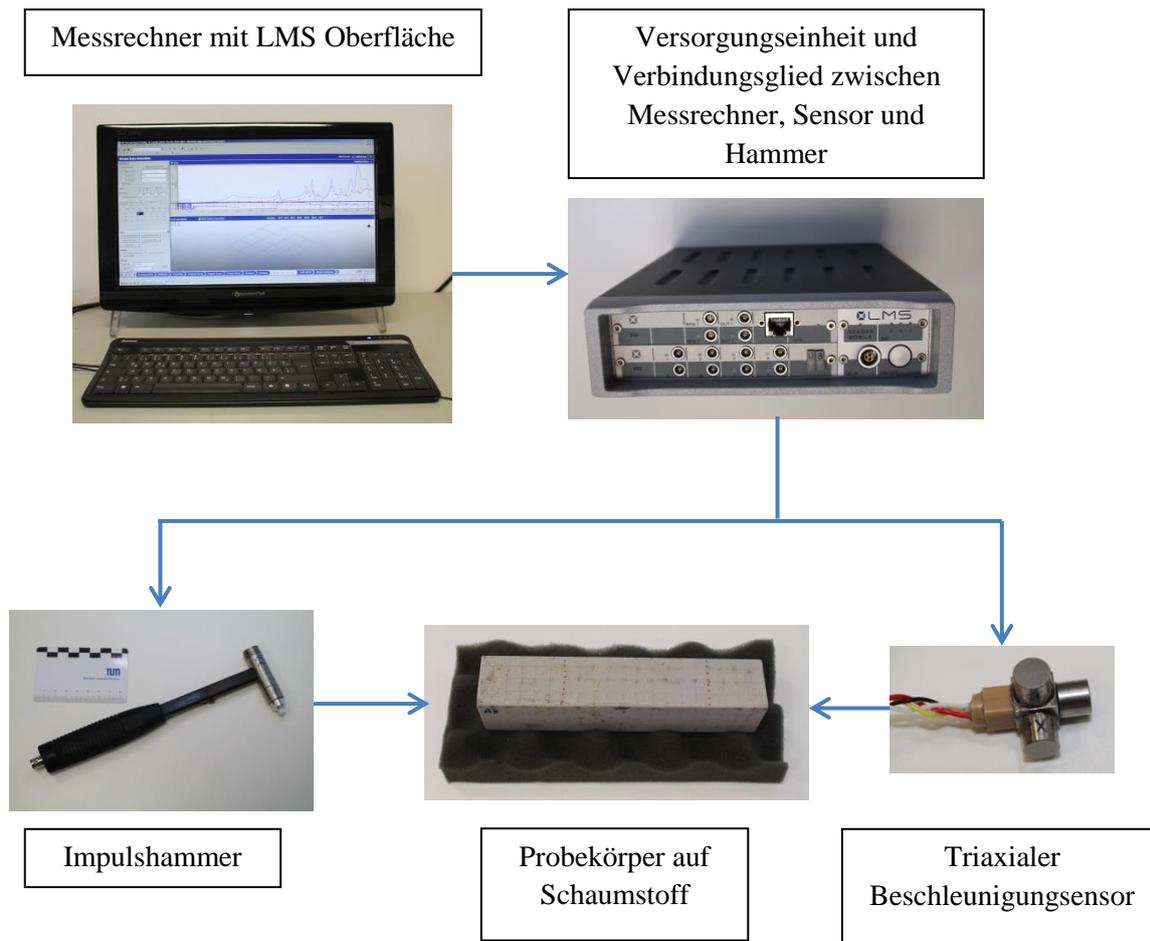


Abbildung 3-31: Messkette der Modal- bzw. Schwingungsanalyse.

Für die später gezeigten Ergebnisse wurde ausschließlich der kleinere Hammer aus Abbildung 3-30 verwendet. Der Hammer stammt von der Firma *Bruel & Kjaer* und wird als *Type 8204* angeboten. Gegenüber der Hammerspitze ist ein Zusatzgewicht (*DB-3988*) angebracht. Die effektive seismische Masse beträgt 40 g. Ein Sensor an der Hammerspitze erlaubt es, die aufgewendete Kraft beim Betätigen des Hammers aufzuzeichnen. Der verwendete Sensor ist ein uniaxialer und wird in Abbildung 3-30 (rechts) neben dem kleineren Triaxial-Sensor gezeigt. Er trägt die Bezeichnung *PCB 352C33*. Laut Herstellerangaben besitzt er eine Bandbreite von 0,5 Hz bis 10 kHz ( $\pm 5\%$ ) und besitzt eine Masse von  $8,13 \pm 0,01$  g. Da alle hier gemessenen Frequenzen der Grundswingungen unterhalb der 10 kHz Grenze liegen, ist der Sensor für die Messungen geeignet (siehe Kapitel 4.4). Als Koppelmittel, damit der Sensor unbeweglich auf dem Probekörper bleibt, wurde eine sehr kleine Menge Wachs verwendet. Die durch das Wachs zusätzliche Masse ist relativ gering und wird daher das Messergebnis nur geringfügig beeinflussen. Die Versorgungseinheit (*Model 480B21*) von *PCB Piezotronics* versorgt Hammer und Sensor mit Strom und kann für die Sensorkanäle eine Verstärkung zwischen 1,1 dB und 100 dB durchführen.

Mit dem *LMS* Messsystem ist es möglich, eine komplette Modalanalyse durchzuführen. Das bedeutet, dass in dem Programm die Probekörper und das Messraster definierbar sind und dann die Messungen nacheinander durchgeführt werden können. Zuvor werden die Position des Hammers und die Orientierung des Sensors festgelegt, anschließend wird auf die Grundschwingungsmoden und vorhandene Oberschwingungen geschlossen, die auch mittels ihrer Schwingungsbilder dargestellt werden können.

Mit den gemessenen Frequenzen können die elastischen Parameter berechnet werden. Dies geschieht über ein vorhandenes Excel Programm, das mit den oben benannten Formel (3.18) bis (3.20) aus Weiler und Große [1995] entnommen werden kann.

Zusätzlich wurden die Probekörper einer numerischen Modalanalyse unterzogen. Dazu wurde das Programm *Ansys* verwendet. In diesem Programm können alle bekannten Parameter des Probekörpers eingepflegt und dann die Schwingungen für die gewählte Geometrie berechnet werden.

### c. Versuchsaufbau

Der Messaufbau bei der Modalanalyse ist geprägt durch ideale Versuchsbedingungen und den Möglichkeiten, die einem für eine solche Messung gegeben sind. Der ideale Aufbau sieht vor, dass das Prüfobjekt frei schwebend angetroffen wird. Dabei sollen jegliche Reibungen abgewendet und die Schwingungen durch Dämpfung oder Ähnliches unbeeinflusst bleiben (Jones und Façaoaru [1984], Weiler und Große [1995]). Zu den zu vermeidenden Einflüssen gehören auch Wind sowie Schwingungen, die zum Beispiel durch Schritte ausgelöst werden können. Der anregende Impuls wird von einem äußeren Einfluss, etwa einem Hammer oder einer dauerhaft wiederkehrenden Schwingung erzeugt. Diese Erregerfrequenz muss auf das Prüfobjekt angepasst sein. Somit kann nicht jede Erregerfrequenz für ein Prüfobjekt angewendet werden.

Für den hier verwendeten Messaufbau wurde ein weicher Schaumstoff als Unterlage gewählt. Bei verschiedenen Messungen (am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung) wurden unterschiedlichste Unterlagen und Aufhängungen ausprobiert (Chillé [2012], Deschauer [2013]). Es hat sich herausgestellt, dass die Schaumstoffunterlage im Vergleich zur Lagerung auf Pyramiden oder zur Aufhängung an dünnen Nylonschnüren keine signifikant anderen Ergebnisse ergeben hat. Letztlich fiel die Entscheidung auf die Schaumstoffunterlage, da es die am einfachsten zu praktizierende Vorgehensweise darstellt (Abbildung 3-32). Bei einer Lagerung auf Pyramiden sowie bei einer Aufhängung an Schnüren muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass die Schwingungsknoten für die Lagerung getroffen werden (Abbildung 3-29, S. 63). Die Schwingungsknoten sind Punkte in dem Prüfobjekt, an

denen die Schwingungsamplitude Null ist. Die Knotenpunkte hängen von der Geometrie und der erzeugten Schwingung ab. Dies muss auf einer flächendeckenden Auflage nicht beachtet werden. Ein weiterer Grund für eine Lagerung und gegen die Aufhängung ist das Gewicht der Probekörper. Die MEMIN-Probekörper haben ein Gewicht von mindestens 13000 g, sodass eine Aufhängung über dünne Nylonschnüre nicht möglich wäre.



**Abbildung 3-32: Sandsteinprisma, gelagert auf Schaumstoff. Die Anordnung von Hammer und Sensor ist geeignet um eine flexurale Schwingung anzuregen und aufzunehmen.**

Als Impulsgeber wurde ein Hammer verwendet, der speziell die tieferen Frequenzen erreicht und somit auch bei kleinen Probekörpern Ergebnisse ermöglicht. Zur Registrierung der Schwingungen wurde ein eindimensionaler Sensor verwendet, der auch als Wegaufnehmer bezeichnet wird. Wird der Sensor, der an dem Prüfobjekt befestigt ist, in Schwingung versetzt, wird diese Schwingung in ein elektrisches Signal umgewandelt und an das Messsystem weitergeleitet. Der Sensor wurde bei diesen Messungen mit einer Wachsmasse befestigt, sodass er leicht angebracht und wieder versetzt werden konnte. Ähnlich wie bei der Lagerung der Probekörper gilt es auch beim Sensor auf die Knotenpunkte zu achten. Der Sensor sollte hierbei nicht auf einem Knotenpunkt angebracht werden, da er dort keine Auslenkung feststellen kann. In Abbildung 3-33 werden die Knotenpunkte der Grundschwingung und einige Oberschwingungen für einen Würfel gezeigt.

Für die Messung wurde der Aufbau für eine einfache Schwingungsanalyse gewählt. Erste Versuche einer Modalanalyse mit 5 cm Raster (150 Messpunkte) zeigten sehr schlecht zu interpretierende Ergebnisse, sodass eine gezielte Anregung der Schwingungsmoden als sinnvoll erachtet wurde. Dafür wurden die Sensoren entsprechend der Abbildung 3-28 (S. 62) platziert und mit dem Hammer angeregt.

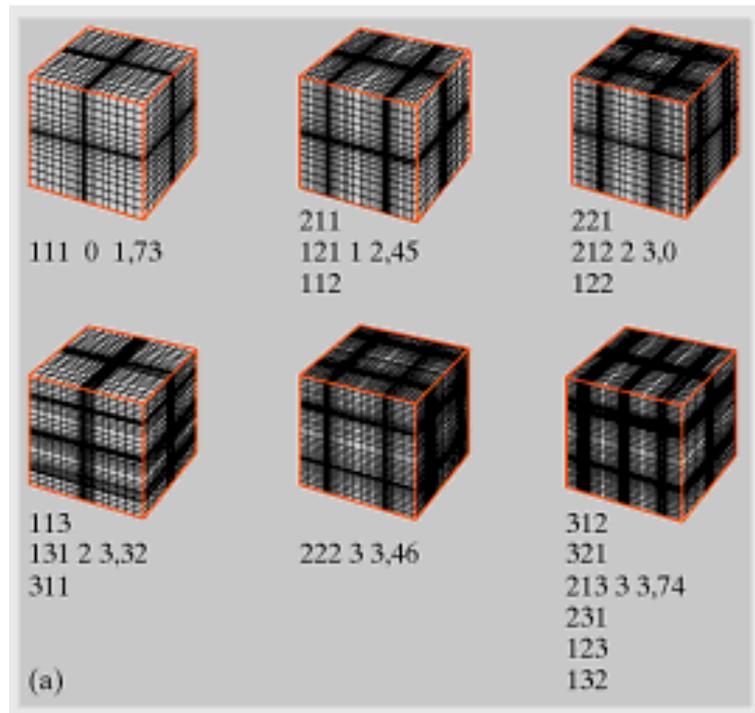
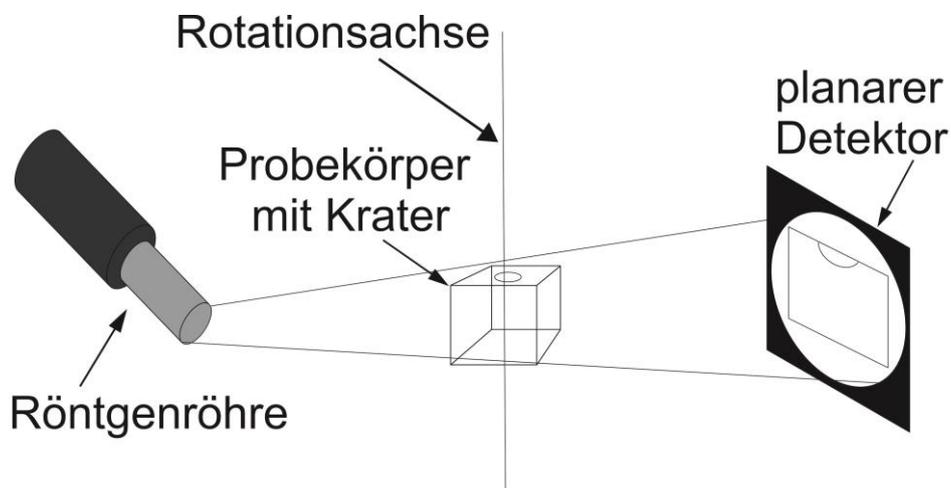


Abbildung 3-33: Eigenschwingungen eines Würfelraumes. Die Schwingungsbücher sind hell, die Knoten dunkel dargestellt. Die Zahlen geben die Anzahl der Bücher in den drei Raumrichtungen, die Gesamtzahl der Knoten und die Eigenfrequenzen als Vielfache der Grundfrequenzen an (Vogel [1995]).

### 3.2.4 Computer-Tomographie

Genauso wie die Ultraschall-Tomographie (UST) dient die Computer-Tomographie (CT) der dreidimensionalen Betrachtung eines Probekörpers. Da der grundlegende Gedanke einer Tomographie bereits in Kapitel 3.2.2 erläutert wurde, werden hier nur die technischen Aspekte der CT näher betrachtet. Die verschiedenen CT-Anlagen unterscheiden sich letztlich in zwei wesentlichen Dingen, und zwar in der Auflösung sowie in der verwendeten Quelle. Für die Auflösung der Messung sind verschiedene Aspekte zu beachten. Nach Stoessel et al. [2011] kann man drei Hauptkategorien unterscheiden, die CT-Durchführung, die CT-Rekonstruktion und die CT-Auswertung. Die Durchführung hat die meisten Parameter. Hierbei spielt es eine Rolle, welche Methode überhaupt angewendet wird: die verwendete Röntgenquelle, Filtereinstellungen, Vergrößerung (Voxel-Größe), Anzahl der Projektionen, Position des Probekörpers und die Detektorparameter. Bei der Rekonstruktion können verschiedene Einstellungen, Darstellungsvarianten, Graustufenbereiche, Datenformate (16 oder 32 bit) und Einstellungen zur Rauschverminderung eingestellt werden. Bei der Auswertung müssen das zu betrachtende Volumen, die Referenzmessung der Graustufen, die Auswertungsmethode sowie die Softwareparameter beachtet werden.

Das Messprinzip sieht vor, dass mit der Messung als Ergebnis ein detailliertes dreidimensionales Bild des Probekörpers entsteht, das in mehreren Ebenen betrachtet werden kann. Dafür werden mehrere zweidimensionale Messungen durchgeführt. Der Probekörper dreht sich abschnittsweise auf einer Rotationsachse um  $360^\circ$ . In Abbildung 3-34 wird das Prinzip der Computer-Tomographie (CT) gezeigt. Während sich der Probekörper um sich selber dreht, wird die Strahlungsquelle auf den Probekörper gerichtet. Die Strahlung durchdringt den Probekörper und trifft letztlich auf den planaren Detektor, der hinter dem Probekörper aufgebaut ist. Auf dem Detektor entsteht ein zweidimensionales Bild. Ist die Messung beendet, werden alle zweidimensionalen Bilder für die dreidimensionale Berechnung verwendet (Michael [2001], Moser et al. [2013]).



**Abbildung 3-34:** Schematischer Aufbau einer Computer-Tomographie-Anlage mit Röntgenquelle. Die Röntgenröhre sendet die Strahlen in Richtung des planaren Detektors. Dazwischen liegt der Probekörper, der sich auf einer Rotationsachse um  $360^\circ$  drehen kann. Auf dem Detektor werden die durch den Probekörper veränderten Strahlen aufgenommen (modifiziert nach Moser et al. [2013]).

Die Auflösung der Messung ist abhängig von der Pixelanzahl des Detektors in Kombination mit dem Probekörper. Je kleiner der Probekörper und je höher die Pixelanzahl des Detektors, umso besser wird die Auflösung. Bei einer besseren Auflösung können auch kleinere Risse dargestellt werden. Mathematisch betrachtet ist eine CT-Messung auf einem Detektor proportional zu der Summe des Schwächungskoeffizienten entlang des Strahlenweges. Der CT-Scanner produziert ein digitales Bild, das aus einer quadratischen Matrix von Bildelementen (Pixeln) besteht. Jedes dieser Bildelemente repräsentiert ein Voxel in einer Schnittebene (Abbildung 3-35).

Die Information, die in einem Voxel steckt, spiegelt die Intensität der Strahlung wieder, die auf dem Detektor gemessen wird:

$$I = I_0 e^{-d \sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad 3.21$$

dabei ist  $I$  die gemessene Intensität und  $I_0$  die ausgesendete Anfangsintensität.  $d$  ist die Dicke des Probekörpers und  $\mu$  die Dämpfung (Michael [2001]).

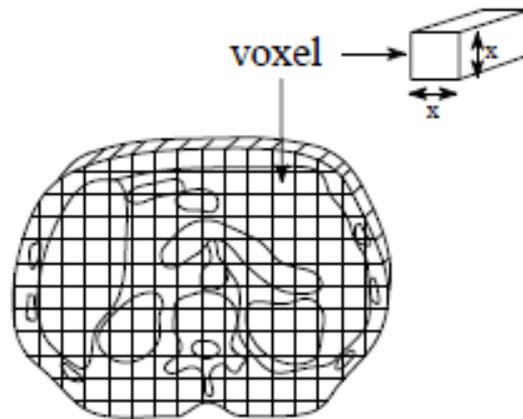


Abbildung 3-35: Erklärung zur Bildauflösung in der Computer-Tomographie. Jedes Pixel in einem zweidimensionalen Bild wird als dreidimensionales Voxel interpretiert (Michael [2001]).

Da an dem Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung keine Computer-Tomographie-Anlage vorhanden ist, wurden die Probekörper in Kooperation mit anderen Lehrstühlen und Industrieunternehmen durchgeführt.

#### a. Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)

Das Wehrwissenschaftliche Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) in Erding ist eine Einrichtung, die zum Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und damit zur Bundeswehr gehört. In Zusammenarbeit mit Herrn Dr.-Ing. Dinnebier konnten Messungen an einem auf Radiographie basierenden Computer-Tomographie (CT) -Messsystem durchgeführt werden. Es handelt sich um eine  $\mu$ -CT-Messanlage. Die Messungen wurden an Probekörpern mit 20 cm Kantenlänge durchgeführt. Die Auflösung des Detektors liegt bei 2000 Pixeln x 2000 Pixeln. Für einen Probekörper mit 20 cm Kantenlänge entsteht so eine Auflösung von 140  $\mu$ m (pro Voxel). Als Quelle wird hier Röntgenstrahlung verwendet (Dinnebier [2012]). Röntgenstrahlen wechselwirken hauptsächlich mit der Elektronenhülle von Atomen (Abbildung 3-36, oben) und sind abhängig von deren Kernladungszahl. Mit zunehmender

Kernladungszahl wird die Durchdringung der Strahlen schwieriger (Schillinger und Bücherl [2004]). Die Dämpfung der Strahlung kann somit mit der Dichte des Materials in Zusammenhang gebracht werden (Roth [2009]). Bei der Radiographie wird die Röntgenstrahlung als Punktquelle realisiert. Zur Detektion des Probekörpers werden die Strahlen als Fächer oder als Kegel auf den Probekörper gerichtet, weshalb eine volle Betrachtung des 360°-Winkels benötigt wird (Michael [2001], Schillinger und Bücherl [2004]).

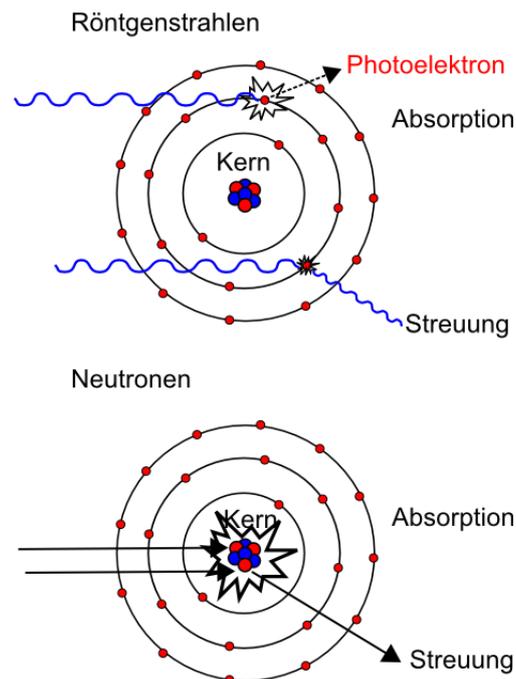


Abbildung 3-36: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen von Röntgenstrahlen (oben) und Neutronen (unten) (verändert nach Manke et al. [2008]).

## b. General Electric (GE)

Eine ähnliche Messung konnte bei General Electric (GE) (Phoenix|x-ray) durchgeführt werden. Bei der Messanlage handelt es sich um einen phoenix v|tome|x s, die für hochauflösende Messungen in der 2D-Röntgenprüfung und 3D-Computertomographie (Mikro- und Nano-CT) sowie für die 3D-Metrologie verwendet werden kann. Ansonsten sind das Prinzip und die Quelle ähnlich der Anlage des WIWeB. Der Probekörper wurde zu diesem Zweck zu einem 10 cm großen Block zurechtgeschnitten und für einen Detailblick schräg auf den Rotationsuntergrund gestellt (Abbildung 3-37). Durch die Verkleinerung des Probekörpers kann die Auflösung auf knapp 60  $\mu\text{m}$  verbessert werden.



Abbildung 3-37: Blick in die Messkammer der Computer-Tomographie von GE.

### c. European Aeronautic Defence and Space Company (EADS)

Die Messungen bei der European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) beruhen ebenfalls auf radiographischen Messungen. Hier wurde der Probekörper in Originalgröße mit 20 cm Kantenlänge angesehen. Ähnlich wie beim WIWeB liegt die Auflösung hier bei etwa 140  $\mu\text{m}$ . Die Messungen wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Stößel durchgeführt. Das verwendete Gerät (RayScan 150) wurde von EADS u.a. für die Analyse der Porosität bei Kunststoffen verwendet. Der Energiebereich der Röntgenröhre liegt zwischen 10 kV und 225 kV. Der Detektor hat eine Auflösung von 1024 Pixeln x 1024 Pixeln mit einer Größe von 200  $\mu\text{m}$  (pro Voxel). Der Brennpunkt kann auf 2  $\mu\text{m}$  bis 250  $\mu\text{m}$  eingestellt werden. Es gibt zwei Translationsachsen und eine Rotationsachse. Die Auflösung einer zweidimensionalen Ebene für eine Messung liegt je nach Probekörpergröße bei 2  $\mu\text{m}$  bis 150  $\mu\text{m}$  (Stoessel et al. [2011]).

### d. Neutronen Computer-Tomographie und Radiographie mit schnellen Neutronen (NECTAR)

Am Institut Radiochemie der Technischen Universität München ist das NECTAR-System (Neutronen Computer-Tomographie und Radiographie mit schnellen Neutronen) vorhanden. Ähnlich wie bei Röntgenaufnahmen wird das zu untersuchende Objekt hier mit Spaltneutronen durchleuchtet (Bücherl et al. [2009]). Die Messung mit

Neutronen weicht ein wenig von der Messung mit Röntgenstrahlung ab. Nach Schillinger und Bücherl [2004] sind Neutronen elektrisch neutrale Teilchen und wechselwirken nur sehr schwach mit Materie und zwar nur mit den Atomkernen. Neutronen verhalten sich quasi invers zu Röntgen- oder Gammastrahlung (Abbildung 3-36, S. 73). Dieses unterschiedliche Verhalten wird durch den Massenschwächungskoeffizienten ( $\mu/\rho$ ) beschrieben. Dieser Koeffizient geht in die Berechnung der Intensität ( $I$ ) ein (Modifikation der Formel (3.21):

$$I = I_0 * \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} * \rho * d\right). \quad (3.22)$$

Für dichte Materialien (z. B. Eisen, Wismut und Blei) stellt die Messung mit Neutronen eine gute Ergänzung zur Radiographie und Tomographie dar, anders verhält es sich für wasserstoffhaltige Materialien, in denen die Neutronenstrahlung stark gedämpft bzw. gestreut wird (Schillinger und Bücherl [2004]). Deshalb wird die Neutronenstrahlung oft zur Auffindung von Wassereinlagerungen verwendet.

Als Quelle werden, wie bereits erwähnt, Spaltneutronen verwendet, die nicht als Punktquelle, sondern durch eine Blende in ein langes evakuiertes Flugrohr zum Messplatz geführt werden. Dabei ist das Verhältnis des Abstandes Blende - Untersuchungsobjekt zum Blendendurchmesser von Bedeutung (Osterloh et al. [2011]) ( $L/D$ -Wert, für NECTAR: 230). Der Abstand zwischen der Neutronenquelle und dem Prüfkörper beträgt bis zu 15 m (Schillinger und Bücherl [2004]). Aus den gemessenen Radiogrammen wird dann ein Tomogramm berechnet und die Struktur des Objektes dargestellt. Hierbei sollen Risse, Materialübergänge, Einschlüsse etc. sichtbar gemacht werden. Bei einer maximalen Größe von 80 cm x 80 cm x 80 cm und einem Maximalgewicht von ca. 400 kg sind die Probekörper mit 20 cm Kantenlänge und bis zu 21kg, auf ihre Größenordnung bezogen, gut geeignet, um für eine Tomographie verwendet zu werden. Die örtliche Auflösung für eine Tomographie liegt bei ca. 1 mm x 1 mm x 1 mm (Bücherl et al. [2011]). Die Neutronen liegen im Energiebereich von 1,5 bis 2 MeV mit einem Fluss von  $4,9 \text{ mal } 10^6 \text{ Neutronen/cm}^2\text{s}$  (Osterloh et al. [2011]).

## 4. Versuchsergebnisse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Auswertungsmethoden bzw. Auswertungsmöglichkeiten der einzelnen Messmethoden und deren Ergebnisse. Die hier gezeigten Auswertungsansätze, die die Schädigungszone charakterisieren, sind zwar nur eine Auswahl, zeigen jedoch teilweise sehr gute Ergebnisse. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass die Experimente auf Grund der Materialeigenschaften und Schussparater nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Geplant war, die Rissausbreitung während der Versuche zu beobachten. Die Energie eines Impaktes im Vergleich zu der Energie einer Rissentstehung wurde jedoch deutlich unterschätzt (Kapitel 4.1), weshalb keine kleineren Risse gefunden worden sind. Die Ultraschall-Tomographie (UST) hingegen war eine gute Wahl. Trotz relativ schlechter Auflösung kann die Schädigungszone unterhalb des Kraters ausreichend beschrieben werden (Kapitel 4.2). Der Anhang gibt einen Ausblick auf weitere Messmethoden und Anwendungsmöglichkeiten sowie auf verschiedene Auswertungsansätze, die in dieser Arbeit nicht näher berücksichtigt werden.

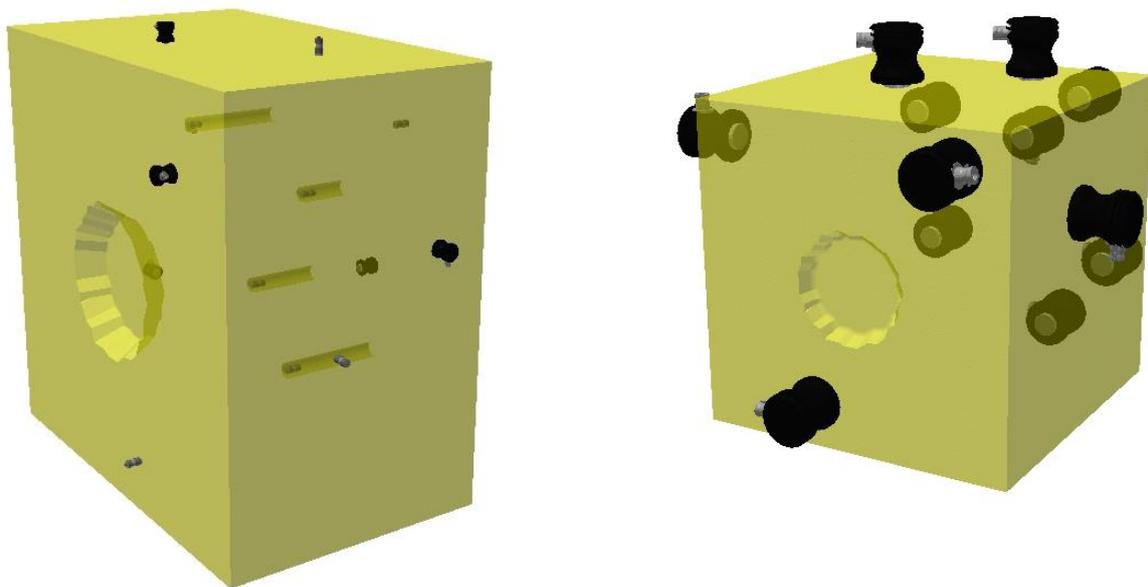
### 4.1 Impaktlokalisierung durch Schallemissionsanalyse

Wie bei der Erdbebenlokalisierung können auch Schallemissionsereignisse lokalisiert werden. Häufig ist es ein Ziel den Bruchverlauf innerhalb eines Probekörpers unter bestimmten Bedingungen zu rekonstruieren. Im Bauwesen werden Materialien unter anderem über ihre Festigkeit charakterisiert, die in einem Dreipunktbiegeversuch ermittelt wird. Dabei wird ein Probekörper auf zwei Auflagepunkte abgelegt und in der Mitte wird von oben Druck auf den Probekörper ausgeübt. Dabei entstehen Risse. Die Entstehung, Ausbreitung und Ortung dieser Risse kann eine Aussage über das Material bzw. die Verarbeitung des Materials geben. Zur Registrierung und Lokalisierung solcher Risse wird die Schallemissionsanalyse (SEA) angewendet.

Bei den Impaktprobekörpern war es das Ziel mittels SEA, einzelne Risse, die durch den Impakt entstehen, zu lokalisieren und die Rissausbreitung zu rekonstruieren. Während der Messung ist jedoch schnell deutlich geworden, dass diese Aufgabe mit sehr großem Aufwand bei der Analyse der Daten verbunden wäre. Die Energie, die durch den Impakt auf den Probekörper wirkt, ist sehr hoch. Die Impaktenergie liegt bei den unterschiedlichen Experimenten zwischen 672,70 J und 82731,80 J (Tabelle 1-2, S. 19). Mit wachsender Energie steigt somit auch die Größe der Amplitude (die Amplitude wird als Maß für die größte auftretende Energie herangezogen), die die ankommende Welle am Sensor hat. Da bei den Experimenten relativ kleine Probekörper verwendet werden (maximale Kantenlänge von 80 cm), ist die Energie,

die am Sensor ankommt, im Verhältnis noch sehr hoch. Da die Probekörper vorwiegend homogen bzw. isotrop sind (Kapitel 1.2.2), kann sich die Welle ohne starke Absorption oder Reflektion (durch Materialschichtung oder größere Einschlüsse) durch den Probekörper ausbreiten. Zudem wird durch den kleinen Probekörper das Wellenfeld, das an den Sensoren aufgezeichnet wird, durch Reflektionen an den Oberflächen überlagert. Das Wellenfeld ist somit neben den hohen Energien auch wesentlich durch Randeffekte beeinflusst.

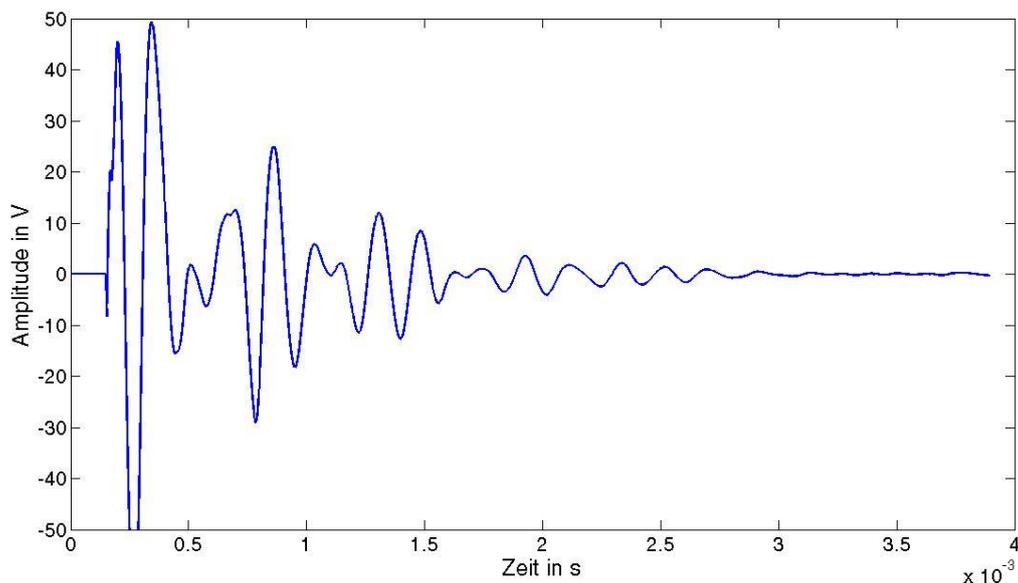
Abbildung 4-1 zeigt zwei CAD modellierte Probekörper (links: Sandstein-Probekörper E1 mit 50 cm x 80 cm x 80 cm Kantenlängen; rechts: Sandstein-Probekörper A3 mit 20 cm Kantenlänge) mit den verwendeten Sensoren an den entsprechenden Koordinaten. Die Relation Sensor zu Probekörper ist dabei maßstabsgetreu. Der Krater wird auf der entsprechenden Oberfläche angedeutet (entspricht nicht der wahren Kratermorphologie) und die Probekörper sind so gedreht, dass alle Sensoren möglichst gut sichtbar sind. Die Koordinaten aller Sensoren für jedes Experiment sind im Anhang II nachzulesen.



**Abbildung 4-1: CAD Modelle von Probekörpern. Links – 50 cm x 80 cm x 80 cm Probekörper (E1) mit Bohrlöchern für Sensoren. Rechts – 20 cm x 20 cm x 20 cm Probekörper (A3) (in Zusammenarbeit mit Malm [2013] und Schwarzkopf [2013]).**

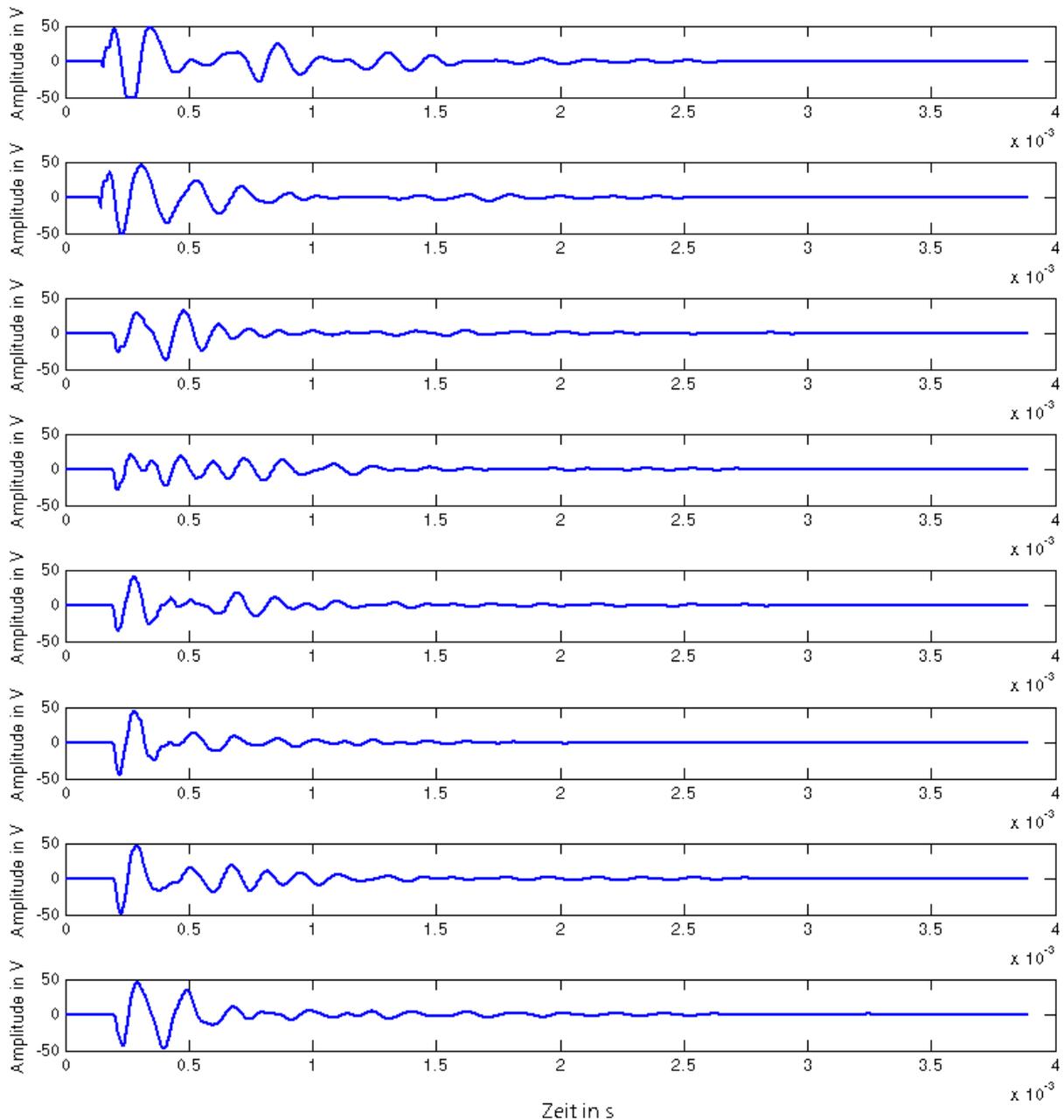
Abbildung 4-2 zeigt ein typisches Signal, wie es bei den Impaktexperimenten aufgezeichnet wurde. Am Anfang ist das Signal sehr klein und ohne Rauschanteile. Das bedeutet, dass das ‚Signal zu Rausch‘ (S/N)-Verhältnis sehr hoch ist und die Daten ohne Weiterverarbeitung gut verwertbar sind. Die Signale sind nicht durch

äußere Störeffekte beeinflusst. Der Impact des Projektils auf die Probekörperoberfläche ist deutlich durch den ersten Anstieg im Signal erkennbar. Innerhalb von etwa drei Millisekunden ist der Ausschlag durch das Signal wieder vorbei. Die Signale wurden in einem Bereich bis zu  $\pm 50$  V aufgezeichnet (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Für das Anfangssignal ist dieser Bereich gerade richtig gewählt, um das gesamte Signal zu erfassen. Ein Teil der Sensoren zeichnet einen kleineren Bereich auf. Mit einem Messbereich von  $\pm 0,1$  V sollten vorwiegend kleinere Ereignisse aufgezeichnet werden, die durch spätere Entlastungen entstehen. Bei diesen Signalen werden die Amplituden abgeschnitten und können für eine energetische Betrachtung nicht hinzugezogen werden. Nachdem das erste große Signal bei den Sensoren angekommen ist, kann in der Signalcoda nach weiteren kleineren Signalen gesucht werden.



**Abbildung 4-2:** Typisches Signal einer Schallemissionsanalyse. Hier wird das Signal eines Impaktexperiments an einem Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge gezeigt. Die Impaktenergie lag bei 838,50 J (A3, Tabelle 1-2). Das Zeitfenster beträgt 0,004 s.

In Abbildung 4-3 wird ein Signal an acht Sensoren gezeigt, wobei das erste Signal identisch mit dem aus Abbildung 4-2 ist. Betrachtet man zuerst die Anfangsausschläge in Abbildung 4-3, fällt auf, dass die Ersteinsätze des Impaktsignals an den einzelnen Sensoren sehr nahe beieinander liegen. Hierbei ist zu beachten, dass der Nullpunkt nicht den Zeitpunkt des Impaktes darstellt. Da es sich um eine kontinuierliche Aufnahme handelt, ist der Zeitpunkt des Impaktes in der Darstellung nicht ablesbar.



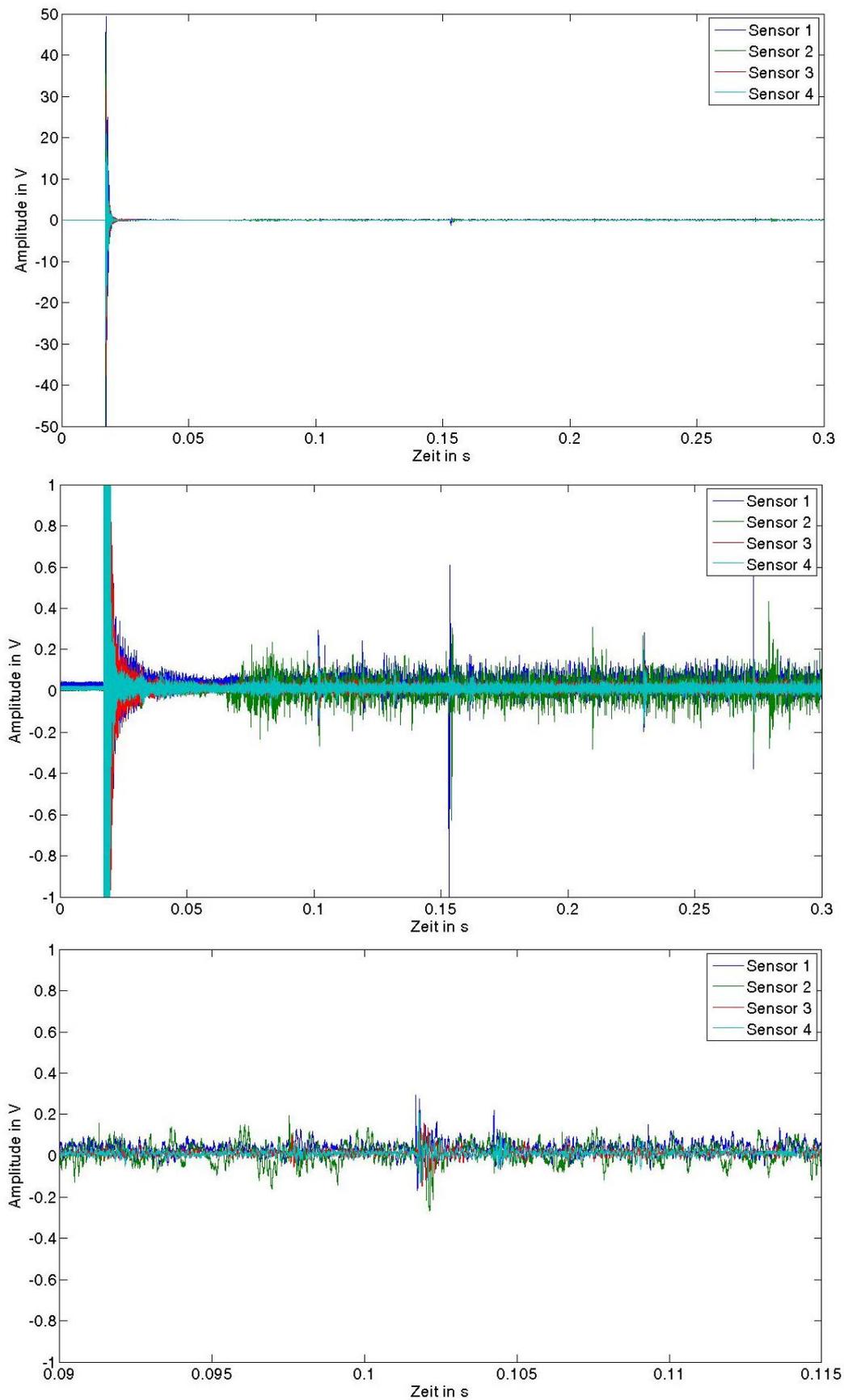
**Abbildung 4-3: Datenausschnitt eines Impaktsignals von acht Sensoren über 4 ms. Die Aufzeichnung wurde im Bereich  $\pm 50$  V aufgezeichnet. Alle acht Signale sind innerhalb der ersten 0,3 ms bei den Sensoren angekommen (modifiziert nach Moser et al. [2013b]).**

Innerhalb von 0,073 ms, bei einer maximalen Entfernung von ca. 22 cm (Impakt-Sensor) und einer Kompressionswellengeschwindigkeit von 3000 m/s, ist das Signal an allen Sensoren angekommen. Bei einem Probekörper mit 20 cm Kantenlänge ist der Sensor mit der kleinsten Entfernung nur etwa 7 cm (Koordinaten siehe Tabelle 0-2 im Anhang S. XIV) vom Impakt entfernt und der Sensor mit der weitesten Entfernung maximal 22 cm. Das bedeutet, die ersten Reflektionen, die an den Probekörperoberflächen entstehen, liegen ebenfalls unterhalb einer Millisekunde,

wenn sie wieder bei den Sensoren ankommen. Somit wird das Wellenfeld innerhalb einiger Millisekunden schon stark durch die Reflektionseffekte beeinflusst (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Innerhalb dieser Zeit können die Sensoren nicht wieder zur Ruhe kommen und sind noch am Nachschwingen. Diese Nachschwingungen sind von der Energie abhängig, die auf die Sensoren wirkt. Nachdem die Schwingungen am Sensor wieder abgeklungen sind, gibt es kaum neue Ereignisse in der Signalcoda. Es muss vermutet werden, dass die kleineren Signale, die durch die entstehenden Risse mit aufgezeichnet werden sollten, durch die hohe Energie des Impaktes überlagert werden.

Eine zweite Auffälligkeit liegt in dem ersten Ausschlag des Signals und ist in Abbildung 4-2 sowie bei den ersten beiden Sensoren in Abbildung 4-3 deutlich erkennbar. Das Signal für alle Sensoren beginnt mit einem negativen Ausschlag. Die besagten Signale zeigen jedoch nicht im ersten Ausschlag des Signals die Maximalamplitude, sondern im zweiten Wellental des Signals. Die Annahme ist, dass die Energie zu Beginn der Wellenausbreitung am stärksten sein muss. Wie gerade schon erwähnt, wird das Wellenfeld jedoch sehr schnell von den Reflektionen beeinflusst. Der Sensor mit 7 cm Abstand zum Impaktpunkt und weiteren 3 cm zum Rand ist dem Impakt am nächsten und wird als erster Sensor, durch Randeffekte beeinflusst. Die erste Reflektion vom Rand aus hat demnach auch nur einen Laufweg von 3 cm zum Sensor. Mit einer Geschwindigkeit von 3000 m/s benötigt die Welle für den Weg vom Sensor zum Rand und wieder zum Sensor zurück etwa 0,02 ms. Somit wird der erste Wellenberg schon vom Rand und den daran reflektierten Wellen beeinflusst und die Schwingung wird überlagert. Damit ist die Amplitude nicht mehr für eine Energieauswertung verwendbar. Ebenfalls könnte es sich um einen Einschwingvorgang der Sensoren handeln, der jedoch nicht an allen Sensoren zu erkennen ist.

In Abbildung 4-4 werden drei Bilder der Signaldynamik gezeigt. Hier soll verdeutlicht werden, dass spätere Rissereignisse nicht einfach zu erkennen sind. In allen drei Darstellungen werden die gleichen vier Sensoren benutzt, die ein Impaktexperiment aufgezeichnet haben. Das oberste Bild zeigt das gesamte Signal innerhalb eines Zeitfensters von 0,31 s. Der Messbereich bei der Aufzeichnung lag bei  $\pm 50$  V (in der Abbildung  $\pm 55$  V). Die Abbildung zeigt sehr deutlich den Impakt bei etwa 0,015 s. Die Schwingung klingt sehr schnell wieder ab (innerhalb von etwa 0,02 s). Innerhalb der restlichen Signalcoda sind vereinzelt kleinere Amplitudenerhöhungen erkennbar. Daher wurde in der mittleren Abbildung der Amplitudenbereich auf  $\pm 1$  V verkleinert. Hier wird nun deutlich, dass das Signal erst bei circa 0,06 s abgeklungen ist und die darauf folgende Coda stark verrauscht ist.



**Abbildung 4-4: Drei Amplitudendarstellungen zur Verdeutlichung der Signaldynamik. Oben: Vier Sensoren im Bereich von -55 V bis 55 V in einem Zeitfenster von 0,31 s. Mitte: Zeigt das gleiche Zeitfenster wie oben, aber der Amplitudenbereich wurde verkleinert (-1 V bis 1 V). Unten: Zusätzlich zum Amplitudenbereich wurde das Zeitfenster auf 0,9 s bis 0,115 s verkleinert.**

Das S/N-Verhältnis hat sich durch den Impakt, im Vergleich zu dem Zeitfenster vor dem Impakt, stark verschlechtert. Dieses Phänomen kann mehrere Ursachen haben. Es kann sich zum Beispiel um viele kleine Ereignisse handeln, die überlagert wurden. Der Schuss besitzt außerdem eine sehr hohe Energie. Zusätzlich breitet sich ein Wellenfeld in dem Probekörper aus, das durch die Reflektionen an den Rändern des Probekörpers zu multiplen Schwingungsformen führt. Ein weiterer Grund kann sein, dass durch das Auslösen des Schusses nun ungehindert Luft in die Kammer strömen kann und eine Schwingung impliziert. Das ungehinderte Eindringen der Luft in die Kammer führt zu einem Geräusch, das von den Sensoren registriert wird. Ein noch anderer Grund können die Sensoren selber sein. Nach den Versuchen wurde festgestellt, dass einige der Sensoren nicht mehr an der Oberfläche fixiert waren. Durch das Herunterfallen und das Auftreffen auf dem Boden sind mit hoher Wahrscheinlichkeit weitere Signale entstanden. Später wurden die Sensoren mit Halterungen fixiert, wodurch die Sensoren nicht mehr herunterfielen, die Haftung war teilweise trotzdem nicht mehr gegeben.

Da es das Ziel ist, kleinere Risse innerhalb des Probekörpers zu finden, wurde in Abbildung 4-4 (unten) neben einer Verkleinerung des Amplitudenbereichs auch das Zeitfenster verkleinert, sodass Ereignisse im kleinen Maßstab in den Daten zu finden sind. Durch das Auftreten der Signale an jedem Sensor kann vermutet werden, dass es sich um ein kleines Rissereignis innerhalb des Probekörpers handelt. Nachdem die Signale aufgezeichnet sind, können sie mit Hilfe des in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Programms *HypoAE* lokalisiert werden. Bei der Lokalisierung hat sich schnell herausgestellt, dass Ereignisse, ähnlich wie in Abbildung 4-4 (unten) dargestellt, nicht als Riss identifiziert werden können, da sie direkt am Rand oder genau in der Mitte des Probekörpers lokalisiert werden. Daher wird im weiteren Verlauf nur auf die Lokalisierung der Impaktsignale eingegangen.

Um die Güte der Lokalisierungsergebnisse belegen zu können, werden vor jeder SEA Messung zusätzlich Bleistiftminen an der Oberfläche gebrochen (Abbildung 4-5). Dies ist ein anerkanntes Verfahren zur Kalibrierung des Messsystems. Der sogenannte Hsu-Nielsen-Test (ASTM [1999]) wird, soweit möglich, vor und nach der eigentlichen SEA Messung durchgeführt. Mit der Lokalisierung der Bleistiftminenbrüche kann auch die Lokalisierungsgenauigkeit, in Bezug auf den verwendeten Lokisierungsalgorithmus und die Homogenität der Probekörper verifiziert werden. Der Hsu-Nielsen-Test sieht vor, dass das Messsystem bereits vollständig aufgebaut und einsatzbereit ist. Der verwendete Bleistift hat einen Aufsatz, der es dem Benutzer ermöglicht, ihn in einem Winkel von  $30^\circ$  anzusetzen und dann die Mine mit 0,5 mm Durchmesser und eine Bruchlänge von 0,3 cm an der Oberfläche zu brechen. Die sich ausbreitenden Schallemissionen werden von den Ultraschallsensoren registriert und können schließlich ausgewertet (lokalisiert) werden.

### Hsu-Nielsen Quelle (Bleistiftminenbruch)

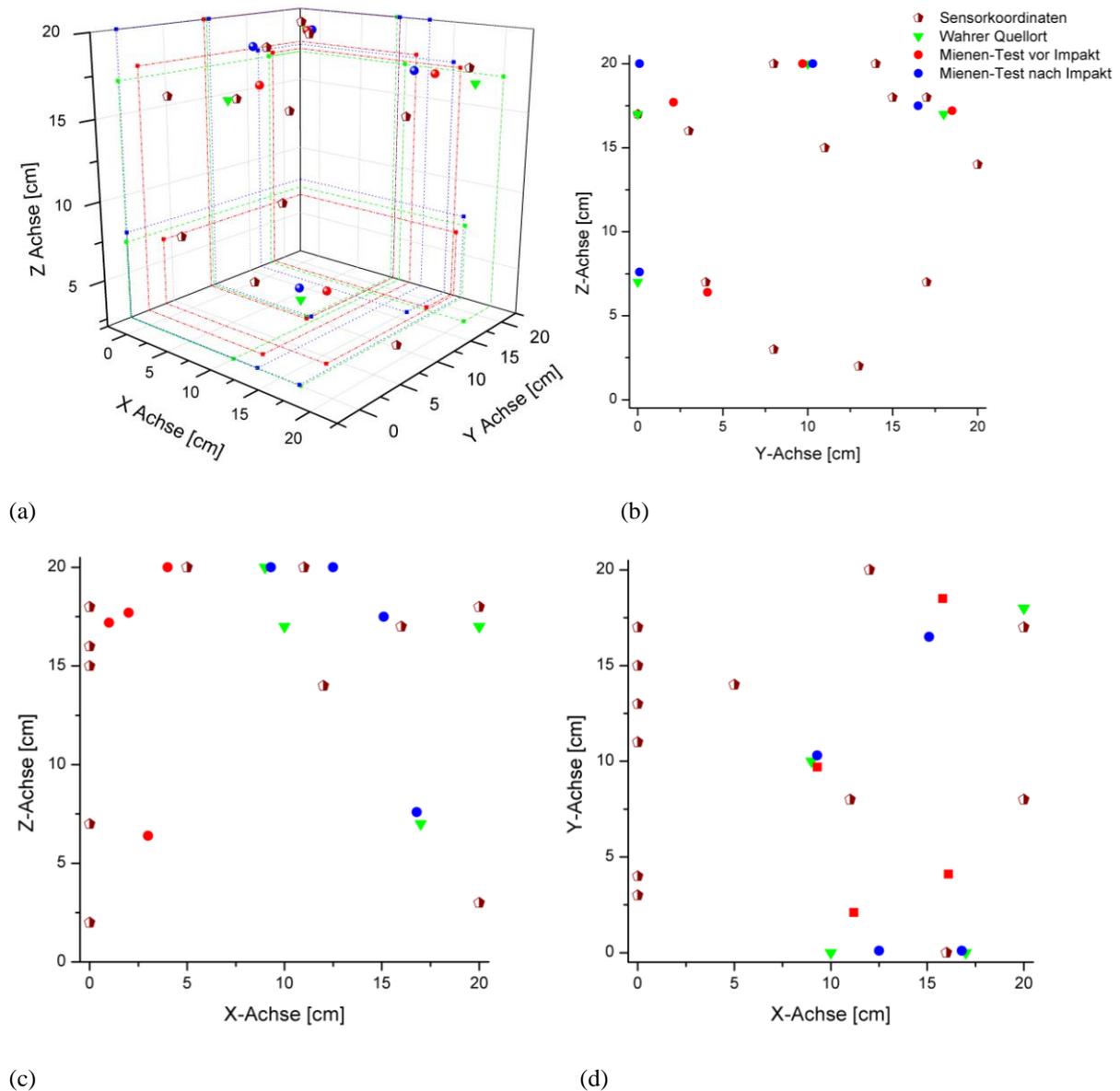


**Abbildung 4-5:** Links – Schematische Erklärung des Bleistiftminentests (Hsu-Nielsen-Quelle). Über die Bleistiftminen wird ein Teflon-Schuh gesetzt, sodass ein 30° Winkel zur Oberfläche entsteht (Augsburg [2013]). Rechts – Praktische Durchführung eines Bleistiftminentests an einem Sandstein-Probekörper.

Im Folgenden werden die Bleistiftminentests und dann die Impaktsignale ausgewertet. Für jeden Probekörper wurden Bleistiftminentests an vier verschiedenen Stellen (Koordinaten) durchgeführt und an jeder Stelle mindestens drei Wiederholungen durchgeführt.

Abbildung 4-6 und Tabelle 4-1 beinhalten die Lokalisierungsergebnisse der Bleistiftminentests für einen Sandstein-Probekörper. Da die Quellkoordinaten gut bekannt sind, kann das Ergebnis eindeutig evaluiert werden. Dargestellt werden die bekannten Quellkoordinaten als grüne Dreiecke und die Lokalisierungsergebnisse von jeweils einer Testmessung an jeder Koordinate mit einer roten Kugel (Ergebnisse vor dem Impakt) bzw. blauen Kugel (Ergebnisse nach dem Impakt). Mit jeweils der gleichen Farbcodierung sind in der 3D-Darstellung Rechtecke und Linien auf die Ebenen projiziert. Beides dient der besseren Orientierung in dem 3D-Modell. Die Lokalisierung beruht auch auf einer bekannten Materialgeschwindigkeit. Da für jeden Probekörper US-Messungen vor und nach dem Impaktexperiment durchgeführt wurden, können die Ausbreitungsgeschwindigkeiten aus diesen Messungen gewonnen werden. Hierbei wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit für jede der drei Raumrichtungen verwendet. Alternativ kann die Geschwindigkeit auch aus der Steigung berechnet werden. Dabei wird der Abstand Quelle – Sensor über der Wellenlaufzeit aufgetragen. Durch die aufgetragenen Punkte wird eine Ausgleichsgerade gelegt, deren Steigung als Durchschnittsgeschwindigkeit der Kompressionswelle interpretiert werden kann (Kapitel 4.3). Beide Methoden haben ähnliche Ergebnisse erbracht. Für die Lokalisierung wurden durchgehend die Daten der US-Durchschallung verwendet (Tabelle 3-1, S. 29). Hierbei wurde nicht das

heterogene Geschwindigkeitsfeld beachtet, sondern eine konstante Geschwindigkeit angenommen. Dies ist durchaus möglich, da bei der Berechnung der Lokalisierung das Ergebnis iterativ bestimmt wird.



**Abbildung 4-6:** (a) dreidimensionale Darstellung der Bleistiftminentest Ergebnisse an einem Sandstein mit 20 cm Kantenlänge (Positionierung entspricht der Aufstellung im Experiment). Braune Fünfecke: Sensorpositionen auf der Oberfläche der Probekörper. Grüne Dreiecke: Quellkoordinaten der Bleistiftminenbrüche. Rote Kugeln: Lokalisierung vor dem Impaktexperiment. Blaue Kugeln: Lokalisierung nach dem Impaktexperiment. Die Punkte und Linien dienen der Orientierung und sind farblich an die Koordinaten der Lokalisierung angepasst. (b)-(d) 2-dimensionale Darstellung der Bleistiftminentests. (b) y-z Ebene, (c) x-z Ebene und (d) x-y Ebene.

Die Ergebnisse der Lokalisierung der Bleistiftminentests liefert eine gute Übereinstimmung mit den bekannten Quellorten. Große Abweichungen entstehen bei Quellkoordinaten, die quasi gegenüber der Oberfläche mit den meisten Sensoren

liegen, dies ist die gegenüberliegende Fläche vom Impakt. Dadurch kann die Lokalisierung der Ergebnisse beeinflusst werden, in dem das Ergebnis näher an der Sensoranhäufung lokalisiert wird. An Hand der Bleistiftminentests kann letztlich der Fehlerbereich für die Lokalisierung abgeschätzt werden.

**Tabelle 4-1: Koordinaten der Bleistiftminentests. Wahrer Quellort (Q), Lokalisierung vor (V) und nach (N) dem Experiment.**

	Q-x ▼	Q-y ▼	Q-z ▼	V-x ●	V-y ●	V-z ●	N-x ●	N-y ●	N-z ●
<b>Test 1</b>	20,0	18,0	17,0	15,8	18,5	17,2	15,1	16,5	17,5
<b>Test 2</b>	10,0	0,0	17,0	11,2	2,1	17,7	12,5	0,1	20,0
<b>Test 3</b>	17,0	0,0	7	16,1	4,1	6,4	16,8	0,1	7,6
<b>Test 4</b>	9,0	10,0	20	9,3	9,7	20,0	9,3	10,3	20,0

Q = Quellort, V = Lokalisierung der Vorher-Bleistifttests, N = Lokalisierung der Nachher-Bleistifttests, alle Koordinaten sind in [cm] angegeben.

**Tabelle 4-2: Vergleich der numerisch lokalisierten Quellorte der Kratermittelpunkte projiziert auf die Oberfläche und der Berechnung durch Melosh [1989].**

Probe- körper (Material)	x- lokalisiert [cm]	y- lokalisiert [cm]	z- lokalisiert [cm]	x- gemessen [cm]	y- gemessen [cm]	z- gemessen [cm]	d <sub>b</sub> Melosh [cm] <sup>(2)</sup>
A3 (S)	20,0 ± 0,2	11,4 ± 0,2	9,9 ± 0,02	20	11,7	10,5	0,5
A5 (S)	19,8 ± 0,2	9,8 ± 0,2	10,0 ± 0,1	20	8,8	9,8	0,5
A6 (S)	20,0 ± 0,5	10,1 ± 0,4	9,4 ± 0,4	20	10,1	9,2	0,5
A7 (S)	19,6 ± 0,3	9,7 ± 0,3	10, ± 0,2	20	k.M.	k.M.	k.M.
A8 (S)	19,7 ± 0,2	11,0 ± 0,2	10,6 ± 0,2	20	10,5	10,0	0,5
A11 (S)	20,0 ± 0,8	11,0 ± 0,4	9,9 ± 0,6	20	10,3	10,6	0,47
A12 (S)	20,0 ± 1,0	9,1 ± 0,4	10,4 ± 0,8	20	9,4	9,8	0,47
A13 (S) <sup>(1)</sup>	20,0 ± 16,2	20,0 ± 15,6	20,0 ± 12,5	20	9,8	9,8	0,48
A15 (S)	20,0 ± 8,1	9,1 ± 3,5	9,2 ± 6,7	20	9,7	10,4	0,58
A16 (S)	20,0 ± 1,2	10,2 ± 0,7	8,6 ± 1,2	20	9,7	10,2	0,29
A20 (Q)	19,6 ± 0,4	10,5 ± 0,2	10,3 ± 0,3	20	10,6	10,5	0,44
A22 (Q)	19,6 ± 0,3	10,1 ± 0,1	10,3 ± 0,2	20	10,0	10,2	0,44
A24 (T)	20,0 ± 0,6	10,5 ± 0,3	9,7 ± 0,5	20	10,6	10,1	0,58
A25 (T)	19,7 ± 0,6	10,7 ± 0,3	9,6 ± 0,5	20	10,4	9,7	0,58
A26 (T) <sup>(1)</sup>	20,0 ± 4,2	12,8 ± 2,1	5,7 ± 4,2	20	10,2	10,1	0,53
D3 (S)	50,0 ± 0,7	23,4 ± 0,5	25,0 ± 0,4	50	k.M.	k.M.	1,96
D4 (S)	50,0 ± 1,1	24,3 ± 0,7	24,2 ± 0,7	50	k.M.	k.M.	1,96
D5 (S) <sup>(1)</sup>	50,0 ± 12,6	18,7 ± 8,8	26,0 ± 7,9	50	23,9	26,1	1,96
E1 (S)	k.M.	k.M.	k.M.	50	40,4	40,6	4,76
E2 (S) <sup>(1)</sup>	44,5 ± 6,1	41,9 ± 4,1	43,9 ± 3,9	50	k.M.	k.M.	2,32
E3 (S) <sup>(1)</sup>	45,1 ± 5,4	44,7 ± 3,6	43,5 ± 3,4	50	k.M.	k.M.	2,28
E4 (S)	50,0 ± 1,5	40,5 ± 0,9	39,8 ± 0,9	50	41,7	40,7	4,77
E5 (T)	48,3 ± 1,6	37,9 ± 1,0	38,1 ± 1,0	50	37,2	39,5	5,58
E6 (Q)	40,0 ± 2,0	42,2 ± 1,0	38,7 ± 1,3	40	37,8	40,6	4,22

(S) = Sandstein, (Q) = Quarzit, (T) = Tuff, <sup>(1)</sup> = wassergesättigtes Material, <sup>(2)</sup> = persönlicher Kontakt: Poelchau [2013b], k. M. = keine Messdaten

Das ursprüngliche Ziel, die kleineren Risse zu lokalisieren und so die Bruchentstehung zu verfolgen, wird durch das von Multiplen (vorwiegend reflektierte Wellen) überlagerte Wellenfeld fast unmöglich. Daher werden hier nur die lokalisierten Einschläge diskutiert, da diese relativ gut anhand des Impaktkraters an der Oberfläche rekonstruiert werden können. Die Betrachtung des Impaktpunktes ist dabei jedoch nicht das Wesentliche. Melosh [1989] hat beschrieben, dass sich die Welle eines Impaktes nicht zwangsläufig von der Oberfläche her ausbreitet. Der Ort des Impaktes und der Ort, an dem sich die Welle das erste Mal ungehindert ausbreiten kann, sind demnach nicht identisch. In der Formel von Melosh ist die Berechnung des Ortes für die Wellenausbreitung („depth of burial“ oder „depth of burst“) vom Projektil und dem Material, in dem das Projektil auftrifft, beeinflusst. Tabelle 4-2 zeigt die Koordinaten der Impaktorte. Verdeutlicht wird dies auch noch einmal in Abbildung 4-7, wo die Ergebnisse von insgesamt zwei Sandstein, zwei Tuff und zwei Quarzit-Probekörpern in einem dreidimensionalen Plot (bis zu vier Zentimeter unterhalb der Impaktoberfläche) verglichen werden. Die Abbildung beinhaltet das berechnete Ergebnis über die SEA (rote Kugeln) sowie die Koordinaten des Kratermittelpunktes (blaue Kugeln).

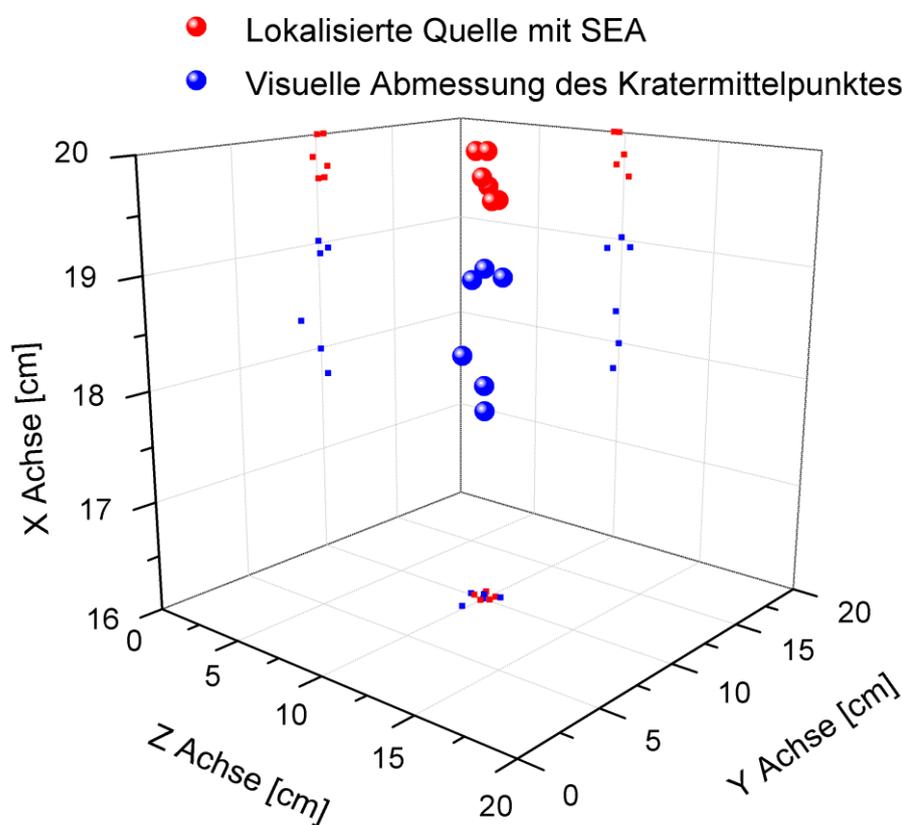


Abbildung 4-7: Darstellung von sechs Lokalisierungsergebnissen (A5, A6, A20, A22, A24 und A25, siehe Tabelle 4-2) im Vergleich zu den gemessenen Kratermittelpunkten. Gezeigt werden hier nur die oberen vier Zentimeter (modifiziert nach Moser et al. [2013b]).

Nach Melosh [1989] kann der Ort beziehungsweise die Tiefe  $d_b$  (betrachtet von der Oberfläche = 0), an dem sich die Welle ausbreitet, folgendermaßen berechnet werden:

$$d_b = 2r_p\sqrt{\rho_p/\rho_t}. \quad (4.1)$$

Dabei ist  $r_p$  der Radius des Projektils,  $\rho_p$  die Dichte des Projektils und  $\rho_t$  die Dichte des Probekörpers (Target). Zum Vergleich der lokalisierten Quellorte, der berechneten Quellorte nach Melosh und der vom Impaktmittelpunkt auf die Oberfläche projizierten vermuteten Impaktquelle wurden alle Ergebnisse in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

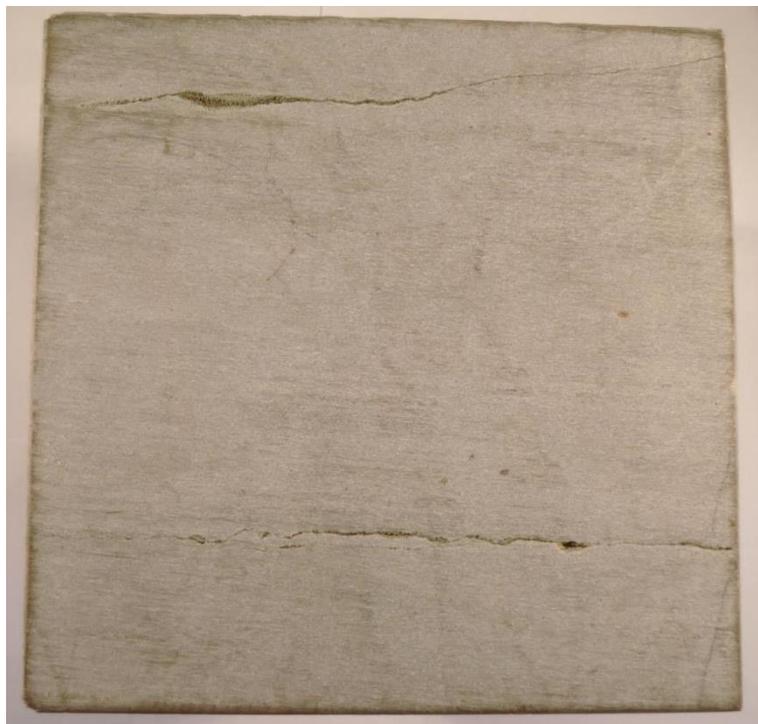
Die Ergebnisse der Lokalisierung über die SEA zeigen keine Übereinstimmung mit den berechneten Werten über die Formel von Melosh [1989]. Jedoch zeigt sich, dass die Lokalisierung der x-Koordinate vorwiegend an der Oberfläche stattfindet. Die Vermutung liegt hier nahe, dass die Berechnung durch Melosh [1989] eher für die Betrachtung von terrestrischen Impaktkratern herangezogen werden kann. Die dort entstehenden Energien überschreiten die Energien in den hier gezeigten Experimenten bei weitem und können dadurch zu einer Verschiebung des Wellenausbreitungsortes führen. Die y- und z-Koordinaten haben Abweichungen von  $\leq 1$  cm. Lediglich die mit Wasser teilgesättigten Probekörper zeigen bei allen drei Koordinaten starke Abweichungen. Auch der Fehlerbereich ist bei den wassergesättigten Probekörpern sehr viel größer. Bei diesen Probekörpern ist jedoch nicht bekannt, wie homogen die Wasserverteilung innerhalb des Probekörpers ist. Auch konnten für diese Probekörper keine Wellengeschwindigkeiten mit Ultraschall im gesättigten Zustand ermittelt werden. Der Rauschanteil bei der Messung hat das Signal überlagert. Somit ist nicht bekannt, ob es sich um ein isotropes Geschwindigkeitsfeld handelt.

## 4.2 Visualisierung der Schädigung mittels Ultraschall-Tomographie

Die Ultraschallprüfung (USP) wird für die Materialcharakterisierung sowie für die Auffindung von Fehlstellen herangezogen. Bei den hier verwendeten Probekörpern wurde die USP in Durchschallung angewendet. Für die Auswertung wurde die Laufzeit der Kompressionswelle in dem Probekörper ausgewertet. Die untersuchten Probekörper sollten nach Möglichkeit eine gute Homogenität vor den Impaktexperimenten haben. Wenn dies der Fall gewesen wäre, würden die Probekörper überall die gleiche Laufzeit aufweisen und eine spätere Schädigung eindeutig identifiziert werden können. Tatsache ist jedoch, dass schon die erste Sichtprüfung eine Schichtung in dem Sandstein (Abbildung 4-8, nicht zu verwechseln mit den Sägespuren) und im Quarzit (Abbildung 4-9) zeigt. Der Tuff zeigt optisch keine Schichtung, ist jedoch relativ heterogen in Bezug auf seine Körnigkeit (siehe Kapitel 1.2.2).



**Abbildung 4-8:** Sandstein-Probekörper mit 30 cm Kantenlänge. Die Schichtung ist schon übergeordnet (hier horizontal) sichtbar. Oben rechts ist die Schichtung schematisch eingezeichnet. Zusätzlich sind Färbungen durch Wassereinlagerungen und zusätzlichen Mineralen erkennbar (vorwiegend vertikal).



**Abbildung 4-9:** Sichtbare Schichtung im Quarzit (20 cm Kantenlänge), die hier parallel zu den deutlich sichtbaren Rissstrukturen verläuft.

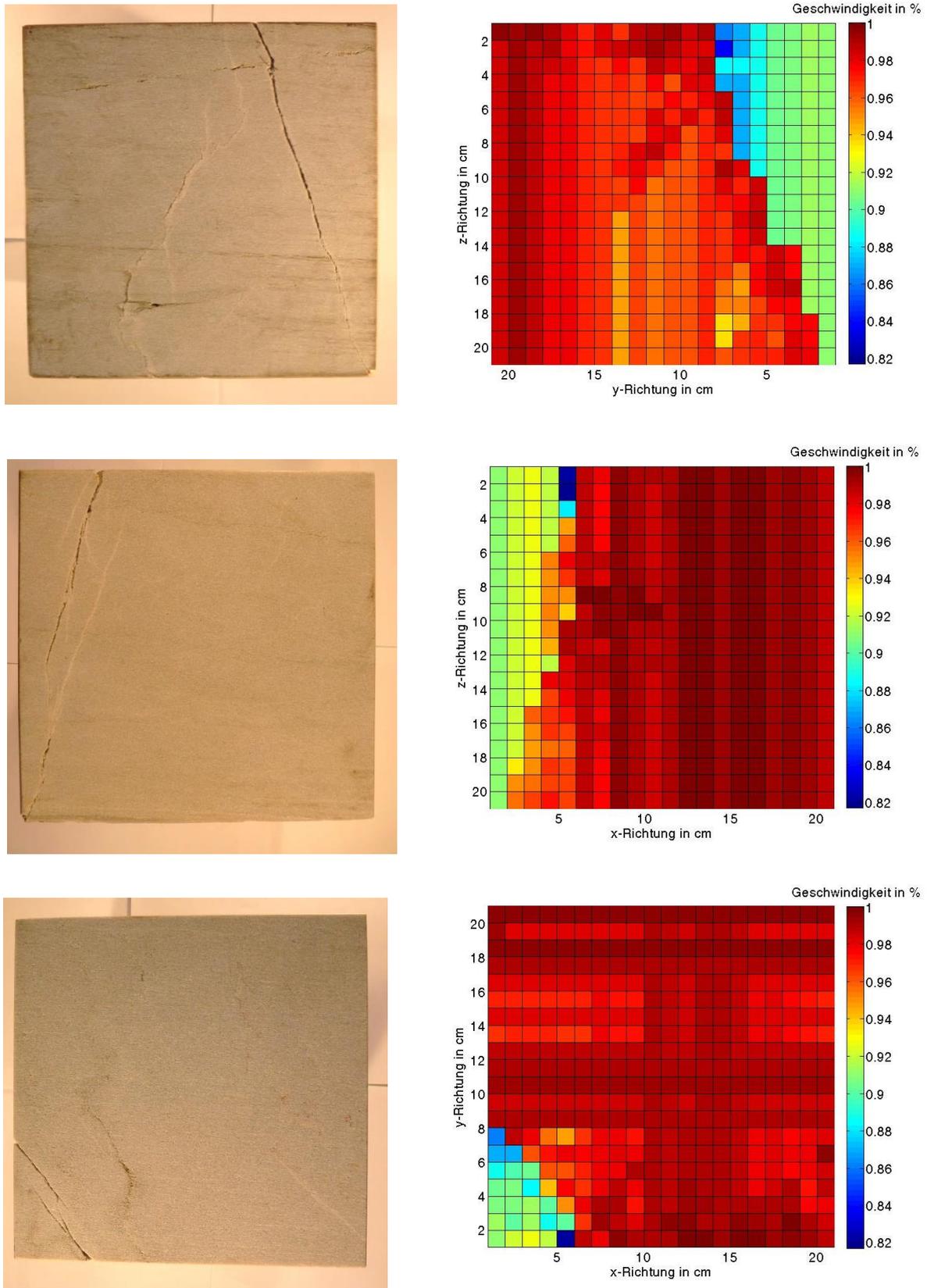
Um eine optimale Aussage über die Veränderungen durch den Impakt geben zu können, sollten die Probekörper nach Möglichkeit bereits vor den Laborexperimenten untersucht werden. Für den meisten Probekörper mit Impaktkrater existieren keine Ultraschall-Tomographie Daten die den ursprünglichen Zustand vor dem Experiment zeigen. Es existieren nur einzelne Durchschallungswerte, die mittig auf den Oberflächen in alle drei Raumrichtungen durchgeführt worden sind (Tabelle 1-1, S. 15). Diese wurden direkt vor und auch nach den Experimenten aufgezeichnet. Die beschossenen Sandsteine konnten vorher nicht gemessen werden, da diese zu Beginn des Projektes beschossen wurden. Zu diesem Zeitpunkt war die UST noch nicht entsprechend einsatzbereit. Daher wurde im Nachhinein ein Sandstein ohne Impaktkrater als Referenz hinzugezogen. Für den Tuff konnte ebenfalls erst nach den durchgeführten Impaktexperimenten ein nicht beschossener Probekörper gemessen werden. Für den Sandstein und den Tuff gibt es daher für die UST jeweils nur eine Referenzmessung von Probekörpern, die im weiteren Verlauf nicht mehr für Experimente verwendet worden sind. Die Quarzit-Probekörper wurden vor den Experimenten komplett mit der UST gemessen.

Alle hier gezeigten Ergebnisse stammen von Probekörpern mit 20 cm Kantenlänge. Wie in Kapitel 3.2.2 bereits erklärt wurde, wird für die Darstellung der Ergebnisse der UST durchgehend eine einheitliche Farbskala verwendet. Die Messwerte wurden auf 1 (bzw. 100 %) normiert, sodass eine relative Geschwindigkeitsänderung dargestellt wird. Es wurde eine einheitsfreie Angabe verwendet, da die Messergebnisse stark von den äußeren Einflüssen abhängen und so einfacher vergleichbar sind. Unter anderem können Temperatur und Feuchtigkeit die Messwerte zum Teil stark beeinflussen. Da die Probekörper in einem Raum ohne Klimaüberwachung gelagert wurden, konnten diese Schwankungen nicht registriert werden. Wie bereits in Kapitel 3.2.2 näher erläutert, wurde nur eine Durchschnittsgeschwindigkeit gemessen, die tatsächliche Geschwindigkeit kann somit nicht gezeigt werden (siehe auch Kapitel 6.1). Die Normierung dient auch dem Zweck der Vergleichbarkeit der Probekörpermaterialien untereinander, da vor allem die Schädigungszone und nicht die Materialgeschwindigkeit an sich von Interesse ist. Für alle UST-Abbildungen wurde die *jet*-Farbskala von *MATLAB* gewählt, wobei Rot = **I** das Maximum anzeigt und Dunkelblau das Minimum an vorhandenen Geschwindigkeitswerten für den vorliegenden Probekörper. Das Minimum muss hierbei nicht null sein. Die Skala gibt somit einen prozentualen Abfall der Geschwindigkeiten an. Es werden nicht die vollen 100 % farblich dargestellt, da die Geschwindigkeitsreduktion teilweise für die Farbschritte nicht groß genug ist. Die Schädigungszone wäre kaum erkennbar, wenn die Geschwindigkeiten zwischen null und dem Maximum gezeigt werden. Deshalb wird die Skala immer zwischen maximaler und minimaler Geschwindigkeit angezeigt.

Das Messraster beträgt 1 cm. In der Darstellung werden auf den Achsen die Messpunkte angegeben. In jeder Messreihe sind bei einem Probekörper mit 20 cm

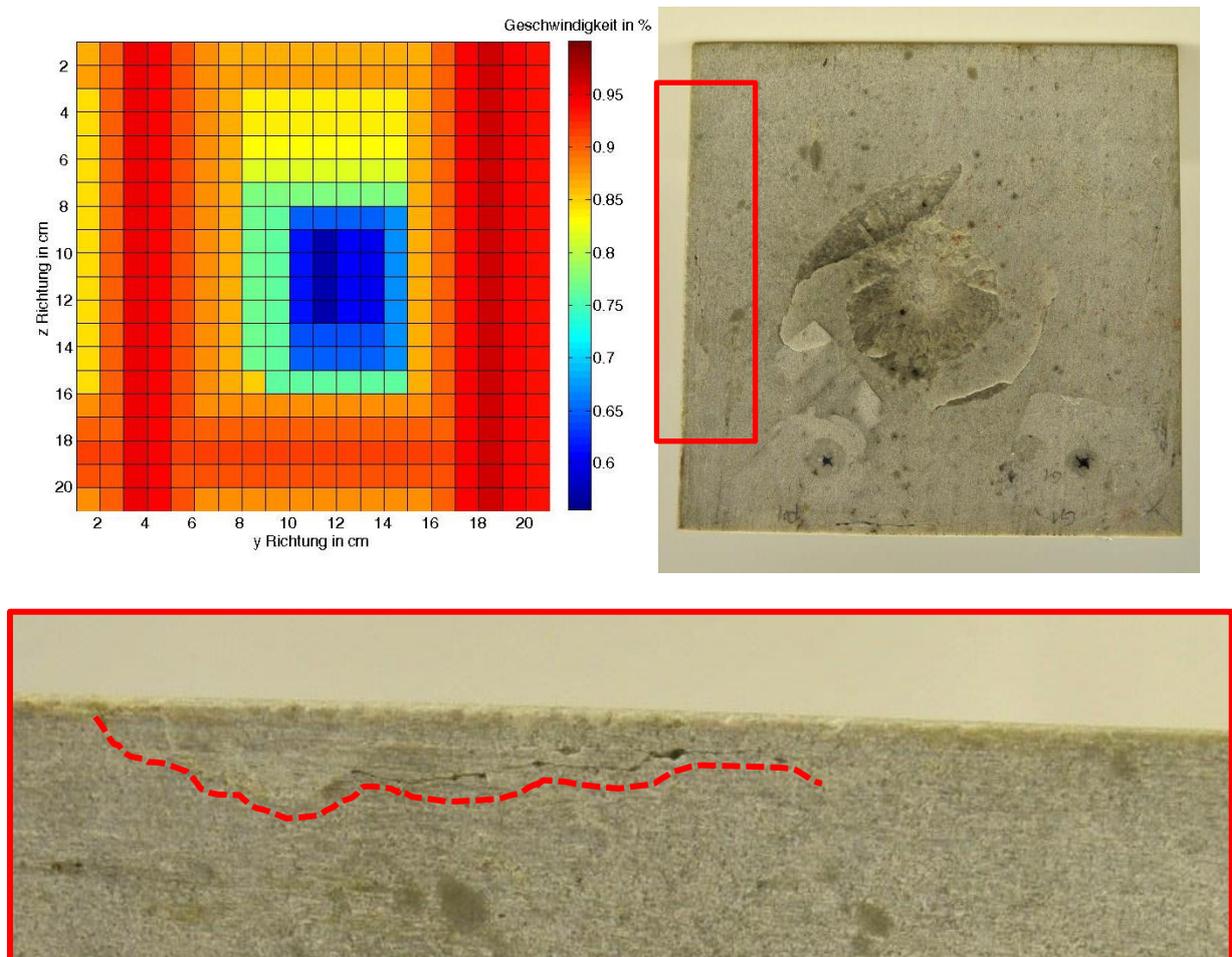
Kantenlänge somit 21 Messpunkte. In den ersten beiden Abbildungen (Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11) ist die vereinfachte Darstellung der Daten gewählt worden. Beide Abbildungen sollen die Genauigkeit der Messung widerspiegeln. Die Auflösung in den Bildern entspricht daher dem Messraster. Für die Darstellung späterer Bilder wurden die Daten interpoliert. Das Messraster wurde mathematisch verkleinert und eine Funktion für das Geschwindigkeitsfeld berechnet, sodass der Bereich zwischen den Messpunkten einen fließenden Übergang darstellt. Die vorhandenen Messpunkte stellen dabei eine Art von Stützpunkten für die Funktion dar, die den Bereich zwischen den Messpunkten beschreibt. Die Interpolation ist daher eine Art Approximation für den Bereich zwischen den Messpunkten. Diese dient lediglich der optischen Darstellung.

In Abbildung 4-10 wird die Oberfläche eines Quarzit-Probekörpers (Block A21) ohne Schädigung durch ein Experiment aus drei verschiedenen Winkeln gezeigt. Bei diesem Probekörper war bereits vor den Untersuchungen eine deutliche Bruchkante in Keilform an einer Ecke zu erkennen. Die Abbildung zeigt drei Bilder der Probekörperoberfläche und das jeweilige Ergebnis der UST. Der Keil ist hier mit einer durchgehenden reduzierten Geschwindigkeit zu sehen. Dies kommt durch die Art des Risses und der Berechnung bzw. Darstellung der Daten zustande. Obwohl für die Darstellung immer der schnellste Laufweg aus den drei sich kreuzenden Messungen verwendet wird (siehe Kapitel 3.2.2), hat der gesamte Keil einen niedrigeren Wert als das Umgebungsgestein. Im Bereich der Keilstruktur verlaufen alle Linienmessungen durch einen großen Riss und werden daher stark beeinflusst und zeigen eine sehr niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit. Außerhalb des Keils geht mindestens eine Linienmessung nicht durch einen der großen Risse und es wird daher eine höhere durchschnittliche Geschwindigkeit angezeigt. Dieses Problem tritt bei den Kraterstrukturen nicht in einer solchen Größenordnung auf, da die Risse dort sehr viel feiner sind und eher eine Art radialsymmetrisches Netz um den Krater herum bilden. Zusätzlich sind in den UST-Bildern in Abbildung 4-10 weitere Bereiche mit sichtbar reduzierter Geschwindigkeit zu sehen, die auf die Schichtung oder auch auf Toneinlagerungen zurückzuführen sind. Der hier gezeigte Block A21 wurde aufgrund der bekannten Schädigung nicht für weitere Impaktexperimente verwendet.



**Abbildung 4-10: Drei Seitenansichten eines Quarzit-Probekörpers (Block A21) jeweils auf der linken Seite und drei Seitenansichten der dazugehörigen Ultraschall-Tomographie an der Oberfläche auf der rechten Seite. Hier sind deutlich die Bruchkanten eines Keils im Block zu erkennen. Von oben nach unten: Bruchkante rechts, Bruchkante links, Bruchkante unten links.**

Ein ähnliches Beispiel wird in Abbildung 4-11 gezeigt. Neben der gut sichtbaren Kraterstruktur in der Mitte der beiden oberen Bilder ist auch ein neu entstandener Riss an einer Kante des Probekörpers erkennbar, der mit Hilfe der UST gefunden werden konnte. Hier ist der Effekt in der Darstellung nicht so ausgeprägt wie in Abbildung 4-10, da der Riss nicht durchgängig von einer Seitenfläche zu einer anderen Seitenfläche verläuft.



**Abbildung 4-11:** Ultraschall-Tomographie eines Quarzit-Probekörpers (Block A20) nach dem Impaktexperiment. Der Krater ist mittig im Gestein (oben, rechts) und in dem Ultraschall-Tomographie-Bild gut sichtbar (oben, links). An der linken äußeren Kante (unten, rot unterzeichnet) ist ein Riss erkennbar, der auch bei der Ultraschall-Tomographie mit einer reduzierten Geschwindigkeit gefunden wurde.

Rissstrukturen, wie sie in Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 gefunden wurden, sind der Grund, weshalb die Probekörper auch vor den Experimenten untersucht werden sollten. Anhand der Ergebnisse vor den Experimenten kann verifiziert werden, welche Strukturen durch den Impakt entstanden sind und welche bereits vorhanden waren. Anhand der in Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 sichtbaren Strukturen kann eine durchaus gute Genauigkeit der UST belegt werden. Zwar können die Risse aufgrund

der Messrastergröße nicht exakt identifiziert und visualisiert werden, jedoch ist ein Bereich der Schädigung, der im Zentimeterbereich liegt, deutlich sichtbar.

Da die Sandstein-Probekörper zu Beginn des Forschungsprojektes beschossen wurden, existieren keine Daten, die den ursprünglichen Zustand beschreiben. Als Referenz wird daher ein Block verwendet, der im weiteren Verlauf nicht für Impaktexperimente verwendet wurde. Auch für den Tuff gibt es nur einen Referenzblock, der nicht für ein Impaktexperiment verwendet wurde. Einzig für den Quarzit-Probekörper wurden UST-Messungen vor den Experimenten durchgeführt. Die UST-Abbildungen ab Abbildung 4-12 werden als interpolierte Daten (0,25 cm Schritte) dargestellt. Zur besseren Übersicht wird das Gitter, das die Linien des Messrasters angezeigt hat, weggelassen. Im Folgenden werden zuerst Schnittebenen von ungeschädigten Probekörpern für jedes Material gezeigt. Daran anschließend werden Probekörper mit Impaktkrater abgebildet.

In Abbildung 4-12 (oben) wird das Ergebnis der UST des Sandstein Referenzprobekörpers gezeigt. Ein Bereich mit verminderter Wellengeschwindigkeit ist deutlich zu erkennen. Die normierte Farbskala zeigt eine maximale Geschwindigkeitsreduzierung von etwa 9 %. Bei einer durchschnittlichen Kompressionswellengeschwindigkeit von 2950 m/s (Tabelle 1-1, S. 15) ist das eine Abweichung von etwa 265 m/s. Diese große Abweichung kommt vor allem am Rand zustande, an dem ein stark erhöhtes Geschwindigkeitsprofil im Vergleich zu den weiter im Innern liegenden Bereichen des Sandsteins zu erkennen ist. Zusätzlich werden in Abbildung 4-12 (Mitte bzw. unten) jeweils eine Schnittebene für einen Quarzit und für einen Tuff gezeigt. Auch der Quarzit und der Tuff zeigen eine erkennbare Heterogenität innerhalb des Probekörpers. Hier liegen die Abweichungen ähnlich wie bei dem Sandstein auch für Quarzit und Tuff bei 10 %. Bei dem Quarzit liegt die Abweichung der Kompressionswellengeschwindigkeit somit bei ca. 500 m/s (5000 m/s Ausgangsgeschwindigkeit, Tabelle 1-1, S. 15). Bei dem Tuff liegt die Schwankung der Geschwindigkeit bei ca. 210 m/s (2100 m/s Ausgangsgeschwindigkeit, Tabelle 1-1, S. 15). Wie im Sandstein liegt in den Materialien Quarzit und Tuff eine Inhomogenität vor, die durch die Messungen darstellbar ist. Beim Quarzit handelt es sich eher um eine lokale Störung, die sich in der Schnittebene unten links andeutet (Abbildung 4-12, Mitte). Der Farbwert entspricht 95 % bis 96 % der Maximalgeschwindigkeit. Bei dem Tuff hingegen scheint ein Geschwindigkeitsgradient von links nach rechts (bzw. von niedrigen z-Werten zu hohen z-Werten) vorzuliegen (Abbildung 4-12, unten). Generelle Ursachen solcher Geschwindigkeitsschwankungen können Strukturen wie Einschlüsse, Schichtungen, Konsolidierungen oder Gefügeveränderungen sein. Aber auch Messfehler können sich hier widerspiegeln. Obwohl die Messungen an den ungeschädigten Probekörpern schon deutliche Schwankungen in den Geschwindigkeiten zeigen, hebt sich später die Schädigung durch den Impakt deutlich ab.

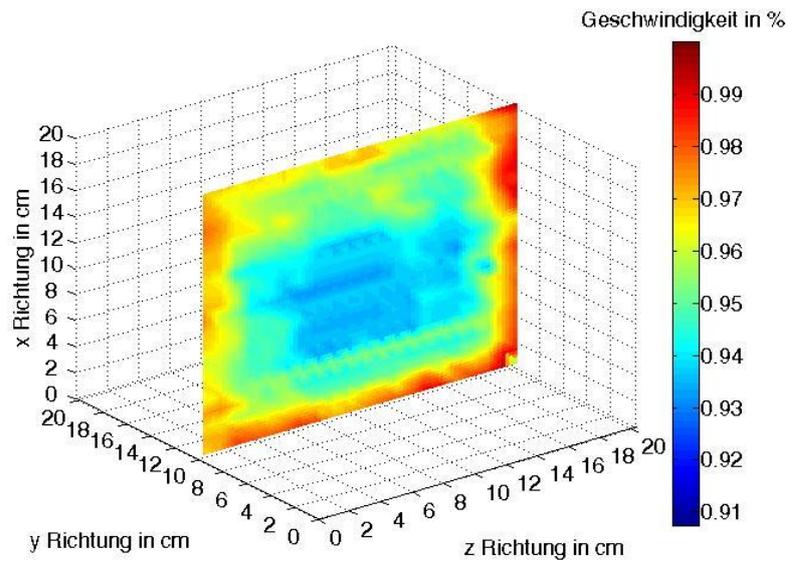
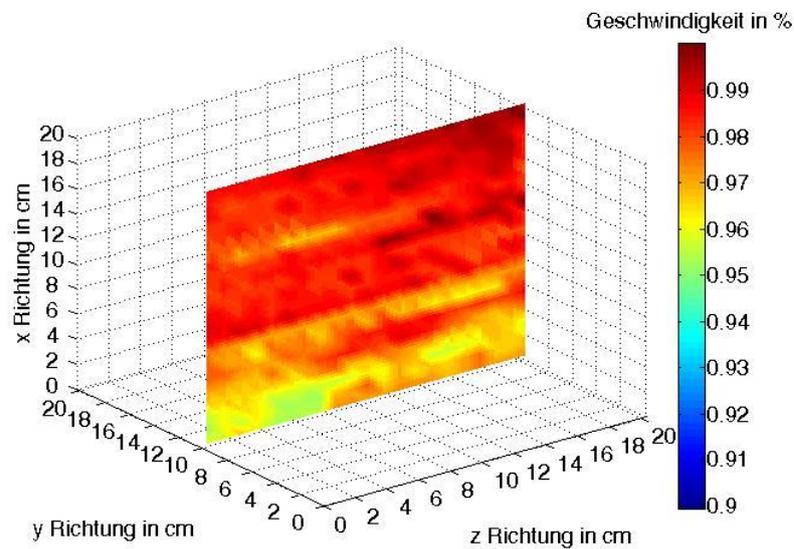
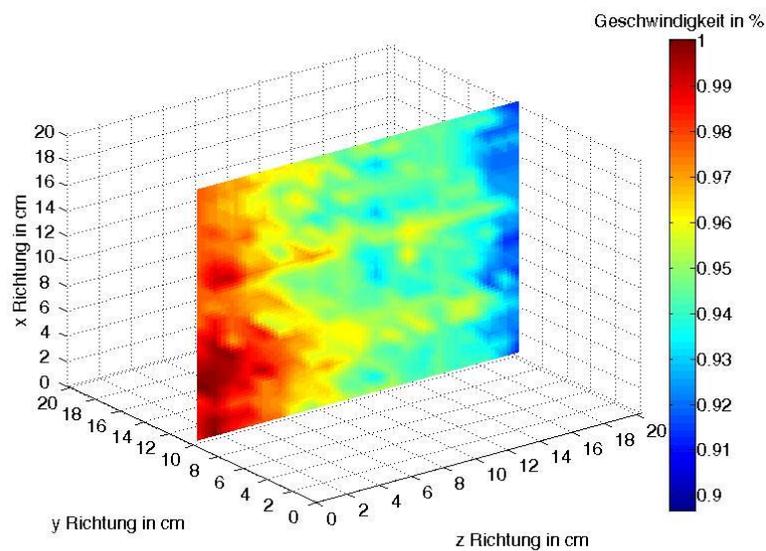
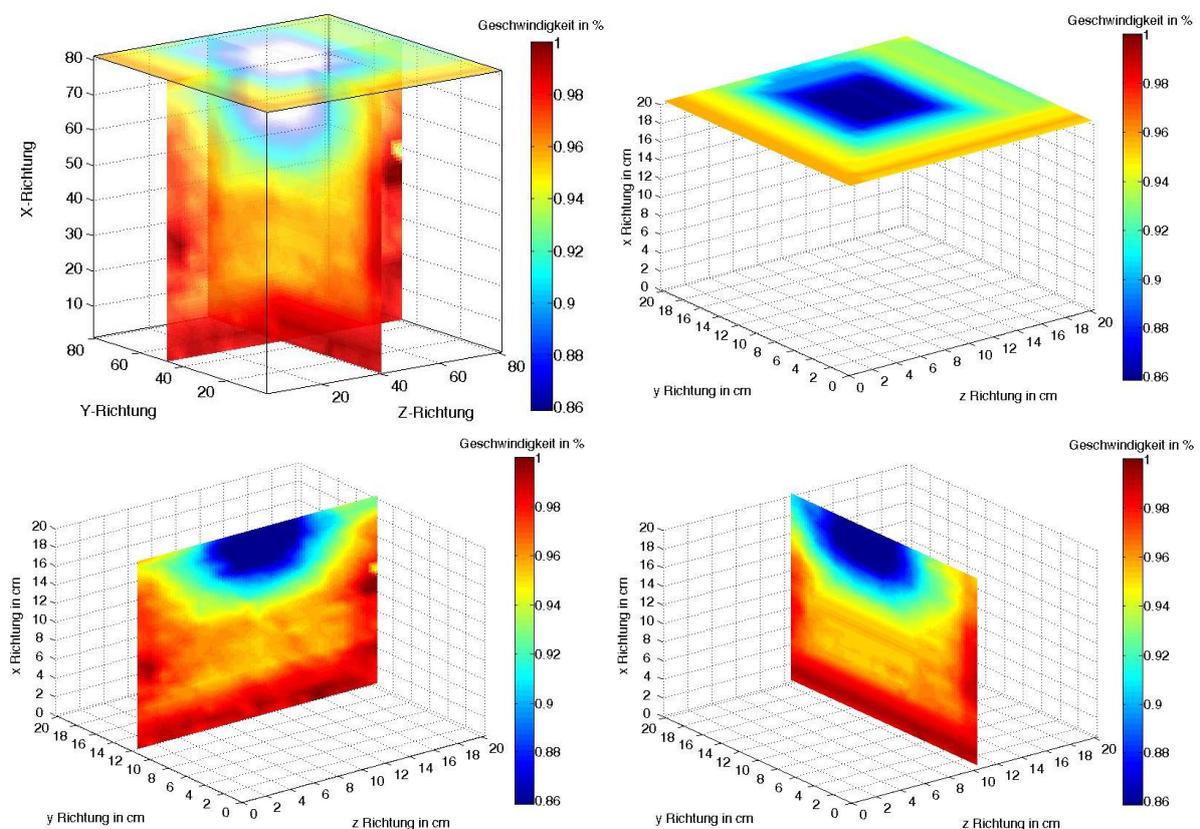
*Sandstein: A1**Quarzit: A20**Tuff: A27*

Abbildung 4-12: Drei Schnittbilder von drei verschiedenen Ultraschall-Tomographie-Messungen an ungeschädigten Probekörpern. Oben: Sandstein; Mitte: Quarzit; Unten: Tuff. In allen Bildern wird die x-z-Ebene bei  $y = 10$  cm dargestellt. Die prozentualen Geschwindigkeitsunterschiede liegen bei ca. 9 % (Sandstein), ca. 10 % (Quarzit) und ca. 10 % (Tuff).

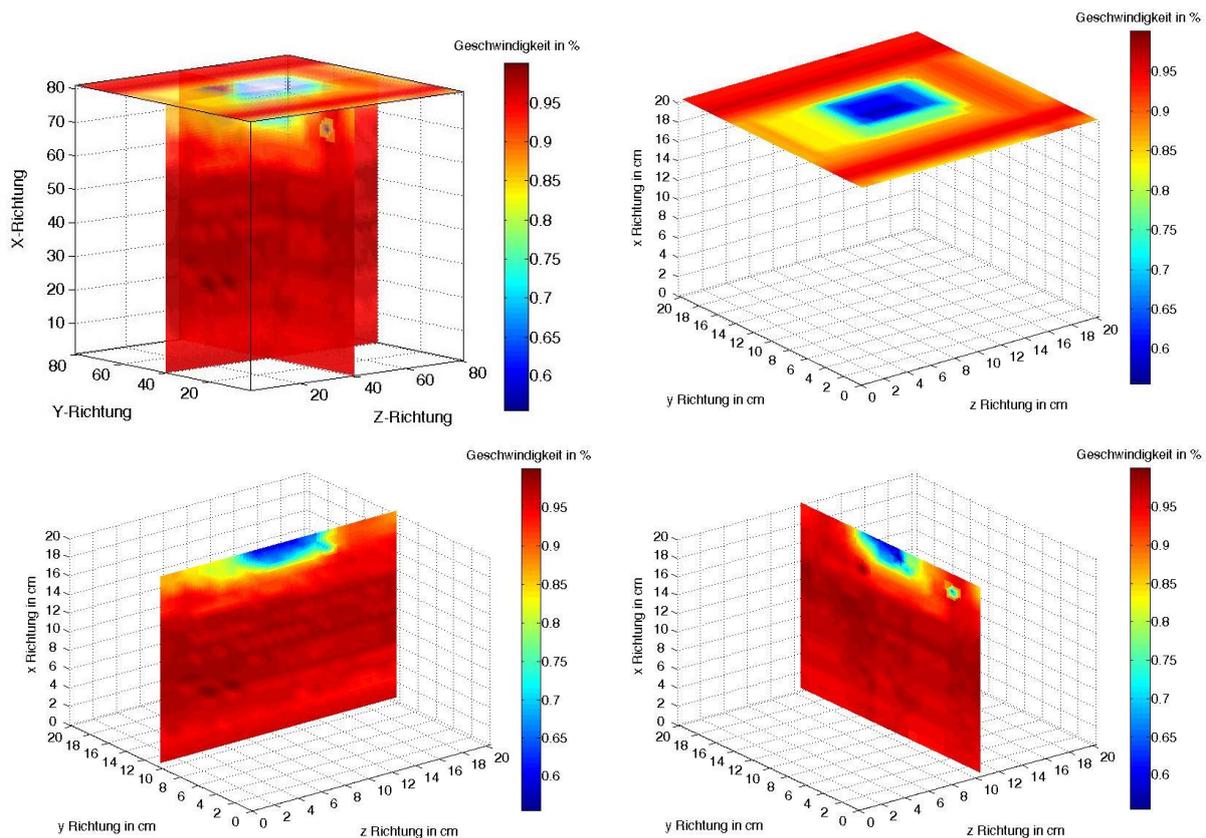
Bei den Ergebnissen mit einem Impaktkrater wird in Abbildung 4-13 zunächst ein Sandstein-Probekörper betrachtet. Hier ist deutlich ein Bereich verminderter Geschwindigkeiten im Bereich hoher  $x$ -Werte zu sehen. Dieser Bereich wird als Schädigungszone bezeichnet und umschließt die Kraterstruktur. Wie schon bei dem ungeschädigten Sandstein-Probekörpern zeigt sich im Randbereich eine erhöhte Geschwindigkeit gegenüber dem innenliegenden Bereich. Dieser Effekt ist auch bei den anderen Sandsteinen zu erkennen (Anhang IV). Wie auch in den zwei folgenden Abbildungen für Quarzit und Tuff wird oben links eine dreidimensionale Ansicht von drei Schnittebenen durch den Krater gezeigt. Oben rechts ist die Oberfläche des Probekörpers zu sehen, wo sich der Krater befindet, sodass die gesamte Ausdehnung der Schädigung an der Oberfläche erkennbar ist. Die beiden unteren Bilder zeigen die  $x$ - $z$ -Ebene (links) und die  $x$ - $y$ -Ebene (rechts). Beide verlaufen direkt durch den Kratermittelpunkt. Da sich der Kratermittelpunkt nicht immer exakt im geometrischen Mittelpunkt ( $y = 10$  cm und  $z = 10$  cm) befindet (Tabelle 4-2, S. 85), sind auch die Ebenen dementsprechend nicht mittig. Die Abbildung mit allen drei Schnittebenen ist etwas transparenter als die anderen Bilder. Der Kraterbereich ist dort durch die Überlagerung der identischen Blauwerte eher weiß als blau (Minimalgeschwindigkeit). Auch sind dort die Achsen mit den durchgeführten Interpolationsschritten beschriftet und nicht wie bei den anderen Abbildungen mit den Messpunkten.



**Abbildung 4-13: Sandstein A3 mit Impaktkrater. Oben: 3D Ansicht mit Interpolationsschritten beschriftet (links),  $y$ - $z$ -Ebene (rechts). Unten:  $x$ - $z$ -Ebene (links),  $x$ - $y$ -Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt.**

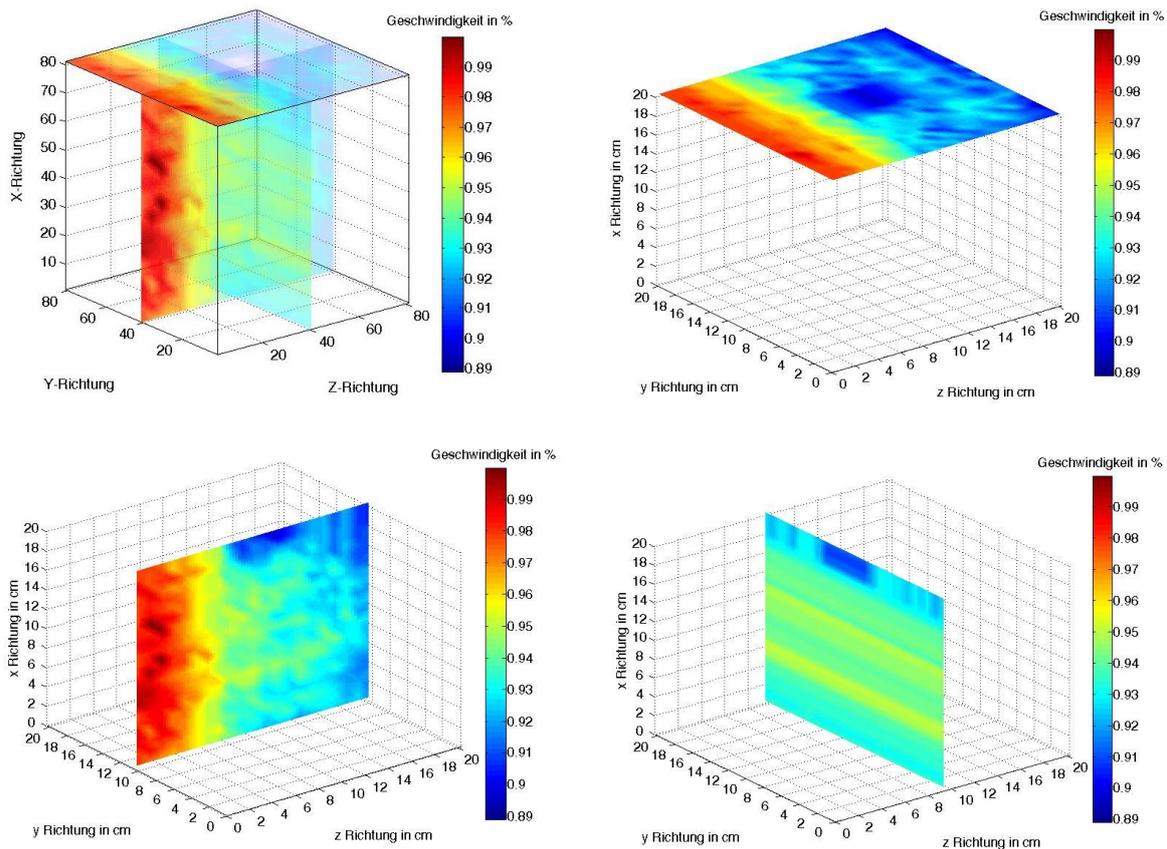
Betrachtet man die Schädigungszone im Sandstein (Abbildung 4-13) ist eine Halbkugel um den Kraterbereich zu erkennen. Die Kratertiefe liegt hier bei etwa 1,1 cm, das entspricht ungefähr dem Abstand zweier nebeneinanderliegender Messpunkten im Messgitter. Der Durchmesser des Kraters beträgt etwa 6 cm. Da der Krater sehr unregelmäßige Ränder aufweist, kann kein genauer Durchmesser angegeben werden. Der Bereich verminderter Geschwindigkeit zieht sich bis in eine Tiefe von 6 cm bis 8 cm in x-Richtung und hat eine radiale Ausdehnung von etwa 8 cm bis 9 cm in y- und z-Richtung. Eine genauere Aussage kann gemacht werden, wenn zum Vergleich der Sandstein ohne Impaktkrater (Abbildung 4-12, oben, S. 94) angesehen wird. Bei Sandstein ohne Schädigung wird bereits eine Geschwindigkeitsunsicherheit von 9 % festgestellt. Daher kann in dem Sandstein mit Krater nur der Bereich als Schädigung betrachtet werden, bei dem die Geschwindigkeiten unterhalb der 91 %-Schwelle liegen. Die Schädigungszone geht damit nur noch bis in eine Tiefe von circa 6 cm und zeigt eine radiale Ausbreitung in y- und z-Richtung von 5 cm bis 6 cm. Die Geschwindigkeit wird um bis zu 14 % der Ausgangsgeschwindigkeit reduziert.

Für den Quarzit wird in Abbildung 4-12 (Mitte, S. 94) und Abbildung 4-14 jeweils derselbe Probekörper gezeigt, einmal ohne Krater (Abbildung 4-12) und einmal mit Krater (Abbildung 4-14). In Abbildung 4-14 ist die Schädigungszone um die Kraterstruktur wie bei dem Sandstein deutlich sichtbar. Bei der Betrachtung des Blockes fällt auf, dass die Schädigungszone, im Vergleich zu den Ergebnissen des Sandsteines, sehr viel geringer ausfällt. Bis auf einige lokale Strukturen kann beim Quarzit ohne Krater eine Geschwindigkeitsveränderung des Umgebungsgesteines von etwa 4 % geschätzt werden. Demnach kann in Abbildung 4-14 alles unterhalb der 96 % als Schädigung um den Krater angesehen werden. Der Krater hat eine Tiefe von etwa 1 cm und einen Durchmesser von etwa 6 cm. Die Schädigungszone kann lediglich auf 2 cm in x-Richtung und auf eine radiale Ausdehnung von 4 cm bis 5 cm in y- und z-Richtung geschätzt werden. Auch wenn die Schädigungszone nicht so tief geht wie bei dem Sandstein, so ist die Reduzierung der Geschwindigkeit sehr viel größer. Während die Geschwindigkeit im Sandstein um 14 % zurückgeht, ist hier eine Reduzierung um bis zu 45 % zu verzeichnen. Die Geschwindigkeit im Sandstein sinkt somit nur um knapp 500 m/s ab, beim Quarzit handelt es sich um 2250 m/s.



**Abbildung 4-14: Quarzit A20 mit Impaktkrater. Oben: 3D Ansicht (links), y-z-Ebene (rechts). Unten: x-z-Ebene (links), x-y-Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt.**

In Abbildung 4-15 wird ein Tuff-Probekörper nach dem Impaktexperiment betrachtet. Die Schädigungszone ist hier nur sehr schwach erkennbar und liegt wie schon bei dem Sandstein und dem Quarzit oben im Bild (hohe x-Werte). Die sichtbare Kraterstruktur im Tuff besitzt einen Durchmesser von circa 4 cm in y- und z-Richtung und weist eine Tiefe von 2 cm auf. Die relativ große Tiefe hängt mit einem bei dem Impakt entstandenen Penetrationspfad zusammen. Dies bedeutet, der Krater zeigt eine Trichterform mit einer flachen Kraterstruktur und einen senkrecht eindringenden Pfad mit etwa 2 mm bis 3 mm Durchmesser. Der nicht geschädigte Tuff hat eine Geschwindigkeitsvariation von gut 9 %. Bei dem Probekörper mit Krater liegt die Variation der Geschwindigkeit im Bereich von 11 %. Dies ist kein großer Unterschied. Dennoch kann im Bereich des Kraters eine leichte Geschwindigkeitsreduzierung (Abbildung 4-15) ausgemacht werden. Die radiale Ausdehnung dieser Schädigungszone (gut zu sehen in der x-y Ansicht) beträgt in y- und z-Richtung 2 cm bis 2,5 cm und zeigt eine Tiefe von ebenfalls nur 2 cm. Damit ist die gefundene Schädigungszone im Größenbereich der Kraterstruktur. Wie schon bei dem Referenzprobekörper (Abbildung 4-12 (unten)) ist wieder deutlich die erhöhte Geschwindigkeit im Bereich niedriger Werte in z-Richtung zu sehen, obwohl es sich hier um einen anderen Probekörper aus dem gleichen Material handelt.



**Abbildung 4-15: Tuff A25 mit Impaktkrater. Oben: 3D Ansicht (links), y-z-Ebene (rechts). Unten: x-z-Ebene (links), x-y-Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt.**

Das bei Tuff relativ schlecht zu erkennende Ergebnis ist auf zwei verschiedene Ursachen zurückzuführen. Der Penetrationspfad hat einen Durchmesser von einigen Millimetern. Das bedeutet, dass er im Größenbereich der enthaltenen Körnung ist (Vergleich Kapitel 1.2.2). Der Tuff zeigt eine sehr heterogene Struktur. Sind die Strukturen im Größenbereich der Heterogenität, so kann diese nicht dargestellt werden. Generell können größere Strukturen (Risse oder Penetrationspfade) nicht so gut gefunden werden wie mehrere kleine Risse. Eine zweite Ursache ist, dass die Schädigungszone wahrscheinlich deutlich kleiner sein wird als bei Sandstein und Quarzit. Dies liegt an der Dichte bzw. an der Porosität des Materials. Der Tuff hat eine sehr hohe Porosität von circa 43 % (Kapitel 1.2.2). Kommt es zum Aufprall des Projektils, kann dieses nahezu ungehindert in das poröse Material eindringen. Es entsteht der Penetrationspfad. Gleichzeitig werden in dem Material geringere Spannungen aufgebaut als bei Sandstein- und Quarzit-Probekörpern. Die Energie wird durch die enthaltenen Luftporen gedämpft und nicht in die Gesteinsmatrix weitergeleitet. Daher werden sich weniger Risse in das Innere des Gesteins ausweiten.

Die minimale Kompressionswellengeschwindigkeit bei den drei Materialien mit Impaktkrater beträgt für den Sandstein 2450 m/s, für den Quarzit 2750 m/s und für den

Tuff 1870 m/s. Die Minimalgeschwindigkeiten aller Probekörper mit Impakt befinden sich direkt im Bereich des Kraters. Dort ist kein Gestein mehr vorhanden, stattdessen ist dort Luft. Luft hat eine Kompressionswellengeschwindigkeit von circa 344 m/s bei 20 °C Umgebungstemperatur (Kuchling [1980]). Die Kombination aus Messungen durch Gestein und Luft führen daher zu einer enorm geringen Geschwindigkeit. Für die UST wurde nie im Bereich des Kraters gemessen, damit dieser nicht geschädigt wird.

Die Tatsache, dass keine Messung im Krater durchgeführt wurde, führt zu einem bisher nicht angesprochenen Artefakt in der Ergebnisdarstellung. Alle Schädigungszonen weisen unterhalb des Kraters eine viereckige Struktur auf. Dieser Bereich liegt genau in der Zone, in der keine Messungen von oben durch den Krater stattgefunden haben. Innerhalb dieser Zone wurde die Berechnung der Geschwindigkeit somit nur auf Basis von zwei Messungen durchgeführt, womit durch die starke Vereinfachung eine eckige Darstellung der Geschwindigkeit entsteht, der Kreis (Kraterbereich) wird entartet und als Viereck dargestellt.

Weitere UST-Ergebnisse sind in Anhang IV dargestellt.

### **4.3 Analyse der Wellenausbreitung (mittels SEA und UST)**

Zur Rekonstruktion und für das Verständnis von der Entstehung der Rissmuster unterhalb des Kraters, aber auch der Kraterbildung an sich, ist das Wissen über die Ausbreitung der elastischen Wellen innerhalb der Probekörper von großer Bedeutung. Diese Erkenntnis ist auch für die numerische Berechnung der Kraterbildung von Interesse. In Kapitel 5 wird deshalb noch einmal ein Vergleich zu numerischen Daten gezeigt.

Ein Diskussionspunkt bei der Wellenausbreitung ist die Kenntnis über eine vorhandene Stoßwelle in der frühen Phase der Wellenausbreitung (Güldemeister et al. [2013a]). Die Stoßwelle ist verantwortlich für bestimmte Umwandlungsprozesse im Kraterbereich und abhängig von der Porosität des Materials. Allerdings wird vermutet, dass die Stoßwelle relativ schnell von der Kompressionswelle des Impaktes überholt wird. In diesem Kapitel werden die Laufzeitkurven betrachtet. Über die Laufzeitkurven können Vermutungen über eine eventuell noch zu registrierende Stoßwelle angestellt werden. Ein weiterer Punkt, der hier betrachtet wird, ist das Verhalten der Wellenausbreitung in geschichtetem Material. Der Sandstein und der Quarzit haben beide eine Schichtung, die auch mit den Ultraschall-Durchschallungsmessungen nachgewiesen worden ist (siehe Tabelle 1-1 (S. 15) und Kapitel 4.2). Hier liegt die Vermutung nahe, dass sich die Wellenausbreitung nicht mehr exakt kugelförmig, sondern elliptisch ausbreitet. In der Ergebnisdarstellung werden die Laufzeitkurven aus der Schallemissionsanalyse (SEA) mit den

Laufzeitkurven, die aus den Daten der Ultraschall-Tomographie (UST) von Probekörpern ohne Impaktkrater ermittelt worden sind, verglichen.

Mit der UST wurden teilweise detaillierte Daten im Zentimeterbereich zur Kompressionswellengeschwindigkeit bei ungeschädigten Probekörpern (s Kapitel 3.2.2 und 4.2) gesammelt. Über die gemessene Wellengeschwindigkeit und dem bekannten Abstand zu den Sensoren kann die Wellenausbreitung dargestellt werden. Dabei wurde auch die Richtungsabhängigkeit der Wellengeschwindigkeit beachtet und somit für jeden Sensor eine charakteristische Laufzeit aus den gemessenen Geschwindigkeiten ermittelt. Die so erhaltenen Laufzeiten sollten mit denen durch die SEA gemessenen Laufzeiten korrelieren. Für die hier gezeigten Wellengeschwindigkeiten wurde für die Laufzeitberechnung der Abstand zwischen Sensor und Mittelpunkt des Kraters projiziert auf die Oberfläche verwendet ( $x = 20 \text{ cm}$ ). Da es sich bei den Probekörpern um Naturgestein handelt, müssen alle Probekörper unabhängig voneinander betrachtet werden. Schon die USTMessungen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten bei gleichen Materialien gezeigt. Im Folgenden wird für jedes Material nur ein Probekörper mit 20 cm Kantenlänge betrachtet. Zusätzlich wird das Ergebnis für einen Sandstein mit 50 cm Kantenlänge gezeigt, das für spätere Betrachtungen in Kapitel 5 benötigt wird. Weitere Ergebnisse für die Messungen mit der SEA sind im Anhang VI aufgeführt.

In Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19 (gesammelt am Ende dieses Abschnittes) werden die Wellenausbreitungen in den verschiedenen Probekörpern dargestellt. Für die vier einzelnen Blöcke werden jeweils die Ergebnisse aus der UST und die Ergebnisse aus der SEA miteinander verglichen.

Bei der Auswertung der Diagramme muss beachtet werden, dass für die SEA-Messungen der zeitliche Nullpunkt nicht bekannt ist. Dagegen wird bei der UST der Quellzeitpunkt mit gemessen, sodass die wahre Laufzeit geplottet werden kann. Bei der SEA wird lediglich der Laufzeitunterschied zwischen den Sensoren dargestellt. Daher wird dem Sensor, bei dem die Welle als erstes eintrifft, der Zeitpunkt null zugeordnet. Da die Geschwindigkeit letztlich aus der Steigung der Laufzeitdifferenzen berechnet wird, ist dieser Unterschied für diese Betrachtung nicht relevant. In Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19 stellen die Vierecke (gemessen mit UST) bzw. Kreise (gemessen mit SEA) jeweils einen Sensor dar. Der Abstand vom Sensor zum Impaktort wird über der gemessenen Laufzeit aufgetragen. Der Verlauf der Ausgleichsgeraden ist näherungsweise linear. Mit der Steigung der Geraden wird die Geschwindigkeit der Kompressionswelle berechnet. Die genauen Werte der Wellengeschwindigkeiten, die aus den Steigungen berechnet wurden, sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Die Werte werden dort bis auf die Einerstelle genau angegeben, da der Fehler sich in dieser Größenordnung bewegt. Die Abbildungen mit der Wellenausbreitung enthalten neben der Ausgleichsgeraden auch eine Berechnung

der 95 %-Konfidenzintervalle (Vertrauensbereiche). Diese Intervalle sagen aus, dass die gemessenen Werte mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit innerhalb der eingezeichneten Intervalle liegen. Alle Materialien zeigen relativ schmale Intervalle, was auf eine gute Datenqualität hinweist. Die Annahme, dass sich die Welle wegen der Materialschichtung elliptisch durch den Probekörper ausbreitet, scheint somit falsch zu sein. Der lineare Zusammenhang zwischen Abstand und Laufzeit deutet eher auf eine kugelförmige Ausbreitung der Welle hin. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Stoßwelle bereits von der Kompressionswelle eingeholt worden ist, bevor sie den ersten Sensor erreicht. Der einzige Hinweis, der eventuell auf eine Stoßwelle hindeutet, ist, dass bei den Daten der SEA am ersten Sensor die Laufzeit für alle hier gezeigten Probekörper ein wenig von der Ausgleichsgeraden abweicht. Der Punkt für den ersten Sensor liegt immer etwas oberhalb der Ausgleichsgeraden. Generell zeigen die Ergebnisse der SEA eine höhere Ungenauigkeit in den Messdaten. Diese Ungenauigkeit, aber auch die Abweichung der Messwerte von der Ausgleichsgeraden am ersten Sensor, kann somit auch durch ungenaue Abmessungen der Sensorpositionen, durch eine Ungenauigkeit in der Ersteinsatzbestimmung oder auch durch die große Messfläche der Sensoren ( $\varnothing = 12,5$  mm) entstehen.

**Tabelle 4-3: Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen mit UST (vor dem Experiment) und SEA (während des Experiments) für vier verschiedene Probekörper mit drei verschiedenen Materialien, berechnet aus den Gradienten der Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19.**

Material	Kompressionswellengeschwindigkeit aus UST [m/s]	Kompressionswellengeschwindigkeit aus SEA [m/s]
Sandstein (20 cm, A3)	$2373 \pm 2$	$2581 \pm 55$
Quarzit (20 cm, A20)	$5062 \pm 74$	$4964 \pm 72$
Tuff (20 cm, A24)	$2070 \pm 6$	$2291 \pm 72$
Sandstein (50 cm, D3)	$2802 \pm 10$	$3145 \pm 75$

Bei näherer Betrachtung der Wellengeschwindigkeiten fällt auf, dass die Ergebnisse aus den UST-Messungen für den Sandstein und den Tuff niedrigere Werte als bei der SEA ergeben. Lediglich die Ergebnisse der Quarzit-Probekörper stimmen gut überein. Diese Abweichungen können verschiedene Ursachen haben. Die Messmethoden wurden unter anderen Rahmenbedingungen durchgeführt. Die UST wurde bei „normalen“ Raum- und Druckverhältnissen vorgenommen, bei der SEA waren die Probekörper in der Targetkammer eingeschlossen, in der ein Unterdruck von 300 mbar bis zu 5 mbar erzeugt wurde. Ein weiterer Punkt ist die abweichende Messtechnik und Sensorik. Bei der SEA haben die Sensoren eine kreisförmige Koppelfläche mit bis zu 12,5 mm im Durchmesser (V103 Sensoren), bei der UST beträgt die Koppelfläche 2,5 mm im Durchmesser (UPED-UPGD Sensoren).

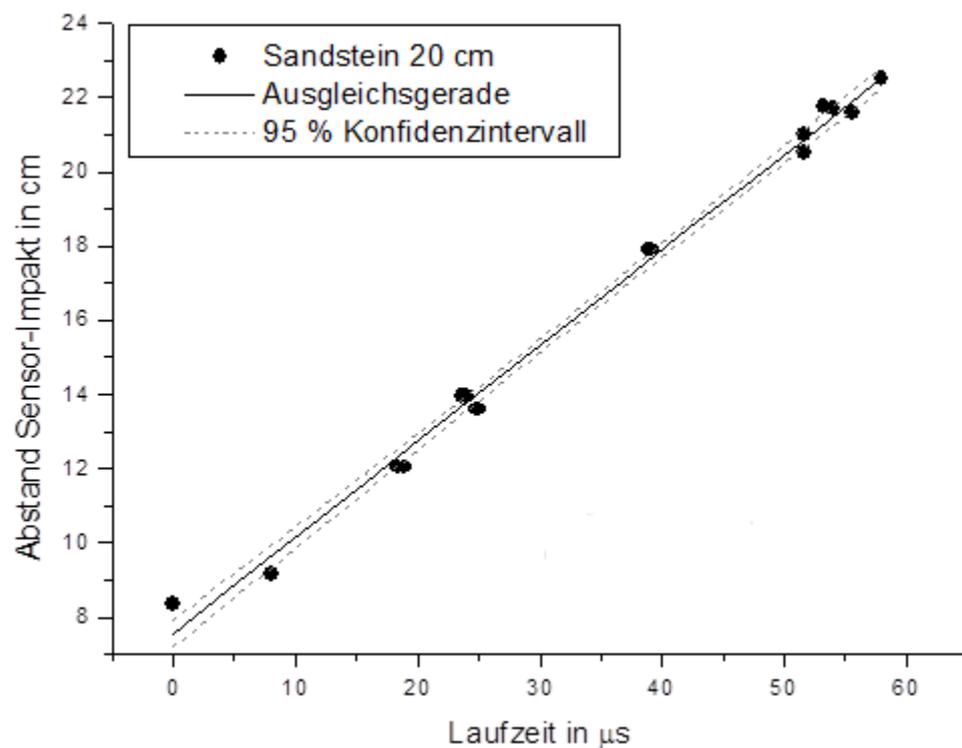
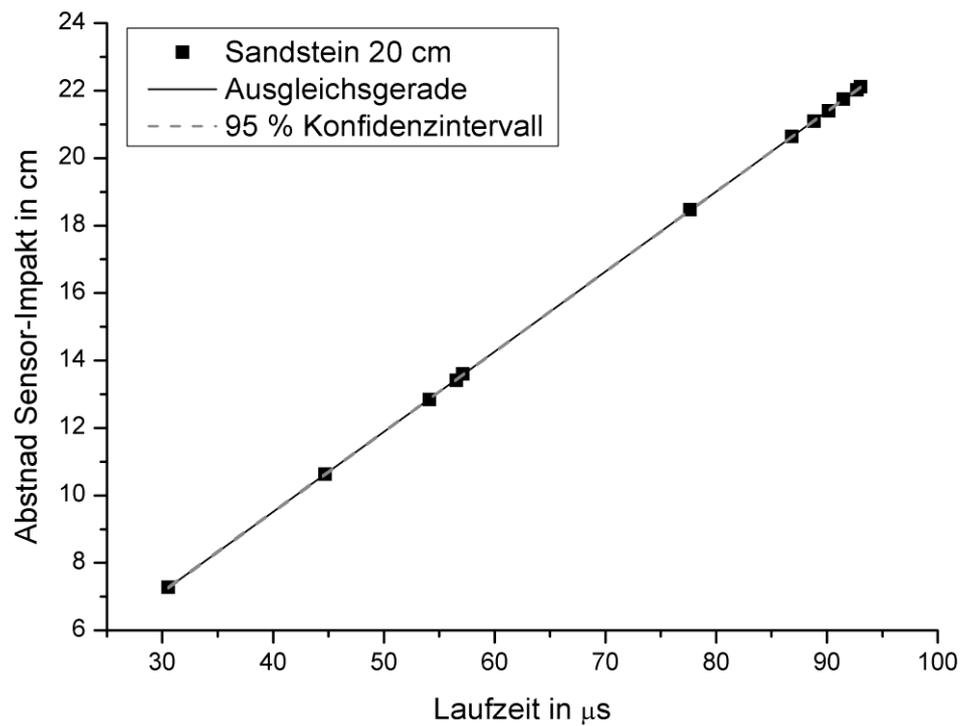


Abbildung 4-16: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Sandstein mit 20 cm Kantenlänge (A3). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktort über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca.  $v = 2400$  m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca.  $v = 2600$  m/s).

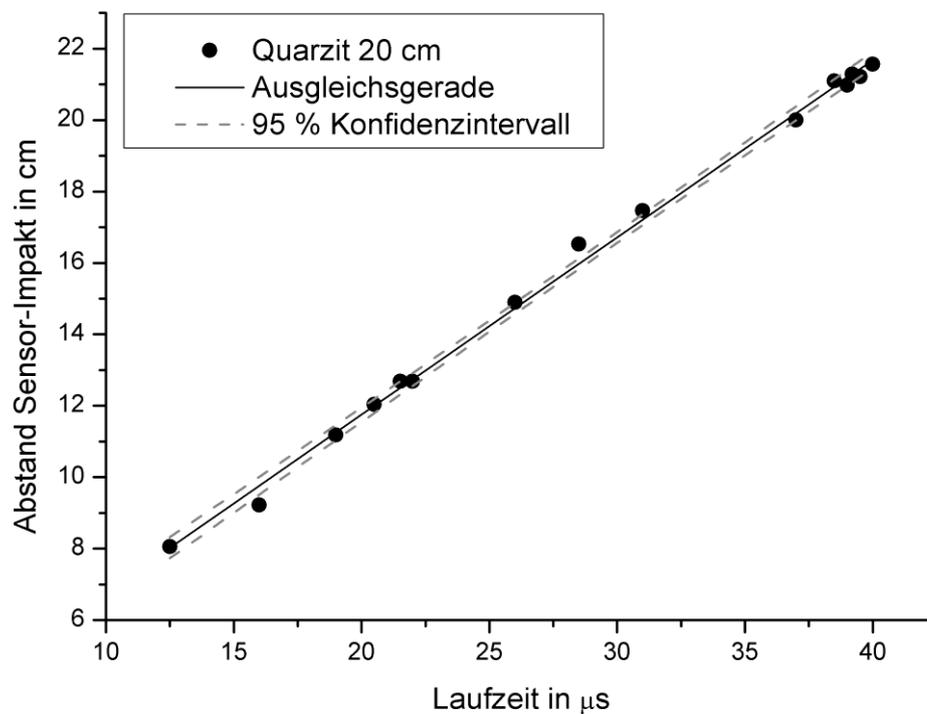
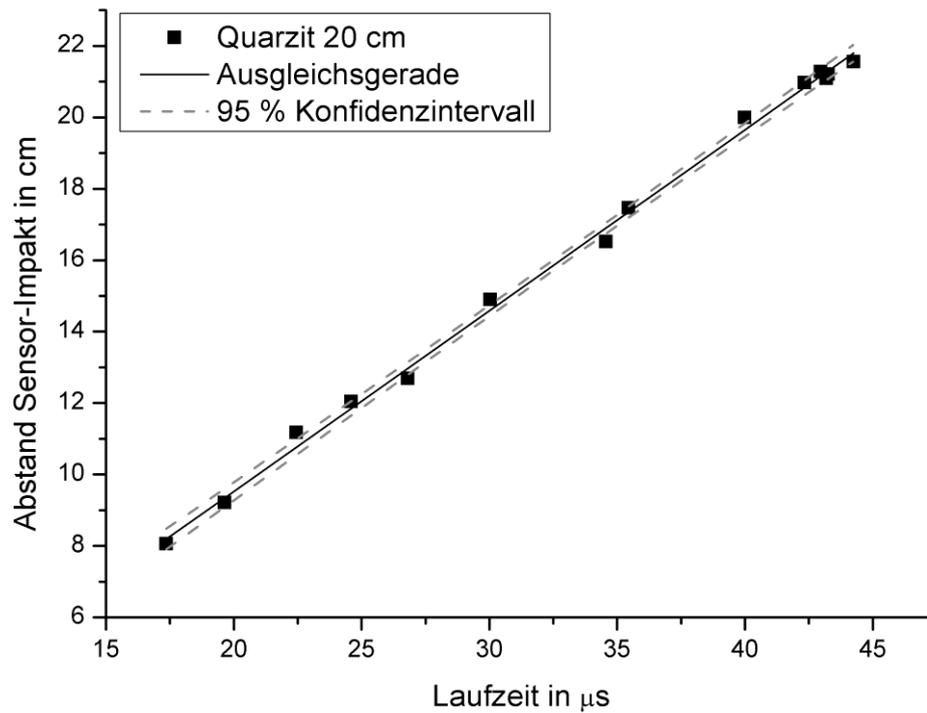


Abbildung 4-17: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Quarzit mit 20 cm Kantenlänge (A20). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca.  $v = 5050$  m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca.  $v = 5000$  m/s).

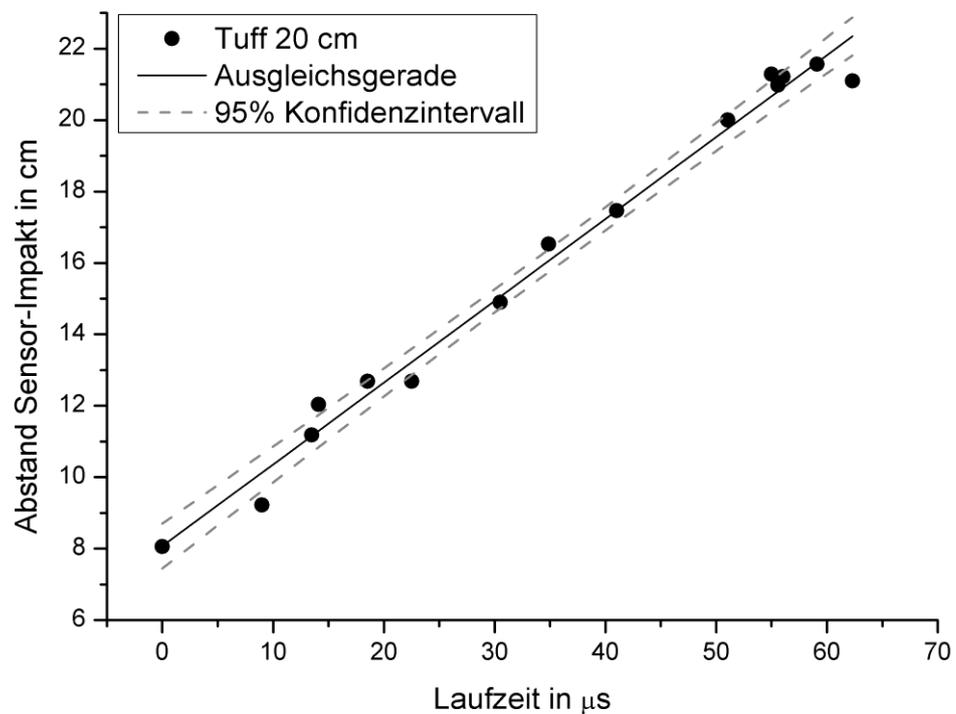
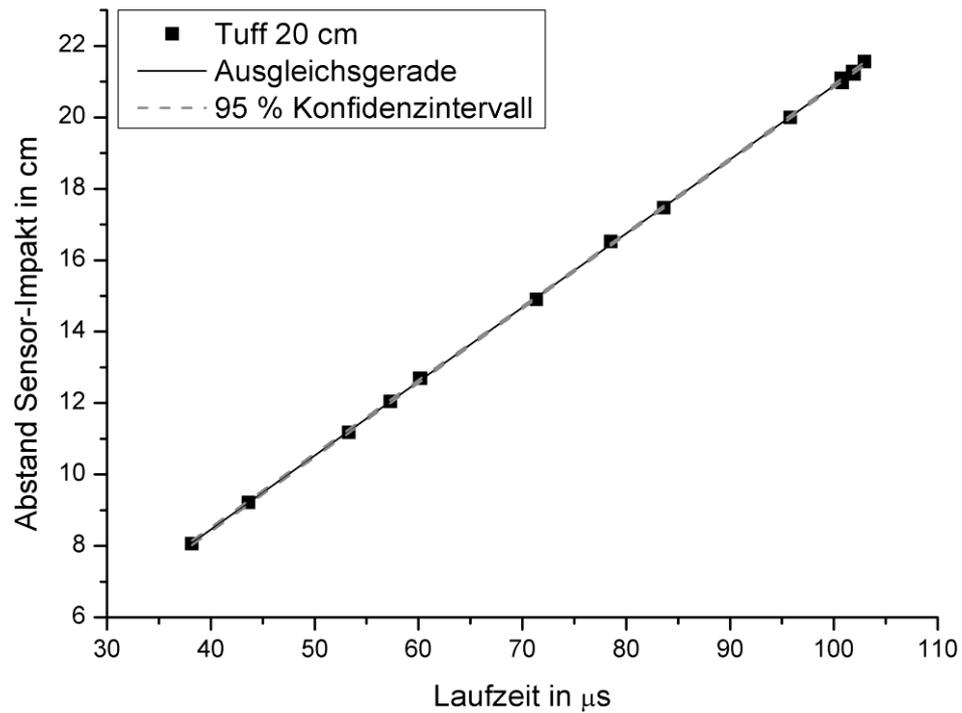


Abbildung 4-18: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Tuff mit 20 cm Kantenlänge (A24). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca.  $v = 2100$  m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca.  $v = 2300$  m/s).

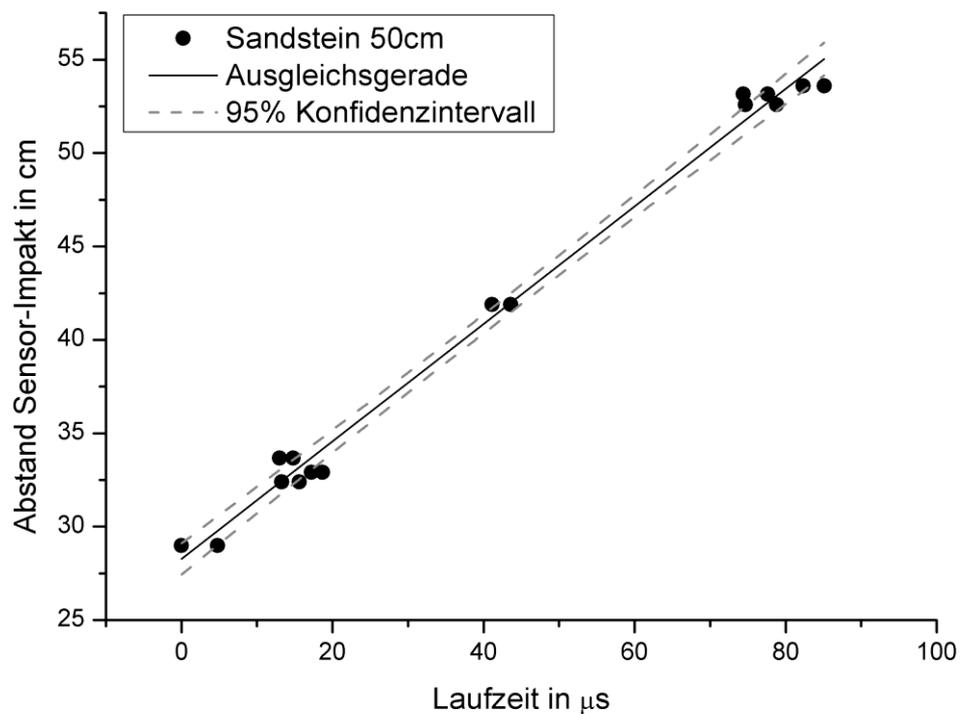
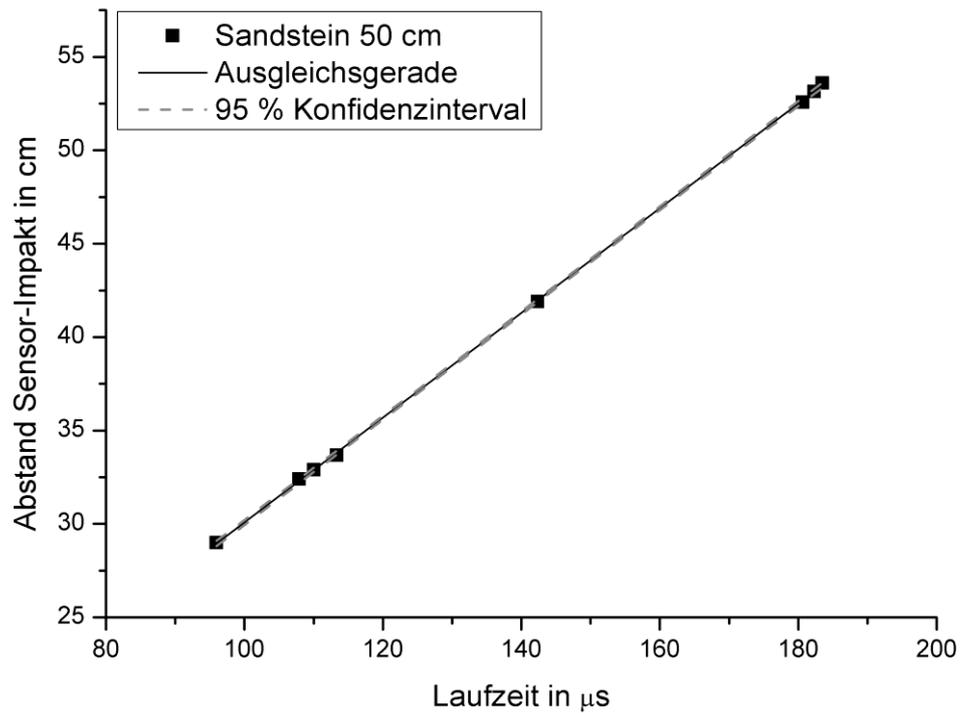
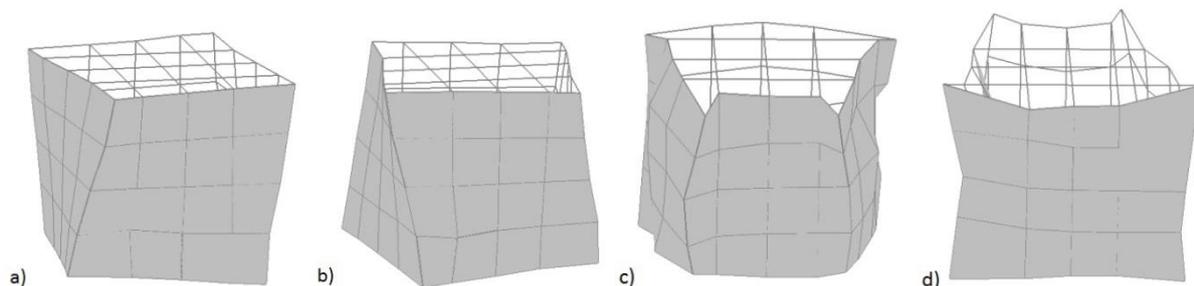


Abbildung 4-19: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Sandstein mit 50 cm Kantenlänge (D3). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca.  $v = 2800$  m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca.  $v = 3150$  m/s).

#### 4.4 Modalanalyse zur Erfassung der elastischen Parameter

Die Modalanalyse wird als Messmethode herangezogen, um das elastische Verhalten von Probekörpern zu untersuchen. Dabei steht vor allem das E-Modul im Vordergrund, das eine gute Aussage über das elastische Verhalten eines Materials gibt. Durch eine Schädigung des Probekörpers wird das elastische Verhalten eines Materials beeinträchtigt. Vergleichende Messungen vor und nach der Schädigung an einem Probekörper können somit Aussagen über den Grad der Schädigung unterstützen. Die Modalanalyse dient dabei der Erfassung einer globalen Schädigung. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse nur zeigen, ob eine Schädigung vorhanden ist, aber nicht wo oder in welchem geometrischen Ausmaß.

Für die Impaktprobekörper wurden Messungen vor und nach den Impaktexperimenten durchgeführt und die gemessenen Frequenzen bzw. die aus den Frequenzen berechneten elastischen Module miteinander verglichen. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 näher beschrieben, gibt es die Möglichkeit der Modalanalyse und der Schwingungsanalyse. Für die hier verwendeten Probekörper wurde die Schwingungsanalyse verwendet, da die Geometrie die Schwingungen stark beeinflusst hat und eine komplette Modalanalyse keine eindeutigen Ergebnisse erbrachte. In Moser et al. [2013] werden Ergebnisse einer Modalanalyse mit einem Messraster von 5 cm gezeigt (Abbildung 4-20). In den Schwingungsbildern sind die Schwingungsmoden noch gut zu erkennen. Die Frequenzspitzen der einzelnen Schwingungsmoden (Abbildung 4-21) sind jedoch sehr flach und breit. Nur die Frequenz der Torsionalschwingung kann verhältnismäßig gut identifiziert werden. Für die Longitudinalschwingung kann trotz einer kompletten Modalanalyse kein Schwingungsbild erzeugt werden.



**Abbildung 4-20: Schwingungsbilder der Modalanalyse an einem ungeschädigten Sandstein mit 20 cm Kantenlänge. a) und b) zeigen die Maximalauslenkungen einer Torsionalschwingung. c) und d) zeigen die Maximalauslenkungen der Flexurschwingung (Moser et al. [2013]).**

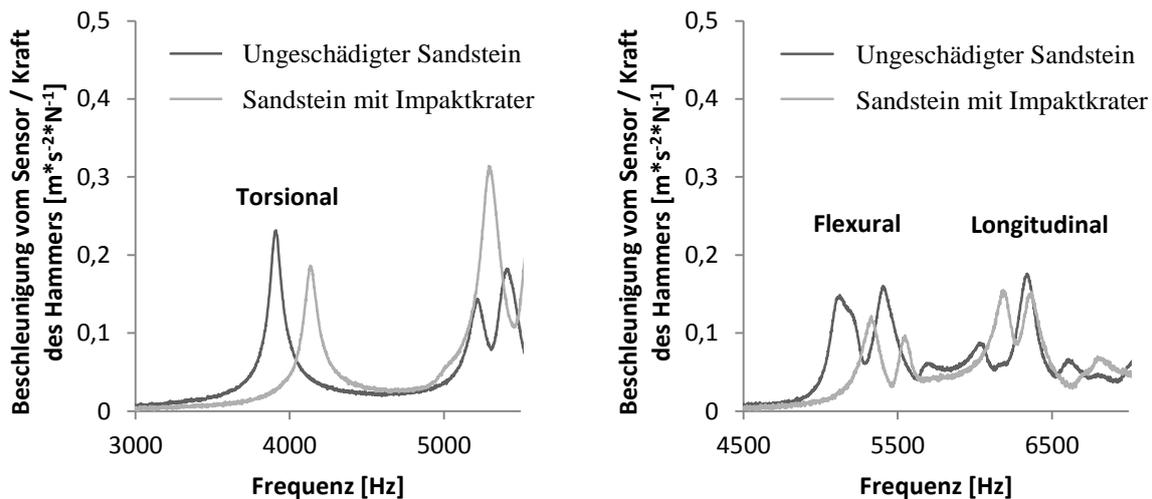
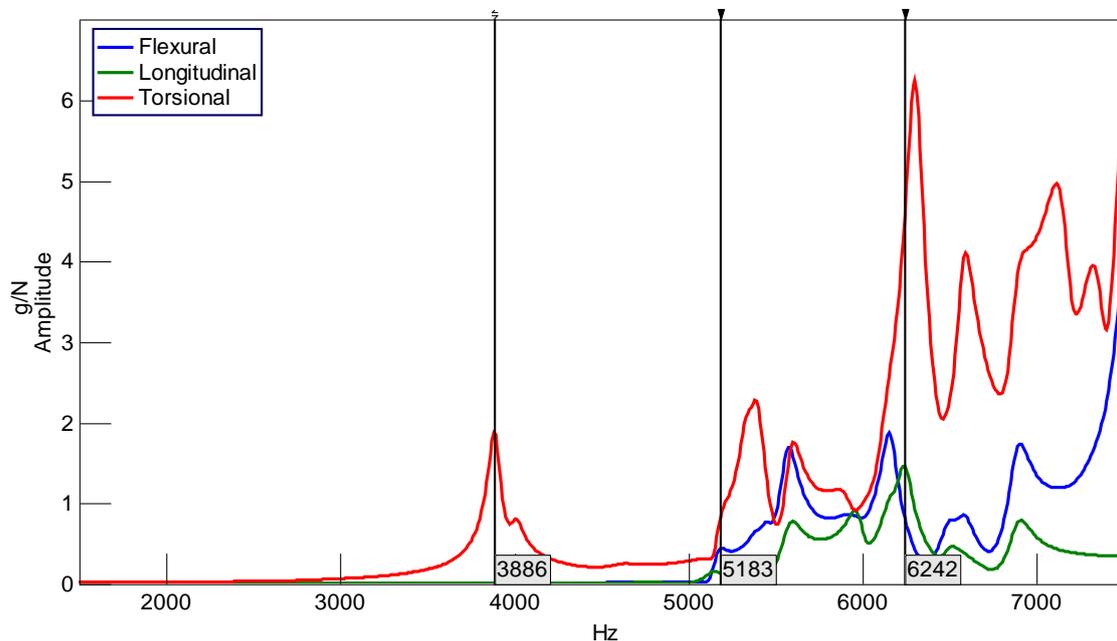


Abbildung 4-21: Frequenzdarstellung der Eigenmoden für einen Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge mit (dunkelgrau) und ohne (hellgrau) Schädigung (modifiziert nach Moser et al. [2013]).

Im Folgenden werden daher die Frequenzmessungen nur in Form der Schwingungsanalyse durchgeführt. Die drei wichtigsten Schwingungsmoden werden zunächst jeweils für einen Sandstein, einen Quarzit und einen Tuff-Probekörper im ungeschädigten Zustand gezeigt. Für den Sandstein wurden zusätzlich numerische Berechnungen der Schwingungsmoden mit dem Programm *Ansys* angefertigt. Mit den numerischen Schwingungsformen und den berechneten Frequenzen können die gemessenen Frequenzen der Schwingungsanalyse verglichen und verifiziert werden. Weiter unten im Text werden die Ergebnisse der vergleichbaren Messungen an den geschädigten Probekörpern gezeigt. Hier können keine numerischen Modelle berechnet werden, da die Schädigungszone nicht in das Programm implementiert werden kann. Zusätzlich wurden Messungen an einem Sandsteinprisma durchgeführt, um die Qualität der Messdaten besser einschätzen zu können. Hier wird deutlich, dass die Geometrie eine entscheidende Rolle für die Messung spielt. Im Anhang VI werden einige Messungen an verschiedenen geometrischen Formen gezeigt, die einen Eindruck über den Geometriefaktor geben. Für die Schwingungsanalyse wird lediglich ein Probekörper pro Material genauer analysiert. Diese drei Beispiele sollen eine Aussage über die Qualität der Messungen aufzeigen. Aufgrund der nicht überzeugenden Datenqualität bei den Gesteinsblöcken wurde von der Analyse weiterer Probekörper abgesehen.

In Abbildung 4-22 werden die Frequenzspektren für drei Messungen der Schwingungsanalyse an einem ungeschädigten Sandstein-Probekörper gezeigt. Auf der Abszisse werden die gemessenen Frequenzen in Herz (Hz) und auf der Ordinate die Amplitude in ‚Beschleunigung durch Kraft‘ (g/N) angegeben. Die Einheit der Ordinate entsteht, da hier die Kraft des Hammers in die Auswertung der Sensorbeschleunigung mit einfließt, beziehungsweise abgezogen wird.  $g$  wird hier als Beschleunigung des

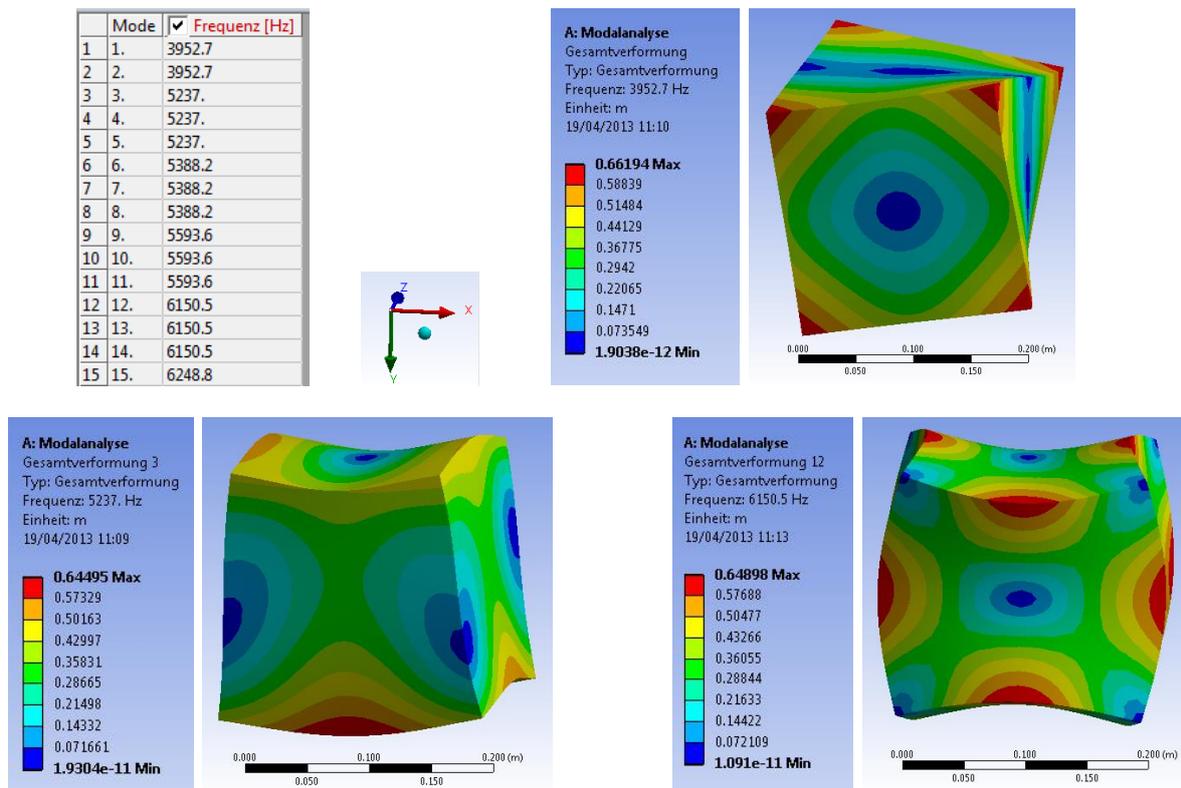
Sensors bezeichnet und  $N$  die Kraft des Hammers. Die Beschleunigung wird üblicherweise mit  $a$  benannt, hierbei wird sich jedoch an dem Messprogramm orientiert. Die blaue Linie stellt das Frequenzspektrum für die Flexuralschwingung dar, die grüne Linie zeigt die Longitudinal- und die rote Linie die Torsionalschwingung. Die Achsenbeschriftungen und die Farbcodierungen werden in allen noch folgenden Frequenzdarstellungen beibehalten. Die drei Schwingungsmoden wurden gezielt angeregt, sodass die Interpretation der Daten eindeutiger Ergebnisse erzielen sollte. Alle Daten an den Würfelprobekörpern zeigen ein relativ schlechtes ‚Signal zu Rausch‘ (Noise) – Verhältnis (S/N-Verhältnis). Die Frequenzspitzen und somit die Energie der Schwingungen sind sehr schwach und teilweise nicht eindeutig zu identifizieren. Das sogenannte Rauschen in der Messung ist im Verhältnis zu dem eigentlichen Signal sehr stark und beeinflusst so das Messergebnis. Alle Messungen wurden dreimal wiederholt. Jede Messung bestand wiederum aus fünf Wiederholungen, die zu einer Messung gemittelt worden sind. Ein Frequenzspektrum ist damit der gemittelte Wert aus fünf einzelnen Messungen. Zur besseren Übersicht wird jeweils nur ein Messergebnis pro Schwingungsmode für jedes Material gezeigt. Die relativ schlechte Qualität wird noch deutlicher, wenn die Daten der ursprünglichen Probekörper den Daten des Sandsteinprismas gegenübergestellt werden.



**Abbildung 4-22: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines ungeschädigten Sandstein-Probekörpers. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).**

In Abbildung 4-23 werden zunächst die Ergebnisse der numerischen Betrachtung mit *Ansys* gezeigt. Insgesamt werden drei verschiedene Schwingungsmoden dargestellt, die eine eindeutige Interpretation der Schwingungsmoden zulassen. Oben links werden

alle Frequenzen aufgeführt, die einer Schwingungsmoden zugeordnet werden konnten. Dies sind zum einen die Grundschwingungsformen und zum anderen auch einige Oberschwingungen. Oben in der Mitte ist zur Orientierung das Koordinatensystem dargestellt. Die drei Schwingungsbilder sind folgendermaßen zu deuten: Die Farbskala links neben den Bildern zeigt die Intensität der Auslenkung an. Dabei ist rot die maximale Auslenkung und blau die minimale Auslenkung, die gegen null geht. Oberhalb der Farbskala wird unter anderem die Frequenz der aktuellen Schwingung angezeigt.

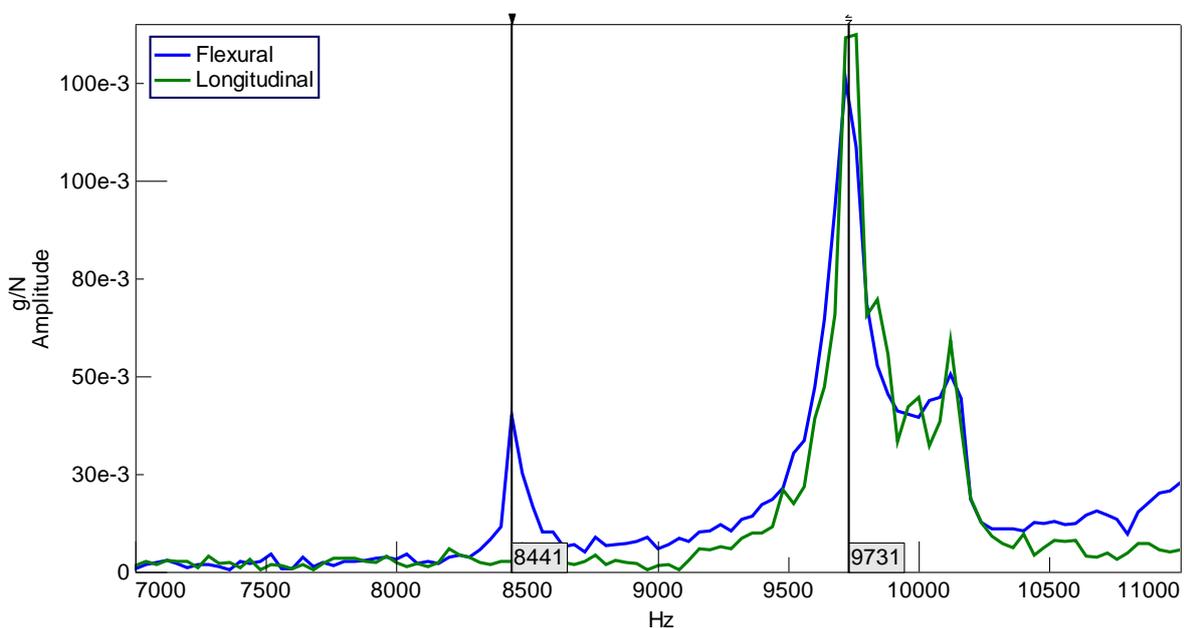


**Abbildung 4-23: Modellerte Modalanalyse eines Quaders mit den Eigenschaften eines Seeberger Sandsteins. Oben links werden die gefundenen Schwingungsmoden mit den dazugehörigen Frequenzen gezeigt, daneben ist das Koordinatenkreuz mit der Orientierung der Quader. Die Abbildungen zeigen drei verschiedene Schwingungsmoden. Jeweils links ist die Farbskala, die die Intensität der Auslenkung beschreibt, wobei rot die maximale Dehnung und blau die minimale Dehnung definiert.**

Für den ungeschädigten Sandstein (Abbildung 4-22) ist als einzige Schwingungsmoden die Torsionalschwingung bei etwa 3900 Hz deutlich zu identifizieren. Auch bei der numerischen Betrachtung wird diese Schwingungsmoden gefunden und zeigt das typische Verhalten einer torsionalen Schwingung (Abbildung 4-23 oben rechts). Die Flexuralschwingung ist nur mit Hilfe der numerischen Betrachtung über Ansys (Abbildung 4-23 unten links) bei etwa 5200 Hz in Abbildung 4-22 zu finden. Die numerische Betrachtung lässt keinen Zweifel daran, dass es sich hier um eine typische flexurale Schwingung der ersten Form handelt. Die Longitudinalschwingung hingegen

ist nicht eindeutig zu identifizieren. Mit der numerischen Betrachtung kann ebenfalls kein Schwingungsbild erzeugt werden, das einer Longitudinalschwingung entspricht. Die Longitudinalschwingung ist in Abbildung 4-22 bei etwa 6250 Hz zu vermuten. Dort ist eine Frequenzspitze erkennbar. Allerdings sind auch schon bei kleineren Frequenzen einige Frequenzspitzen sichtbar, sodass eine eindeutige Aussage nicht möglich ist. Bei 6150 Hz zeigt die numerische Betrachtung (Abbildung 4-23 unten, rechts) eine flexurale Oberschwingung, die auch als Frequenzspitze in dem Frequenzspektrum, dicht neben der Markierung für die mutmaßliche Longitudinalschwingung, bei etwa 6300 Hz zu sehen ist. Diese Frequenzspitze wurde nicht markiert.

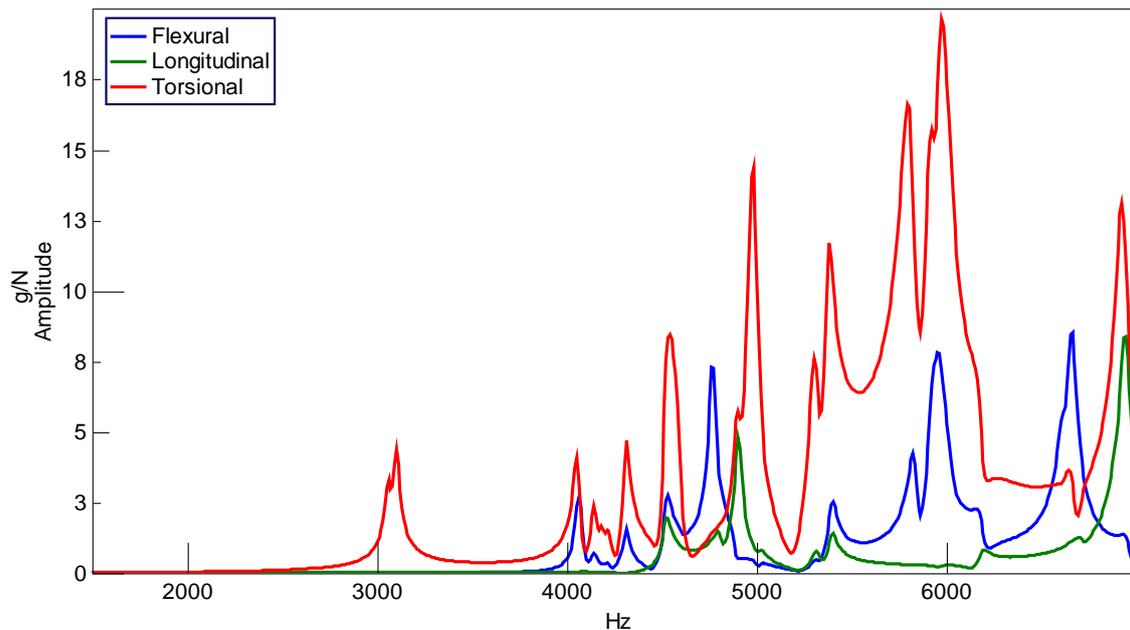
Die Frequenzbilder des Quarzit-Probekörpers in Abbildung 4-24 zeigen ein sehr schlechtes S/N-Verhältnis. Dies wird durch zwei Aspekte deutlich. Einerseits ist die Amplitudenhöhe sehr gering. Die Ordinate hat ihren Maximalwert bei 0,1 g/N. Andererseits ist die Linie stark gezackt. Ist das Rauschen eher gering, erhält das Frequenzbild eine glatte Linie. Für die Flexural- und die Longitudinalschwingung konnten hier Ergebnisse erzielt werden, die die Schwingungsfrequenzen von 8450 Hz und 9750 Hz vermuten lassen. Die Torsionalschwingung konnte in der Messung nicht identifiziert werden, daher wird die Messung hier nicht gezeigt.



**Abbildung 4-24:** Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines ungeschädigten Quarzit-Probekörpers. Hier wird nur die Flexural- (blau) und die Longitudinalschwingung (grün) gezeigt.

Für die Tuffprobe (Abbildung 4-25) konnte für alle drei Grundschwingungsformen ein Frequenzbild erstellt werden. In Abbildung 4-25 wurden die entsprechenden

Frequenzspitzen diesmal nicht markiert und beschriftet, um übersichtlicher zu bleiben. Allerdings ist die erste Spitze der Torsionalschwingung bei etwa 3100 Hz deutlich zu erkennen. Für die Flexuralschwingung wird die erste Frequenzspitze bei 4100 Hz identifiziert. Die entsprechende Spitze der Longitudinalschwingung ist, wie schon bei dem Sandstein, nicht eindeutig bestimmbar. Die entsprechende Frequenzspitze liegt vermutlich bei 4600 Hz oder bei 4900 Hz.

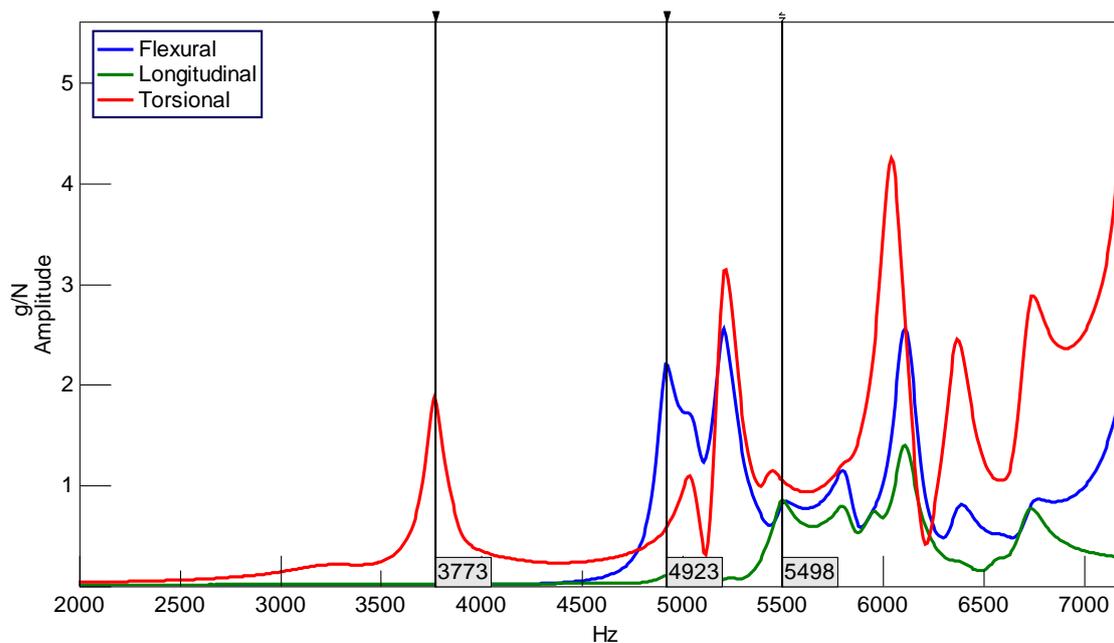


**Abbildung 4-25:** Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines ungeschädigten Tuff-Probekörpers. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).

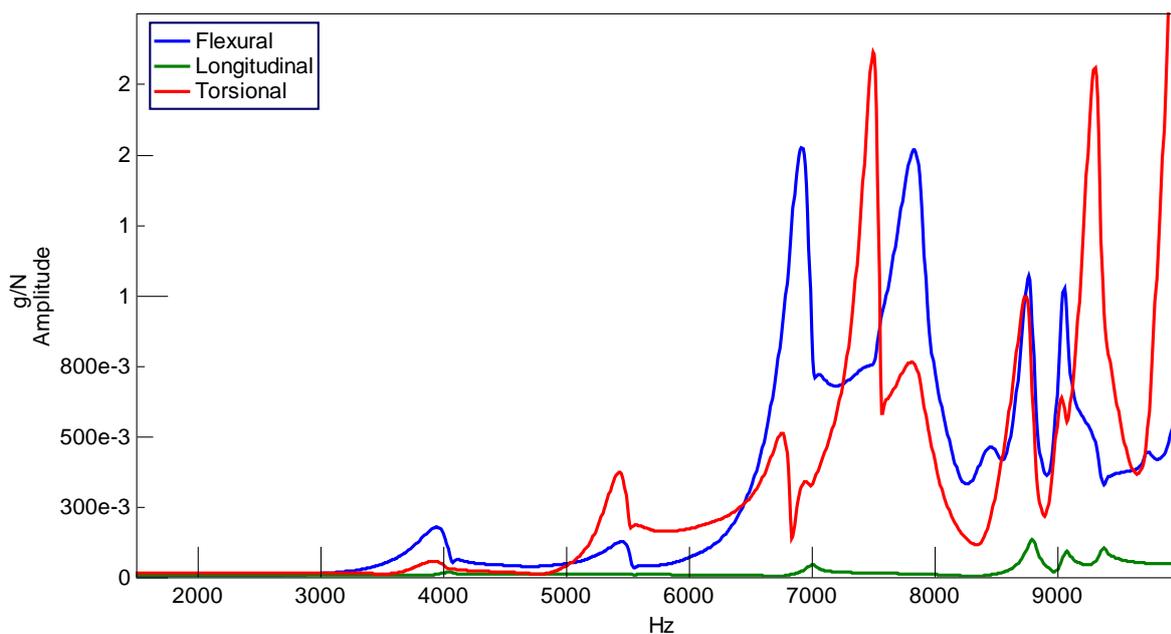
Die folgenden Abbildungen zeigen wieder die gleichen drei Materialien, diesmal jedoch mit einer Schädigung, die durch die Impaktexperimente entstanden ist. Die Schädigung befindet sich in Form eines Kraters mittig auf einer der sechs Oberflächen und einer nicht sichtbaren Schädigungszone unterhalb des Kraters. Für die hier dargestellten Ergebnisse befindet sich der Krater auf der nach oben zeigenden Oberfläche. Die gegenüberliegende Fläche ist die Auflagefläche für den Schaumstoff. Alle drei Messergebnisse zeigen zwar eine glattere Frequenzlinie (S/N-Verhältnis ist hoch), jedoch sind überall die Amplituden relativ gering. Nur bei dem Quarzit ist die Amplitude angestiegen und hat dadurch das S/N-Verhältnis zusätzlich verbessert.

Abbildung 4-26 zeigt die drei Frequenzlinien für einen geschädigten Sandstein. Deutlich zu identifizieren ist die Torsionalschwingung bei circa 3800 Hz. Die Flexuralschwingung wird bei etwa 4900 Hz vermutet. Die Frequenzspitze der Flexuralen zeigt eine Art Doppelspitze, die die Auswertung beeinträchtigt. Für die Longitudinalschwingung entsteht ein ähnliches Bild wie auch schon bei dem

ungeschädigten Sandstein, dort wird die Schwingung bei 6250 Hz vermutet. In Abbildung 4-26 wird die erste Spitze der Longitudinalschwingung bei 5500 Hz markiert. Aufschluss, welche der Frequenzspitzen als Grundmode der Longitudinalschwingung angenommen werden kann, gibt die Berechnung des elastischen Moduls. Die Berechnung wird im Anschluss an die Messergebnisse gezeigt.



**Abbildung 4-26:** Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines geschädigten Sandsteins. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).



**Abbildung 4-27:** Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines geschädigten Quarzits. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).

Wie auch schon bei dem ungeschädigten Quarzit ist die Auswertung in Abbildung 4-27 sehr vage. Auch bei dieser Messung kann die Torsionalschwingung nicht eindeutig identifiziert werden. Eventuell kann die kleine Erhöhung bei circa 4000 Hz oder bei 5300 Hz als Torsionalschwingung betrachtet werden. Im Vergleich mit dem ungeschädigten Quarzit kann für die Grundmode der Flexuralschwingung, die Frequenzspitze bei 6900 Hz als sehr wahrscheinlich angenommen werden. Allerdings können ebenfalls bei 4000 Hz und bei 5500 Hz zwei deutliche Erhöhungen in der Frequenzlinie ausgemacht werden, die eine eindeutige Aussage nicht zulassen. Die Frequenzlinie der Longitudinalschwingung zeigt wie auch schon bei dem ungeschädigten Quarzit eine sehr schwache Amplitude. Hier kann die Frequenzspitze bei 8800 Hz als Grundmode angenommen werden.

In Abbildung 4-28 werden die Ergebnisse des beschädigten Tuffs gezeigt. Hier kann die Torsionalschwingung wieder eindeutig bei circa 2900 Hz erkannt werden. Deutlich schwieriger ist die Benennung der Flexuralschwingung. Der unbeschädigte Tuff zeigte die Grundmode bei circa 4100 Hz an. Für den geschädigten Tuff kann vermutet werden, dass die Frequenzspitze bei 3900 Hz die Grundmode anzeigt. Auch die Longitudinalschwingung lässt sich nicht sehr gut bestimmen, hier ist die Frequenzspitze bei etwa 4600 Hz als Grundmode zu vermuten.

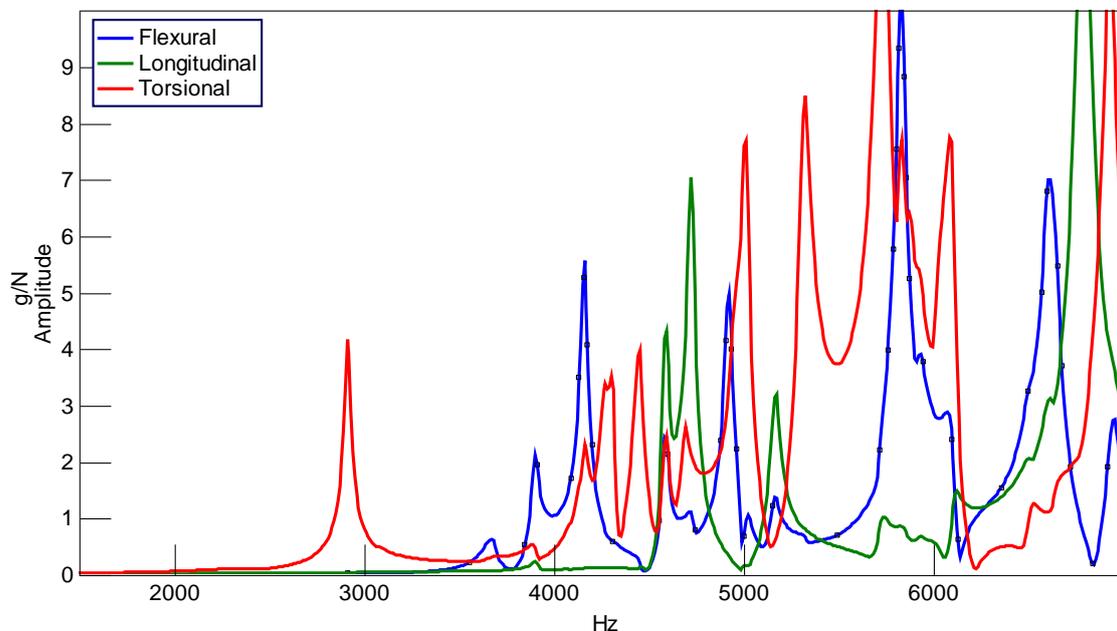
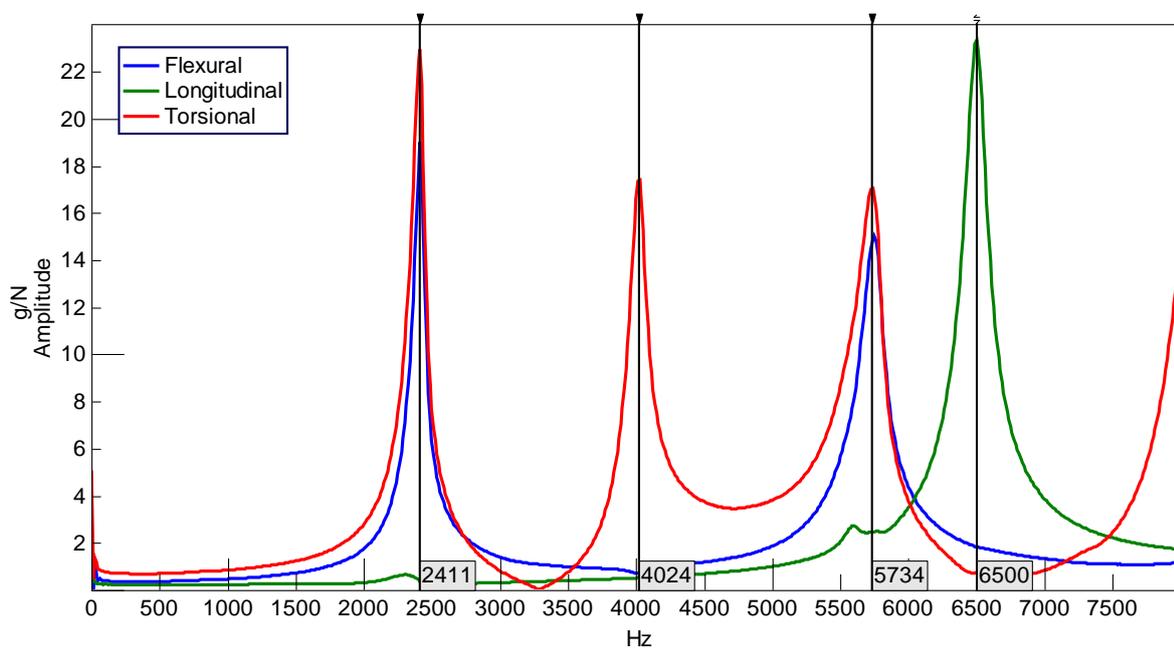


Abbildung 4-28: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines geschädigten Tuffs. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).

Die Frequenzmessungen der drei Grundschwingungsmoden an den Würfelproben haben gezeigt, dass die Longitudinalschwingung, ob mit oder ohne Schädigung, nur sehr schwer zu erfassen und zu bestimmen ist. Einzig die Torsionalschwingung konnte beim Sandstein und beim Tuff sehr gut identifiziert werden. Der Quarzit mit der größten Masse zeigt die geringsten Energien bei den Schwingungen, was sich auch in den kleinen Amplituden der Frequenzdarstellungen widerspiegelt. Durch die schwachen Schwingungen können nicht alle Schwingungsformen so erfasst werden, dass sie für eine Auswertung weiterzuverwenden sind.

Nachdem sich gezeigt hat, dass die Würfelproben eher ungeeignet für die Schwingungsanalyse sind (siehe auch Anhang VI), wurde zum Vergleich ein Sandsteinprisma zurechtgesägt. Das Prisma wurde genauso wie die Würfel einer Schwingungsanalyse unterzogen. Abbildung 4-29 zeigt die daraus entstandenen Ergebnisse. Als erstes fällt auf, dass die Amplituden beim Prisma viel höher sind und, dass das S/N-Verhältnis im Vergleich viel höher ausfällt. Die gute Qualität der Daten und die hohe Amplitude zeigen, dass die Dämpfung der Schwingung in dem Prisma sehr viel kleiner ist, als bei den Würfelproben (Vogel [1995]). Aufgrund der Abhängigkeit der Frequenz von der Geometrie stimmen die Frequenzen nicht mit denen der Würfelproben überein.



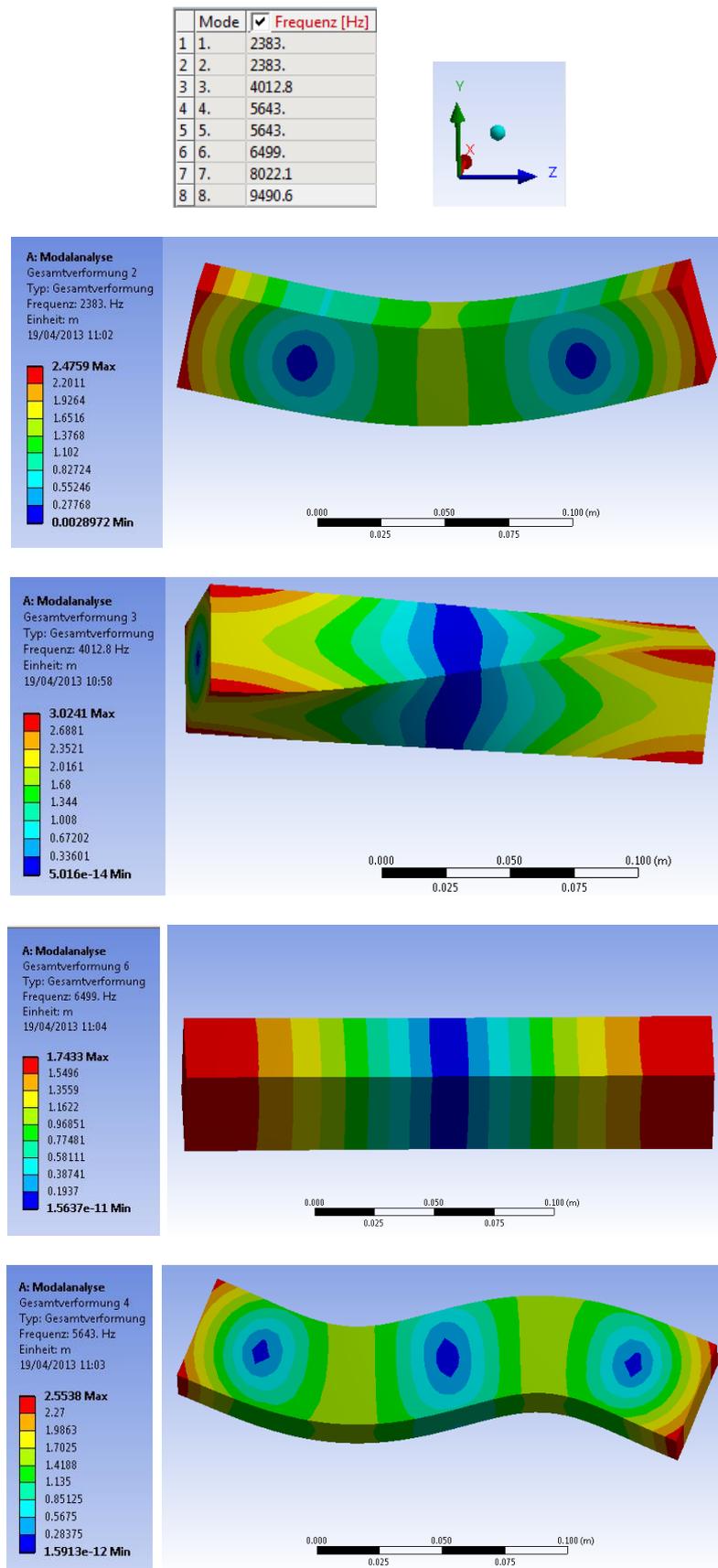
**Abbildung 4-29:** Ergebnis der Schwingungsanalyse eines Sandsteinprismas. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).

Vier Frequenzen fallen in Abbildung 4-29 besonders auf. Bei circa 2400 Hz zeigen die Messungen der Torsional- und die Flexuralschwingung eine Frequenzspitze. Die

Torsionalschwingung hat zusätzlich weitere Spitzen, die hier bei circa 4000 Hz und bei 5750 Hz abgelesen werden können. Die Flexuralschwingung zeigt ebenfalls eine zweite Frequenzspitze bei 5750 Hz. Einzig die Longitudinalschwingung ist eindeutig bei 6500 Hz abzulesen. Nun ist zu entscheiden, welche Frequenzspitze die Flexuralschwingung und welcher die Torsionalschwingung anzeigt. Aufklärung gibt hier die numerische Betrachtung des Prismas mit *Ansys* (Abbildung 4-30). Schaut man sich die Schwingungsbilder zu den gefundenen Frequenzen an, wird deutlich, dass die Frequenzspitze bei 2400 Hz die Flexuralschwingung anzeigt (Schwingungsbild oben) und die Frequenzspitze bei 4000 Hz die Torsionalschwingung (zweites Schwingungsbild). Dies scheint auch dadurch verdeutlicht, dass nur die Torsionale eine Spitze bei 4000 Hz anzeigt. Die Doppelung der Frequenzspitzen bei der Anregung der zwei verschiedenen Schwingungsmoden entsteht durch die Geometrie des Probekörpers. Wird bei einem Prisma die Torsionalschwingung angeregt, wird automatisch auch eine Flexuralschwingung erzeugt, die der Sensor ebenfalls registriert und in das Frequenzbild aufnimmt. Die Frequenzspitze bei 5750 Hz zeigt somit auch wieder eine Flexuralschwingung an, diesmal handelt es sich jedoch um eine Oberschwingung wie in Abbildung 4-30 (viertes Schwingungsbild) verdeutlicht wird.

Für das Prisma kann zusätzlich ein Schwingungsbild der Longitudinalschwingung erzeugt werden (Abbildung 4-30, drittes Schwingungsbild).

Die Geometrie ist für die Schwingungsanalyse entscheidend. Die Messungen an dem Prisma zeigen deutlich, dass das Messsystem durchaus sehr gute Ergebnisse liefert. Die Geometrie eines Würfels ist jedoch nicht geeignet, um alle Schwingungsmoden eindeutig anzuregen. Ein anfänglicher Gedanke war, dass die schlechten Ergebnisse mit dem Verhältnis von der Masse des Probekörpers zu dem Hammer bzw. aufgrund einer falsch gewählten Sensorik zusammenhängen oder, dass die Dämpfung durch die Auflage zu hoch ist. Jedoch haben Messungen an kleineren Würfeln gezeigt, dass die Geometrie das Problem darstellt. Die Frequenzspitzen sind genau wie bei den großen Proben schlecht zu identifizieren und haben nur geringe Amplitudenwerte. Die Messungen haben auch gezeigt, dass generell zu starke Symmetrien des Probekörpers die Messungen beeinträchtigen. So haben Quader mit zwei gleichlangen Kanten aber einer deutlich geringeren Höhe die gleichen Probleme gezeigt. Dagegen zeigen komplexere Formen wie eine U- oder ein T-Form bessere Ergebnisse. Diese Ergebnisse werden ausschließlich in Anhang VI gezeigt.



**Abbildung 4-30: Modellierter Modalanalyse eines Prismas mit den Eigenschaften eines Seeberger Sandsteins. Ganz oben werden die gefundenen Schwingungsmoden mit den dazugehörigen Frequenzen gezeigt, daneben ist das Koordinatenkreuz mit der Orientierung der Prismen. Die Abbildungen zeigen vier verschiedene Schwingungsmoden. Links ist die Farbskala, die die Intensität der Auslenkung beschreibt, wobei rot die maximale Dehnung und blau die minimale Dehnung definiert.**

**Tabelle 4-4: Auflistung der Frequenzen für die Grundschwingungsmoden von ungeschädigten und geschädigten Materialien sowie eines Prismas und der numerischen Berechnung für den Sandsteinblock.**

Material	Flexural (blau) [Hz]	Longitudinal (grün) [Hz]	Torsional (rot) [Hz]
Sandstein (o. S.)	5180	6240	3890
Quarzit (o. S.)	8440	9730	/
Tuff (o. S.)	4100 (*)	4900 (*)	3100
Sandstein (Ansys)	5240	/	3950
Sandstein (m. S.)	4900	5500	3800
Quarzit (m. S.)	6900 (*)	8800 (*)	5300 (*)
Tuff (m. S.)	3900 (*)	4600 (*)	2900
Sandstein (Prisma)	2380	6500	4010

**o. S.** = ohne Schädigung, **m. S.** = mit Schädigung, (\*) = nicht eindeutig zu identifizieren, / = nicht messbar

Bei der Betrachtung der Frequenzen für die Grundschwingungsmoden in Tabelle 4-4 wird eine Abnahme der Frequenzen von den ungeschädigten Probekörpern zu den geschädigten Probekörpern deutlich. Diese Tendenz muss dementsprechend auch bei den elastischen Modulen erkennbar sein, da zur Berechnung die jeweiligen Frequenzen herangezogen werden. Die Formeln zur Berechnung sind in Kapitel 3.2.3 näher erläutert. Die elastischen Module werden zur weiteren Auswertung berechnet (Tabelle 4-5), da sie ein Maß für die Festigkeit eines Materials sind. Zwar sind die elastischen Module an die Frequenzen gekoppelt, für weiterführende Arbeiten der numerischen Berechnung (Projekt 5) sind jedoch speziell die elastischen Module von Interesse und werden daher hier berechnet. Sind die elastischen Module berechnet, kann der prozentuale Abfall, der durch die Schädigung entstanden ist, bestimmt werden. Nun sind die einzelnen Materialien miteinander vergleichbar. Mit den Formeln (3.18) bis (3.20) und den Werten aus Tabelle 4-4 können die elastischen Module zu den Werten in Tabelle 4-5 berechnet werden. Zum Vergleich werden Literaturwerte, soweit vorhanden, angegeben.

**Tabelle 4-5: Auflistung der aus den Frequenzen berechneten elastischen Module von ungeschädigtem und geschädigtem Material sowie eines Prismas und deren numerischen Berechnung.**

Material	Schermodul [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul (Flexural) [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul (Longitudinal) [N/mm <sup>2</sup> ]	Literaturwert E- Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
Sandstein (o. S.)	5910 ± 140	10328 ± 465	13013 ± 199	14800 ± 1400 * <sup>1</sup>
Quarzit (o. S.)	-	-	-	50000 – 75000* <sup>2</sup>
Tuff (o. S.)	2729 ± 65	4627 ± 209	5870 ± 91	10000 – 40000* <sup>3</sup>
Sandstein (Ansys)	6172 ± 147	10604 ± 478	/	14800 ± 1400 * <sup>1</sup>
Sandstein (m. S.)	5639 ± 134	8598 ± 387	10443 ± 166	---
Quarzit (m. S.)	13962 ± 332	22131 ± 997	33665 ± 529	---
Tuff (m. S.)	2389 ± 57	4370 ± 197	5107 ± 78	---
Sandstein (Prisma)	6303 ± 320	13817 ± 1161	13999 ± 406	14800 ± 1400 * <sup>1</sup>

**o. S.** = ohne Schädigung, **m. S.** = mit Schädigung, / = keine Frequenz zur Berechnung vorhanden, - = keine Torsionsfrequenz zur Berechnung vorhanden, \*<sup>1</sup> Kenkmann et al. [2011], \*<sup>2</sup> Schifferli [2008-2013a], \*<sup>3</sup> Schifferli [2008-2013b], --- = keine Literaturwerte vorhanden

Wie Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 zeigen, können die elastischen Module und damit auch der prozentuale Abfall, bedingt durch die Schädigung des Gesteins, berechnet werden. Für die Berechnung beim Quarzit wurde als Ausgangswert der Literaturwert verwendet. Allerdings fällt schon bei der Betrachtung der verschiedenen Sandstein-Probekörper auf, dass die Ergebnisse untereinander nicht vergleichbar sind. Werden die Ergebnisse des Sandsteinquaders mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung eines Sandsteinquaders verglichen, so sind die Ergebnisse nahe beieinander und können bis auf das E-Modul aus der Longitudinalschwingung in Verbindung miteinander gebracht werden. Betrachtet man hingegen das Sandsteinprisma, das aus demselben Material, sogar aus der gleichen Bank im Steinsägewerk stammt, so werden deutliche Abweichungen sichtbar. Nicht nur, dass die Werte des Prismas deutlich besser zu den Literaturwerten passen als die des Quaders, sondern auch, dass das Prisma kaum Differenzen zwischen den E-Modulwerten aus Flexural- und Longitudinalschwingung zeigt. Zwischen den Berechnungen aus den flexuralen und den longitudinalen Schwingungen liegen bei dem Quader  $3000 \text{ N/mm}^2$ . Beide Werte sollten unabhängig voneinander eine Aussage über das E-Modul geben und daher übereinstimmen. Dies zeigt zusätzlich, dass die Messungen an den Würfelproben keine verlässlichen Daten ergeben. Die Ergebnisse können somit nicht für die Aussage über die elastischen Module herangezogen werden. Eine Abschätzung über den Grad der Schädigung ist auch eher unzuverlässig. Für den Sandstein sind die Werte für das E-Modul untereinander vergleichbar, beide scheinen ähnlich stark durch die Schädigung beeinflusst zu werden. Der Quarzit kann nur mittels der Literaturwerte abgeschätzt werden. Hier scheint die Schädigung im Gestein die elastischen Module besonders stark zu beeinflussen. Der Tuff zeigt ähnliche prozentuale Abweichungen wie der Sandstein. Die Reduzierungen der E-Modulwerte zeigen jedoch keine Übereinstimmung untereinander.

**Tabelle 4-6: Prozentualer Abfall der elastischen Module für die drei geschädigten Materialien. Quarzit kann nur mit den Literaturwerten verglichen werden.**

Parameter	Sandstein	Quarzit	Tuff
Schermodul	4,6 %	---	12,5 %
E-Modul (Flexural)	18,8 %	55,7 – 70,5 %	5,6 %
E-Modul (Longitudinal)	19,8 %	32,7 – 55,1 %	13 %

--- keine Werte für einen Vergleich vorhanden

#### 4.5 Visualisierung der Schädigung mittels radiographischer Computertomographie

Neben den am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung vorhandenen zerstörungsfreien Prüfmethoden wurden zusätzlich Messungen mit weiteren Messanlagen für Computertomographie durchgeführt. Hierfür wurde die Hilfe von verschiedenen Instituten bzw. Firmen (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk und Betriebsstoffe, General Electric und der European Aeronautic Defence and Space Company) und dem Radiographischen Lehrstuhl an der Technischen Universität München (TUM) in Anspruch genommen. Im Folgenden werden die Messergebnisse dargestellt und erläutert.

##### a. Messungen am Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)

Für die Messungen am WIWeB wurde ein Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge und einem Impaktkrater verwendet. Aufgrund der Dichte und der Probengröße kann mit der dort vorhandenen Messanlage eine Auflösung von 140  $\mu\text{m}$  erzeugt werden.

In Abbildung 4-31 werden die Ergebnisse der Messung durch zwei Schnittbilder verdeutlicht. Mit weißen Pfeilen wird auf einige größere Rissstrukturen hingewiesen. Die Bilder zeigen jedoch ein sehr schlechtes S/N-Verhältnis, das durch den eher verschwommenen Übergang vom Probekörper zum Hintergrund deutlich wird. Auch der Innenbereich des Kraters ist nicht komplett schwarz, wie es bei einem luftgefüllten Raum zu erwarten ist. In den Schnittbildern sind lediglich Rissstrukturen wie Abplatzungen, die jedoch noch am Probekörper hängen geblieben sind, zu erkennen. Kleinere Strukturen, wie sie die Ergebnisse der Ultraschall-Tomographie (UST) in einiger Entfernung vom Kraterboden vermuten lassen, sind nicht zu identifizieren.

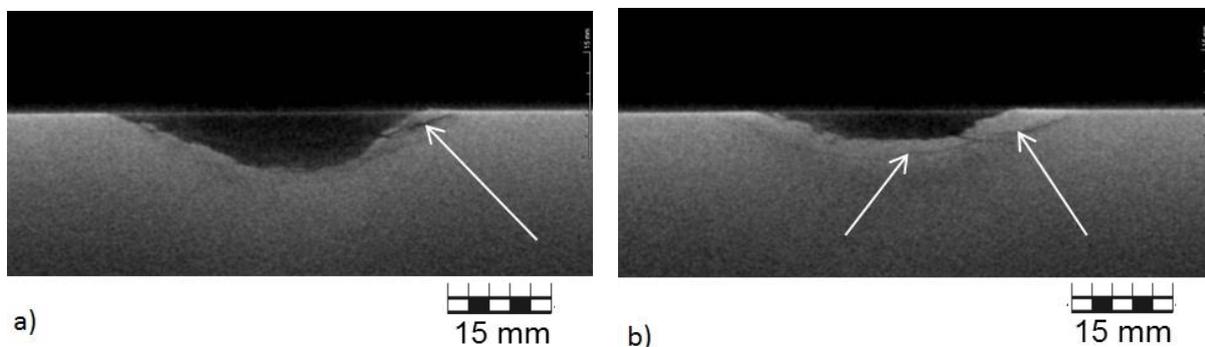
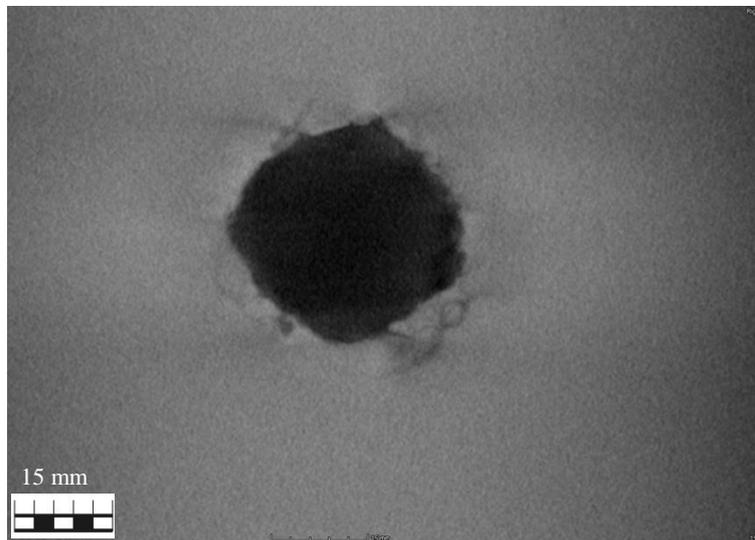


Abbildung 4-31: Zwei Schnittbilder einer Radiographie Messung am WIWeB. Gezeigt wird ein Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge. Die Auflösung beträgt circa 140  $\mu\text{m}$ . Die weißen Pfeile deuten auf sichtbare Rissstrukturen (Moser und Grosse [2010]) (gemessen am WIWeB).

Abbildung 4-32 zeigt ein Schnittbild unterhalb der Krateroberfläche. In radialer Ausbreitung können Risse um den Krater registriert werden. Hier können Risse auf eine Entfernung von ca. 1 cm gut identifiziert werden.

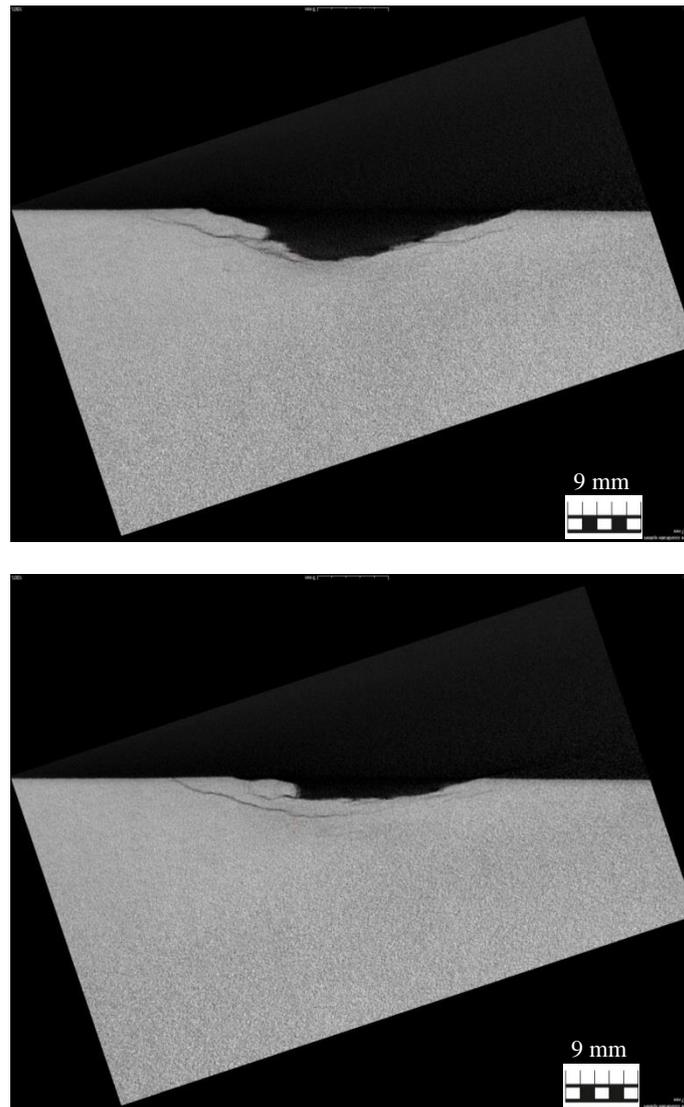


**Abbildung 4-32: Schnittbild unterhalb der Krateroberfläche mit Frontalblick auf den Krater. Rings um den Krater sind kleinere Rissstrukturen erkennbar (gemessen vom WIWeB).**

#### **b. Messungen bei der Firma General Electric (GE)**

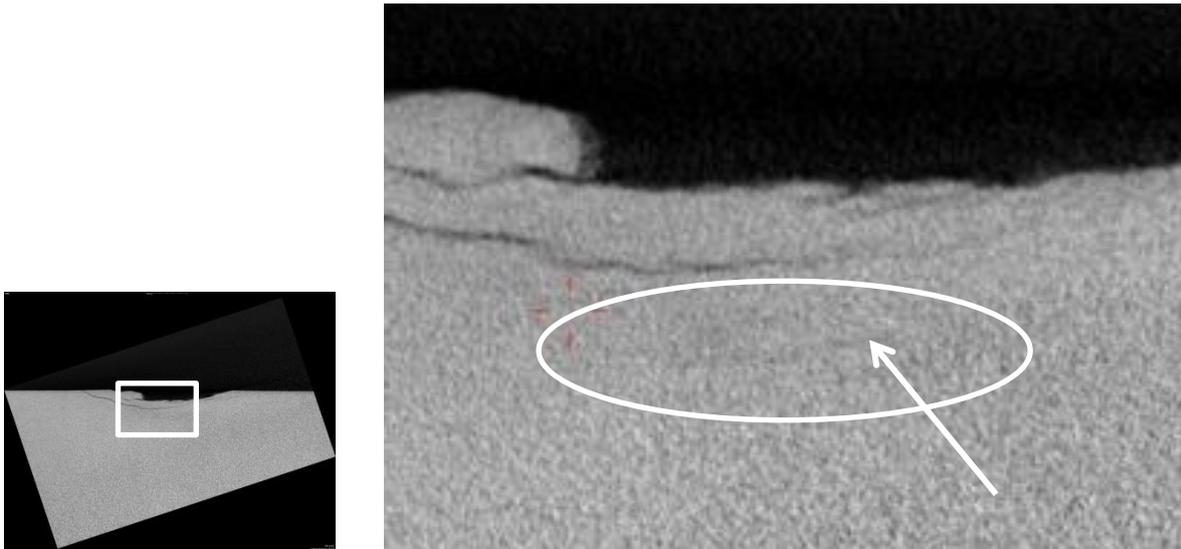
Für die radiographischen Messungen bei der Firma GE wurde eine der Sandsteinproben, die bereits beim WIWeB untersucht worden ist, zu einem Würfel mit 10 cm Kantenlänge zurechtgeschnitten. Der Zuschnitt wurde so angefertigt, dass der Impaktkrater weiterhin mittig auf der Oberfläche liegt und die Schädigungszone möglichst keine zusätzliche Schädigung erhalten hat. Durch die Verkleinerung der Probe kann nun eine Auflösung von 50  $\mu\text{m}$  erreicht werden.

In Abbildung 4-33 werden zwei Schnittbilder der Messung gezeigt. Für die Messungen wurde der Probekörper auf einer Seite aufgebockt (Abbildung 3-37, S. 74), sodass die Krateroberfläche schräg im Bild erscheint. Für die graphische Darstellung wurde das Bild mit dem gleichen Winkel wieder zurück gedreht, sodass der Krater horizontal im Bild liegt. Die Abbildung ist von der Auflösung her deutlich besser als die Schnittbilder in Abbildung 4-31. Die Risse sind besser zu erkennen und zeigen feinere Übergänge. Zusätzlich sind ein paar kleinere Rissstrukturen erkennbar, die bei der zuvor größeren Auflösung nicht zu erkennen waren. Die Daten zeigen, dass man mit einer kleineren Auflösung weitere Risse unterhalb der Kraterstruktur ausmachen kann.



**Abbildung 4-33: Zwei Schnittbilder einer Radiographie-Messung an einem Sandstein-Probekörper mit 10 cm Kantenlänge. Die Auflösung liegt hier bei 50  $\mu\text{m}$  (gemessen von GE).**

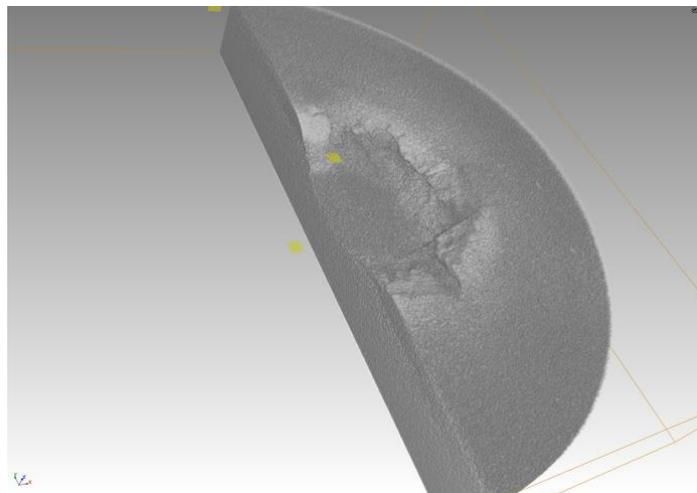
In Abbildung 4-34 wird ein Detailblick in das untere Bild von Abbildung 4-33 gegeben. Dort ist ein sehr schwacher Schatten innerhalb der weißen Ellipse zu erkennen. Dieser Schatten könnte ebenfalls als Riss interpretiert werden. Allerdings ist der Riss so schwach zu erkennen, dass auf eine Rissbreite unterhalb oder sehr nahe der Grenze der hier verwendeten Auflösung geschlossen werden muss. Wird dieser Schatten als Riss gedeutet, kann davon ausgegangen werden, dass noch weitere Risse existieren. Die weiteren Risse müssten dann eine noch kleinere Rissbreite aufweisen und könnten auch in größeren Tiefen angefounden werden. Eine definitive Aussage ist bei der hier gegebenen Auflösung jedoch nicht möglich und beruht lediglich auf einer Annahme, die bei einer optischen Betrachtung gefunden wurde, die jedoch von der bei GE vorhandenen Computermesstechnik nicht mehr als Struktur erkannt werden kann. Aufgrund der Ergebnisse aus den Ultraschall-Tomographie-Messungen sind jedoch kleinere und tiefer liegende Rissstrukturen zu vermuten.



**Abbildung 4-34:** Links: Originalschnittbild aus Abbildung 4-33 (unten) mit weißem Kasten, der den Detailblick rechts markiert. In der Detailansicht ist ein schwacher Schatten innerhalb der weißen Ellipse zu erkennen, der als Riss interpretiert werden kann (gemessen bei GE).

### c. Messungen bei der European Aeronautic Defence and Space Company (EADS)

Abbildung 4-35 und Abbildung 4-36 zeigen die Ergebnisse der Computer-Tomographie bei EADS. Abbildung 4-35 zeigt ein dreidimensionales Bild der Kraterstruktur mit einem Schnitt durch den Krater selbst. Die Kreisform entsteht durch die Art der Aufnahme. Hier wurde eine zylindrische Aufnahme gewählt, um einen Detailblick auf den Kraterbereich zu erhalten. In den Schnittbildern aus Abbildung 4-36 wird deutlich, dass hier das S/N-Verhältnis sehr schlecht ist. Die Oberfläche des Probekörpers ist kaum auszumachen und es werden nur relativ große Risse sichtbar.



**Abbildung 4-35:** Ergebnis der Computer-Tomographie bei EADS. Dreidimensionales Bild der Krateroberfläche mit Querschnitt im Kraterbereich (gemessen bei EADS).

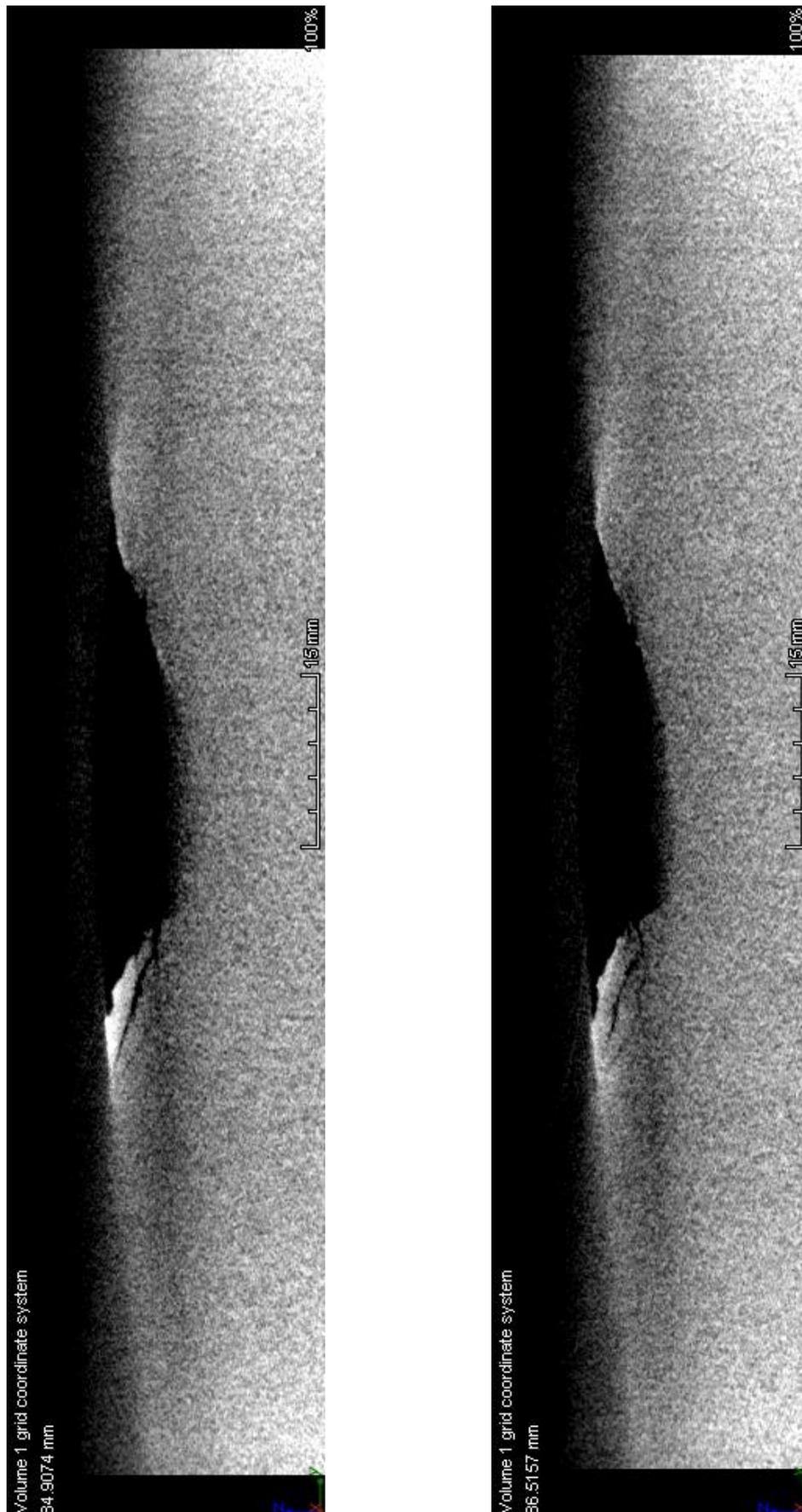


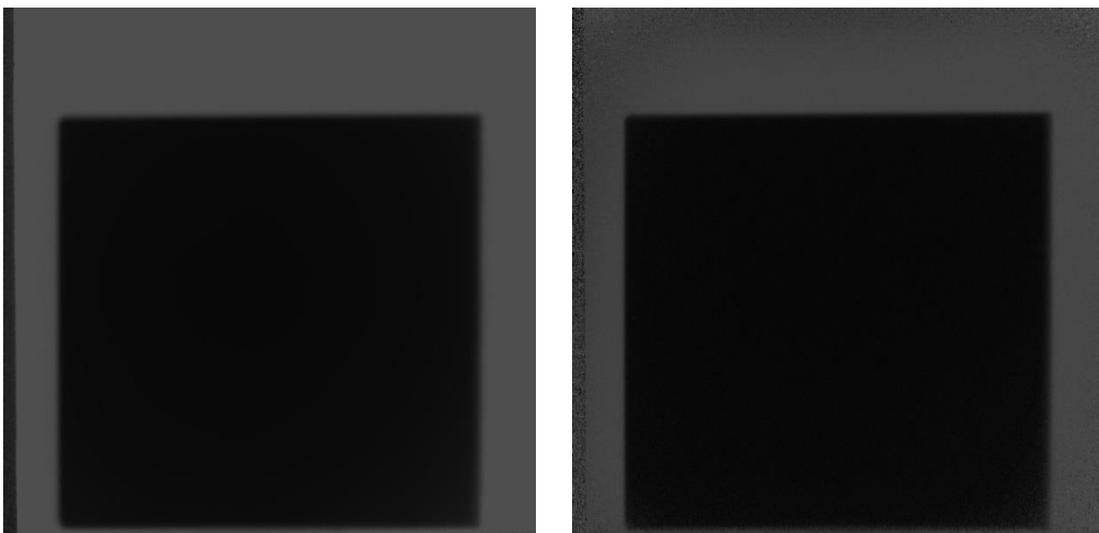
Abbildung 4-36: Zwei Schnittbilder der Computer-Tomographie bei EADS. Ein paar Risse nahe der Krateroberfläche sind gut erkennbar. Das schlechte Signal-zu-Noise-Verhältnis lässt jedoch keine genaue Interpretation zu (gemessen von EADS).

#### d. Neutronen Computer-Tomographie und Radiographie mit schnellen Neutronen (NECTAR)

NECTAR ist, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, eine Anlage für Radiographie und Tomographie, die mit Spaltneutronen arbeitet. Im Folgenden wird die Messung an einem Sandsteinprobekörper mit Impaktkrater und 20 cm Kantenlänge gezeigt (Abbildung 4-37).

Beide Bilder in Abbildung 4-37 zeigen den Probekörper bei  $0^\circ$  Ausrichtung in der Messanlage. Es ist deutlich sichtbar, dass die Messaufgabe hier nicht erfüllt werden konnte. Die Rissstrukturen, die durch den Impakt entstanden sind, können nicht beobachtet werden. In der rechten Abbildung wurde zusätzlich ein Filter über das Messergebnis gelegt, dennoch werden keine einzelnen Strukturen erkennbar. Selbst der Krater auf der Oberfläche des Würfels kann nicht sichtbar gemacht werden. Obwohl der Sandstein von der Größe her sehr gut für die Messungen am NECTAR geeignet wäre, zeigt sich hier das Problem der Auflösung. Die Dichte des Sandsteins in Kombination mit dem Volumen und der Geometrie, macht es unmöglich die feinen Rissstrukturen zu registrieren. Eventuell hat hier auch vorhandene Feuchtigkeit in dem Probekörper zu einem solchen Ergebnis geführt.

Messungen, die den Probekörper in einem Winkel von  $45^\circ$  zeigen, werden hier nicht weiter diskutiert. Durch die längere Messstrecke von 28,28 cm wird die Auflösung theoretisch noch schlechter.



**Abbildung 4-37: Radiographische Aufnahme eines Sandstein-Probekörpers mit NECTAR. Jeweils mit einem Blickwinkel von  $0^\circ$ . Links wird die Messung ohne zusätzliche Bearbeitung gezeigt. Rechts wurde mit einem Filter gearbeitet (gemessen vom Institut für Radiochemie der TUM).**

## 5. Ergebnisse im Rahmen von MEMIN

Alle Messungen, die hier gezeigt werden, sind aus der Motivation heraus entstanden, dass das Wissen über Impaktkrater unzureichend ist. Mit dem MEMIN-Projekt soll eine Datensammlung mit Informationen über Impaktexperimente entstehen. Neben der Variation von Probekörpermaterial, Projektilmaterial, Impaktenergie, Wassersättigung und Umgebungsdruck sollen auch Prozesse wie die Wirkung auf den Krater, das Projektil, die Metamorphose im Krater durch den Impakt, der Auswurf der *Ejecta* sowie der Schädigung unterhalb des Kraters in die Datensammlung aufgenommen werden. Deshalb ist es wichtig, die hier gezeigten Ergebnisse auch im Zusammenhang mit den Schussparametern darzustellen, sodass es zukünftig möglich wird, durch vergleichende geologische und experimentelle Untersuchungen auf terrestrische Krater schließen zu können. Außerdem sollen die Ergebnisse helfen, numerische Berechnungen zu verbessern, damit die Ursache bereits vorhandener Krater rekonstruiert und die Wirkung weiterer Meteoritenimpakte vorhergesagt werden kann. Im Folgenden werden die hier bereits vorgestellten Ergebnisse neben den Ergebnissen der anderen MEMIN-Projekte auch mit anderen Studien und mit geophysikalischen Kenntnissen in Zusammenhang gesetzt.

### 5.1 Auswertung innerhalb von MEMIN und Vergleich zu anderen Studien

Für die hier angestellten Überlegungen ist vor allem das Schädigungsvolumen interessant. Deshalb wird in Abbildung 5-1 der Zusammenhang zwischen dem Kratervolumen (Ordinate) und dem Volumen der Schädigungszone (Abszisse) betrachtet. Das Kratervolumen ist in Poelchau et al. [2013a] nachzulesen, die Schädigungszone wurde aus den Ergebnissen der UST abgeschätzt. Es wird schnell deutlich, dass hier die unterschiedlichen Materialien unabhängig voneinander betrachtet werden müssen. Das Schädigungsvolumen wurde aus den Ultraschall-Tomographie-Darstellungen über den Radius der nahezu radialen Schädigungszone abgeschätzt. Für eine Auswertung kann nur der Sandstein (blaue Raute) näher diskutiert werden, da er das einzige Material ist, von dem UST-Messungen für verschieden große Probekörper existieren. Für eine bessere Betrachtung werden die Daten doppelt logarithmisch dargestellt. Mit wachsendem Schädigungsvolumen steigt das Kratervolumen immer stärker an (Abbildung 5-1).

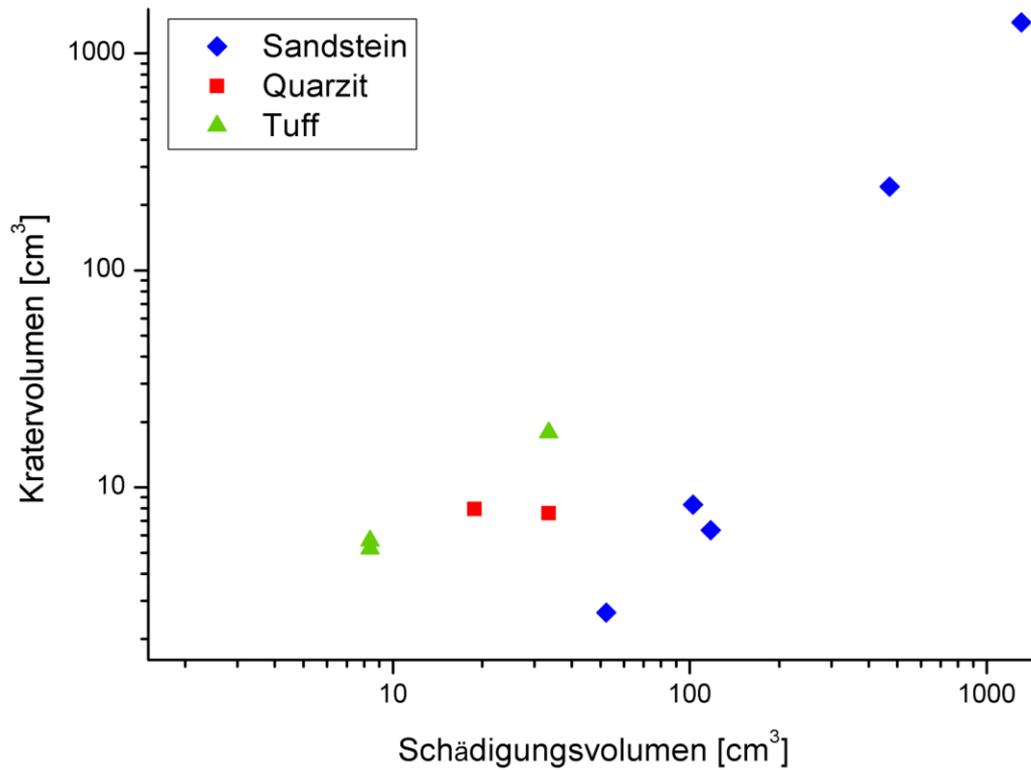


Abbildung 5-1: Abhängigkeit zwischen dem Kratervolumen und dem Schädigungsvolumen für drei verschiedene Materialien. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert.

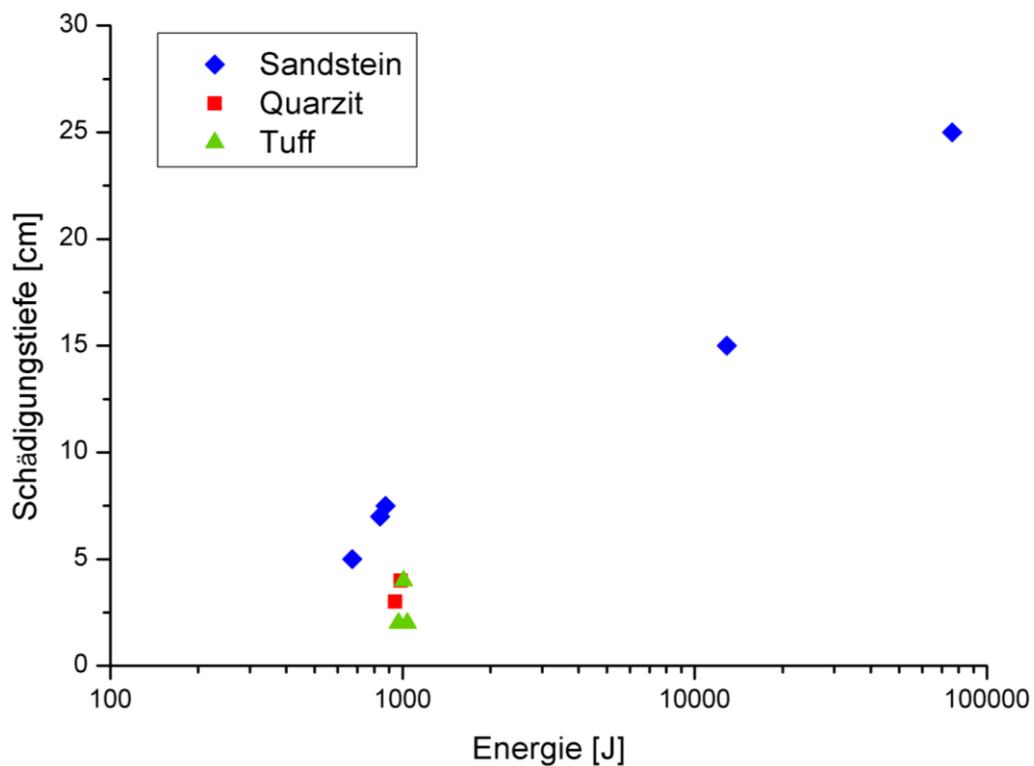


Abbildung 5-2: Abhängigkeit zwischen der Schädigungstiefe und der Impaktenergie für drei verschiedene Materialien. Die Abszisse mit der Energie ist logarithmisch dargestellt.

Betrachtet man hingegen die Schädigungstiefe gegenüber der Impaktenergie, so sollte nur für die Energie eine logarithmische Darstellung gewählt werden (Abbildung 5-2). Es wird deutlich, dass die Schädigungstiefe mit der Impaktenergie ansteigt. Da die Energie jedoch logarithmisch aufgetragen ist, ist anzunehmen, dass sich mit steigender Impaktenergie das Wachstum der Schädigungstiefe abschwächt. Auch die Materialien Tuff und Quarzit zeigen, dass mit höherer Impaktenergie die Schädigungstiefe ansteigt. Hier gibt es jedoch zu wenige Messpunkte um einen Trend bestimmen zu können, weshalb hier auf eine weitere Interpretation verzichtet wird.

Neben den MEMIN-Impaktexperimenten gibt es auch andere Studien, die Einschläge im Labor untersucht haben. In Tabelle 5-1 werden die Studien mit den dort ermittelten Schädigungstiefen und weiteren Parametern dargestellt. Neben den experimentellen Daten wird auch ein terrestrischer Krater aufgeführt, der Meteor Krater in Arizona.

**Tabelle 5-1: Schädigungstiefe und weitere Parameter für Impaktexperimente verschiedener Studien (Fortsetzung, nächste Seite).**

Experiment	$D_d$ [cm]	Projektile- material	$r_p$ [mm]	$m_p$ [g]	Probekörper- material	$m_t$ [g]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$v_i$ [m/s]	E [J]	$D_d/r_p$
MEMIN A3-5124	7 (US)	D290-1 Stahl	1,25	0,0670	Seeberger Sandstein	16400	2,05	5000	838	56
MEMIN A6-5126	1,7 (SEM)	<b>D290-1</b> <b>Stahl</b>	<b>1,25</b>	<b>0,0671</b>	<b>Seeberger</b> <b>Sandstein</b>	<b>16400</b>	<b>2,05</b>	<b>5100</b>	<b>873</b>	<b>13,6</b>
MEMIN A8-5128	7,5 (US)	D290-1 Stahl	1,25	0,0672	Seeberger Sandstein	16400	2,05	5100	874	60
MEMIN A16-5186	5 (US)	<b>Aluminium</b> <b>55X28J1</b>	<b>1,25</b>	<b>0,022</b>	<b>Seeberger</b> <b>Sandstein</b>	<b>16100</b>	<b>2,05</b>	<b>7750</b>	<b>673</b>	<b>40</b>
MEMIN D5-3300	15 (US)	Eisen- Meteorite	5	4,120	Seeberger Sandstein	265500	2,05	2500	12875	30
MEMIN E1-3382	25 (US)	<b>D290-1</b> <b>Stahl</b>	<b>6</b>	<b>7,313</b>	<b>Seeberger</b> <b>Sandstein</b>	<b>n. b.</b>	<b>2,05</b>	<b>4500</b>	<b>76031</b>	<b>42</b>
MEMIN A20-5339	4 (US)	D290-1 Stahl	1,25	0,067	Taunus Quarzit	20950	2,62	5430	986	32
MEMIN A22-5340	3 (US)	<b>D290-1</b> <b>Stahl</b>	<b>1,25</b>	<b>0,067</b>	<b>Taunus</b> <b>Quarzit</b>	<b>20950</b>	<b>2,62</b>	<b>5320</b>	<b>944</b>	<b>24</b>
MEMIN A24-5341	2 (US)	D290-1 Stahl	1,25	0,067	Weiberner Tuff	12000	1,5	5570	1038	16
MEMIN A25-5342	2 (US)	<b>D290-1</b> <b>Stahl</b>	<b>1,25</b>	<b>0,066</b>	<b>Weiberner</b> <b>Tuff</b>	<b>12600</b>	<b>1,5</b>	<b>5400</b>	<b>968</b>	<b>16</b>
MEMIN A26-5343	4 (US)	D290-1 Stahl	1,25	0,067	Weiberner Tuff	14750	1,8	5480	1008	32
Xia & Ahrens (2001) shot 108	4,5 (US)	Aluminium	2,8	0,2483	San Marcos Gabbro	n. b.	n. b.	1019	129	16,1
Xia & Ahrens (2001) shot 109	4 (US)	<b>Aluminium</b>	<b>2,8</b>	<b>0,2483</b>	<b>San Marcos</b> <b>Gabbro</b>	<b>n. b.</b>	<b>n. b.</b>	<b>926</b>	<b>106</b>	<b>14,3</b>
Xia & Ahrens (2001) shot 110	3,5 (US)	Aluminium	2,8	0,2483	San Marcos Gabbro	n. b.	n. b.	758	71	12,5
Ai & Ahrens (2004a)	7 (US)	Blei	2,8	1,0429	San Marcos Granite	16200	2,66	1200	751	25,0

Experiment	$D_d$ [cm]	Projektil- material	$r_p$ [mm]	$m_p$ [g]	Probekörper- material	$m_t$ [g]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$v_i$ [m/s]	E [J]	$D_d/r_p$
Polanskey & Ahrens (1990) shot 840901	2 (V)	Aluminium	1,59	0,0443	San Marcos Gabbro	11878	2,9	6490	933	12,6
<b>Polanskey &amp; Ahrens (1990) shot 840902</b>	<b>4 (V)</b>	<b>Eisen</b>	<b>1,59</b>	<b>0,1292</b>	<b>San Marcos Gabbro</b>	<b>11878</b>	<b>2,9</b>	<b>4600</b>	<b>1367</b>	<b>25,2</b>
Polanskey & Ahrens (1990) shot 840904	4,5 (V)	Eisen	1,59	0,1297	San Marcos Gabbro	11878	2,9	5440	1919	28,3
<b>Polanskey &amp; Ahrens (1990) shot 840905</b>	<b>3,2 (V)</b>	<b>Eisen</b>	<b>1,59</b>	<b>0,1297</b>	<b>San Marcos Gabbro</b>	<b>11878</b>	<b>2,9</b>	<b>4600</b>	<b>1372</b>	<b>20,1</b>
Polanskey & Ahrens (1990) shot 840906	3,5 (V)	Eisen	1,59	0,1297	San Marcos Gabbro	11878	2,9	4760	1469	22,0
<b>Polanskey &amp; Ahrens (1990) shot 840907</b>	<b>1,5 (V)</b>	<b>Basalt</b>	<b>2,38</b>	<b>0,1557</b>	<b>San Marcos Gabbro</b>	<b>11878</b>	<b>2,9</b>	<b>2260</b>	<b>398</b>	<b>6,3</b>
Polanskey & Ahrens (1990) shot 840909	5 (V)	Stahl	3,18	1,0571	San Marcos Gabbro	11878	2,9	1690	1510	15,7
Meteor Crater (Ackermann et al. 1975; Roddy et al. 1975)	~80000 (G)	Eisen Meteorite	~15000-50000	~150 x E+9	Sandstein, Kalkstein	n. b.	n. b.	15000	1,9 x E+16	26,7

$D_d$  = Damage depth in radial distance (radiale Schädigungsausbreitung),  $r_p$  = Projektil Radius,  $m_p$  = Projektil Masse,  $m_t$  = Probekörper Masse,  $\rho$  = Probekörper Dichte,  $v_i$  = Projektil Fluggeschwindigkeit, E = kinetische Energie,  $D_d/r_p$  = Normierte Schädigungstiefe, US = Schädigungstiefe gemessen mit Ultraschall, SEM = Schädigungstiefe gemessen mit 'scanning electron microscopy', V = visuelle Auswertung, G = geophysikalische Messungen, n. b. = nicht bekannt

Tabelle 5-1 zeigt Daten von vier verschiedenen Studien und die Daten der geophysikalischen Messungen am Meteor Krater. Die Daten sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da in jeder Studie unterschiedliche Materialien und Schussparameter (z. B. Projektilfluggeschwindigkeit, Impaktenergie u.s.w.) verwendet worden sind. Wie die Ergebnisse in Kapitel 4 gezeigt haben, spielen Dichte und Porosität der Probekörper eine entscheidende Rolle. Sie wirken sich auf die Schädigungstiefe und das Kratervolumen aus. Auch ist die Schädigungstiefe in den unterschiedlichen Studien bzw. Messungen unterschiedlich ermittelt worden. Die Schädigungstiefe der meisten MEMIN-Krater (nach Moser et al. [2013] und Ergebnisse aus Kapitel 4.2) und bei den Kratern von Xia und Ahrens [2001] wurden jeweils mit Ultraschall (US) ermittelt, wenn auch auf unterschiedliche Weise (Kapitel 3.2.2). Bei Polanskey und Ahrens [1990] und Ai und Ahrens [2004] wurden die Schädigungszonen visuell, nach dem Aufschneiden der Probekörper, abgeschätzt. Die Daten vom Meteor-Krater stammen aus geophysikalischen Messungen im Feld



normierten Schädigungstiefe aus Tabelle 5-1 für die großen Sandstein-Probekörper D5 und E1 zeigen jedoch, dass bei größeren Sprüngen der Impaktenergie (abhängig unter anderem auch von der Projektgröße) die normierte Schädigungstiefe nicht mehr linear ansteigt. Es kann daher eine logarithmische Abhängigkeit vermutet werden. Auch die normierte Schädigungstiefe des Meteor Kraters weicht nicht auffällig von den anderen Ergebnissen ab. Dazu kommt, dass die Schädigungstiefe bei den großen Sandstein-Probekörpern nur anhand der vorhandenen Daten abgeschätzt wurde. Die UST wurde nicht am gesamten Probekörper durchgeführt, daher kann die Schädigungszone auch tiefer als vermutet sein (Anhang IV). Das Gleiche gilt für den Meteor Krater. Hier wurden die Ergebnisse von den seismischen Untersuchungen aus Roddy et al. [1975] verwendet und wurden daher mit einer anderen Technik ermittelt.

Der Meteor-Krater in Arizona ist einer der am besten vermessenen Krater der Erde und wird in verschiedenen Arbeiten angesprochen (z. B. Ackermann und Godson [1975] und Roddy et al. [1975]). Der Durchmesser des Kraters beträgt 1,2 km und die Schädigungszone wird mittels seismischer Refraktion auf 0,8 km bis 1,0 km unterhalb der Oberfläche geschätzt. Ermittelt man das Verhältnis von Kraterdurchmesser zu Schädigungstiefe erhält man einen Wert von maximal 1,5. Für die MEMIN-Krater in Sandstein liegt dieser Wert in etwa zwischen 0,8 und 0,9 (bei einem Kraterdurchmesser von 6 cm bis 6,5 cm und einer Schädigungstiefe von 7 cm bis 7,5 cm). Für Quarzit liegt der Wert bei etwa 1,5 (Kraterdurchmesser: 6 cm, Schädigungstiefe: 4 cm) und für Tuff bei 2 (Kraterdurchmesser: 4 cm, Schädigungstiefe: 2 cm). In Tabelle 5-2 wurden alle Werte zusammengefasst. Diese Überlegung unterstützt die Aussage, dass die Schädigungstiefe trotz erhöhter Energie begrenzt ist. Einige Arbeiten vermuten bei der Kraterentstehung unterschiedliche Einflüsse durch Gravimetrie- und Krafteinwirkung durch die vorhandenen Energien (Ahrens et al. [2001], Poelchau et al. [2013a]).

**Tabelle 5-2: Übersicht zum Verhältnis des Kraterdurchmesser zur Schädigungstiefe.**

		$\varnothing_K$	$T_S$	$\varnothing_K/T_S$
Meteor (Sandstein, Kalkstein)	Krater	1,2 km	0,8 km – 1,0 km	1,5
MEMIN Sandstein		6 cm – 6,5 cm	7 cm – 7,5 cm	0,8 - 0,9
MEMIN Quarzit		6 cm	4 cm	1,5
MEMIN Tuff		4 cm	2 cm	2

$\varnothing_K$  = Kraterdurchmesser,  $T_S$  = Schädigungstiefe,  $\varnothing_K/T_S$  = Verhältnis Kraterdurchmesser/Schädigungstiefe

## 5.2 Charakterisierung der Schädigungszone: Makroskopisch, mikroskopisch, numerisch und mit Ultraschall

Ein wichtiges Ergebnis der ZfP-Methoden ist die Charakterisierung der Schädigungszone unterhalb der Krater. Die Visualisierung der Risse soll ohne neue Schädigung entstehen, wie es beim Zerschneiden der Probekörper passiert. Das Problem, das durch das Zersägen entsteht, ist, dass eine zusätzliche Schädigung nicht erfasst werden kann. Es ist nicht möglich zu unterscheiden, ob der Riss durch das Experiment oder durch das Schneiden entstanden ist. Da die Ergebnisse der Ultraschall-Tomographie (UST) jedoch nicht direkt nachvollzogen werden können und auch nur eine Zone mit erniedrigter, durchschnittlicher Geschwindigkeit erfasst werden kann, wurden einige Probekörper zersägt und die Rissstruktur makroskopisch durch Kenkmann et al. [2011] und mikroskopisch in Projekt 2 durch Buhl et al. [2013] ausgewertet.

In Abbildung 5-4 werden die Schnittbilder zweier Sandstein-Probekörper mit Impaktkrater gezeigt. Der obere Krater stammt von einem trockenen Sandstein und der untere von einem wassergesättigten Sandstein. Bei der makroskopischen Betrachtung von Kenkmann et al. [2011] der beiden Kraterstrukturen fallen größere Risse parallel zur Oberfläche auf. Direkt unter dem Kratermittelpunkt verlaufen die Risse eher senkrecht zur Oberfläche. Erst in einiger Tiefe sind weitere Risse parallel zur Oberfläche erkennbar. Die hier sichtbaren Risse suggerieren eine kleinere Schädigungszone als die Zone, die mit der UST ermittelt wird. Jedoch kann vermutet werden, dass noch weitere, makroskopisch nicht erkennbare Risse unterhalb des Kraters vorhanden sind.

Auch Polanskey und Ahrens [1990] haben die Probekörper ihrer Studie makroskopisch untersucht. Abbildung 5-5 zeigt ein ausgeprägtes Rissmuster. Dort werden Risse parallel (*„concentric fractures“*) und senkrecht (*„radial fractures“*) zur Oberfläche direkt unterhalb des Kraters gezeigt. Die parallelen Risse zur Oberfläche aus Abbildung 5-4 sind auch bei Polanskey und Ahrens [1990] erkennbar und wurden als *„spall fractues“* bezeichnet. Zusätzlich werden noch *„near surface fractures“* und *„vertical fractures“* gezeigt, die in den MEMIN-Probekörpern nicht eindeutig erkennbar sind. Was jedoch bei Polanskey und Ahrens [1990] und bei (zu mindestens einem) MEMIN-Sandstein-Probekörper durch Buhl et al. [2013] gezeigt wird, ist eine *„shear fracture zone“* direkt unterhalb des Kraters. In Abbildung 5-6 wird diese noch einmal in drei verschiedene Zonen unterteilt. Die *„shear fracture zone“* kann mikroskopisch genauer untersucht werden (Buhl et al. [2013]). Diese Analyse sollte die Schädigungszone der UST unterstützen. Da die hier gezeigte Zone jedoch nur auf gut 1 cm unterhalb der Oberfläche gemessen wird, kann sie mit der Schädigungszone aus der UST nicht verglichen werden. Anders ist es mit den makroskopisch sichtbaren Rissen, die eine größere Ausbreitung der Rissstrukturen vermuten lassen.

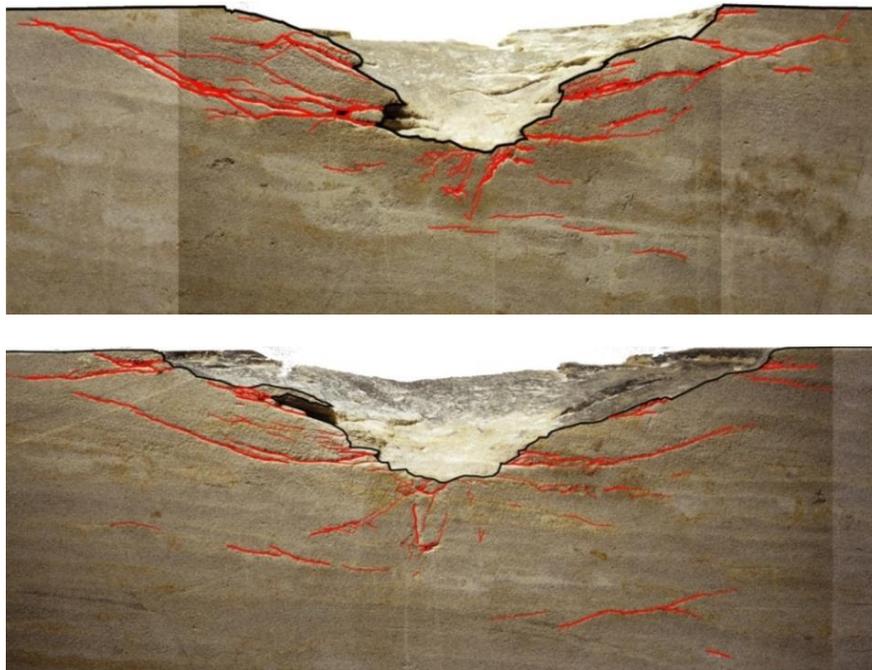


Abbildung 5-4: Blick auf zwei Schnittebenen zweier Sandstein-Probekörper (100 cm x 100 cm x 50 cm). Der Krater ist gut erkennbar (Oben: trockener Sandstein,  $\text{Ø} \approx 25$  cm und 5,6 cm tief; Unten: wassergesättigter Sandstein,  $\text{Ø} \approx 28$  cm und 4,5 cm tief). Unterhalb des Kraters wurden verschiedene Risse rot markiert (Kenkmann et al. [2011]).

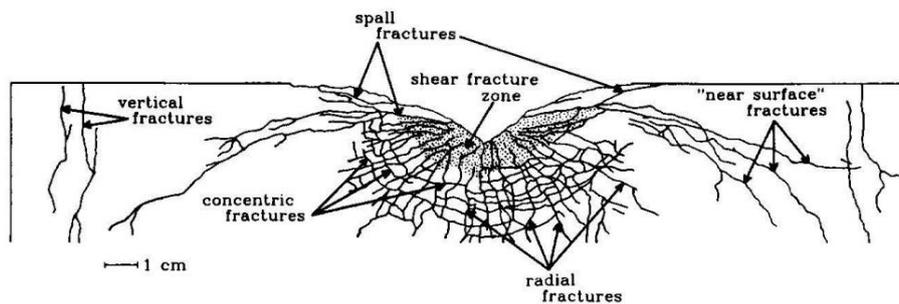


Abbildung 5-5: Makroskopische Analyse der Rissmuster unterhalb eines experimentell erzeugten Impaktkraters (Polanskey und Ahrens [1990]).

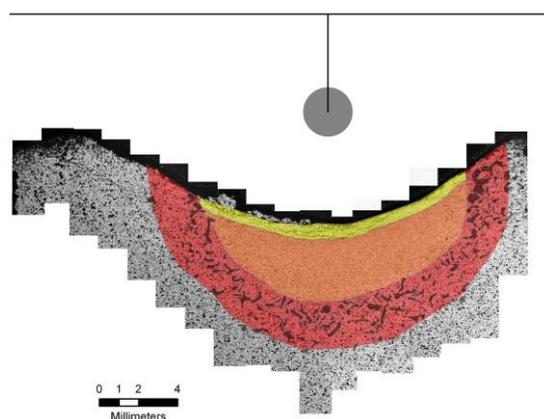
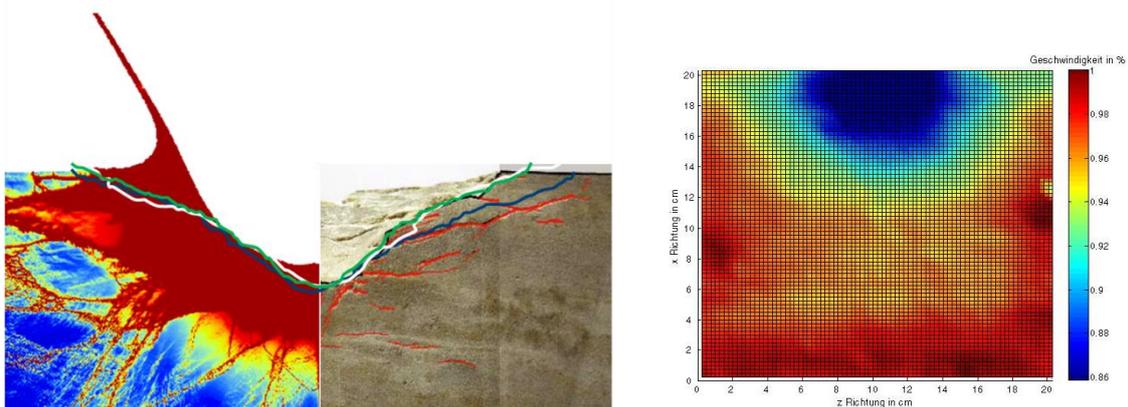


Abbildung 5-6: Mikroskopische Analyse der Schädigungszone (shear fracture zone) unterhalb eines MEMIN-Probekörpers aus Sandstein. Gezeigt wird nur ein kleiner Bereich des Kraters (Buhl et al. [2013]).

Neben der qualitativen Auswertung der Risse wird auch eine numerische Berechnung der Rissstrukturen im MEMIN-Projekt 5 vorgenommen. Abbildung 5-7 zeigt den Vergleich zwischen Numerik, makroskopischer Analysen und den Ergebnissen aus der UST. In Abbildung 5-7 (links) wird eine simulierte Rissstruktur gegenüber einem aufgesägten Probekörper gestellt. Im Kraterbereich werden zusätzlich drei Kraterquerschnitte ähnlicher Experimente gezeigt. Rechts daneben wird zum Vergleich eine Schnittebene der UST an einem Sandstein-Probekörper gezeigt. Die Farbcodierung der Numerik wird über die *jet*-Farbskala dargestellt. Hierbei bedeutet rot, dass dort der größte Anteil an Schädigung entstanden ist, wohingegen bei blau keine Schädigung zu verzeichnen ist. Die Farbskala ist genau entgegengesetzt zu den UST-Ergebnissen in Abbildung 5-7 (rechts), wo blau die Zone der stärksten Schädigung zeigt. Die Numerik lässt eine relativ stark geschädigte Zone unterhalb des Kraters vermuten und ein mit der Entfernung feiner werdendes Rissmuster. Die numerischen Berechnungen von Güldemeister et al. [2012] lassen sich daher sehr gut mit den Ergebnissen der UST (Abbildung 5-7, rechts) vergleichen.

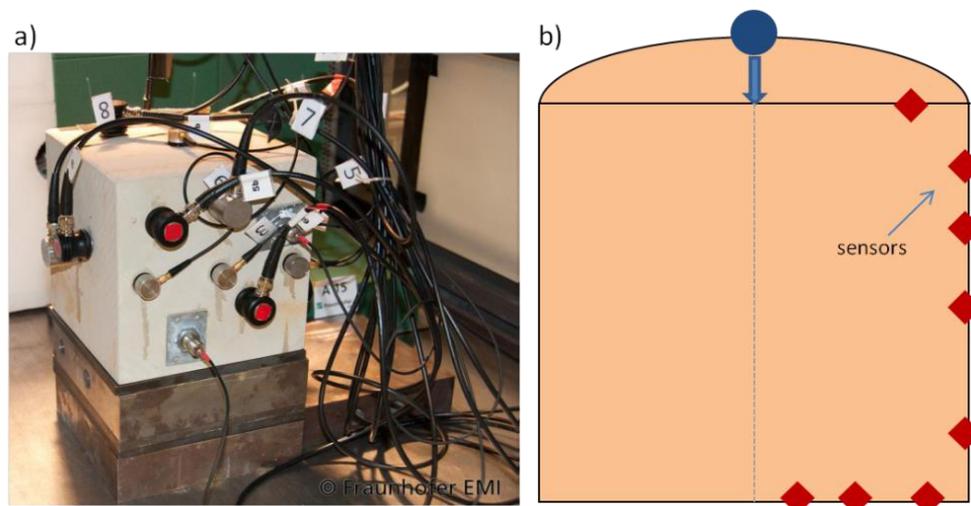


**Abbildung 5-7:** Links – Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Rissausbreitung und der makroskopischen Analyse an jeweils an einem Sandstein-Probekörper (Güldemeister et al. [2012]). Rechts – Zum Vergleich ein Schnittbild der Ultraschall-Tomographie. Die Farben der numerischen Berechnung und der Ultraschall-Tomographie sind invers zueinander.

Weitere Überlegungen zur Schädigungszone unterhalb von Impaktkratern werden von Pilkington und Grieve [1992] für terrestrische Krater durchgeführt. Sie geben für den Brent-Impaktkrater in Ontario (kristallines Gestein) eine Reduzierung der Kompressionswellengeschwindigkeit von 25 % an. Diese Reduzierung wird jedoch vor allem von einer allochthonen Breccie-Schicht und nicht durch fragmentiertes Gestein erzeugt. Für den Meteor-Krater wurden Änderungen bis zu 50 % (Ackermann und Godson [1975]) gemessen. Bei den MEMIN-Probekörpern kommt es im Quarzit zu der größten Reduzierung der Wellengeschwindigkeiten von 45 % und für den Sandstein von 20 % (siehe Anhang IV).

### 5.3 Wellenausbreitung: Numerik und Experiment

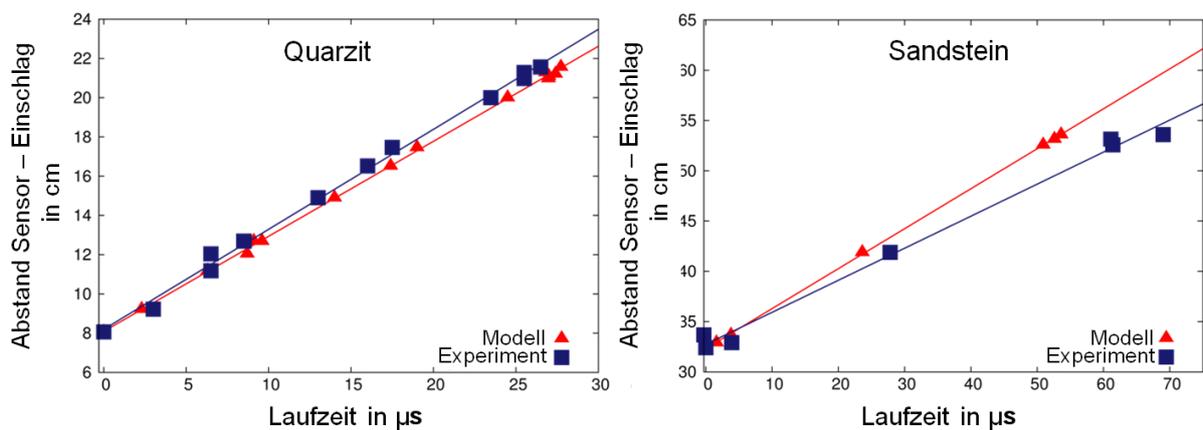
In Kapitel 4.3 wurden bereits die Unterschiede der Wellenausbreitung im Probekörper durch die Auswertung über Ultraschall (US) und Schallemissionsanalyse (SEA) gezeigt. Für eine verbesserte numerische Simulation der Impaktprozesse werden die experimentell gewonnenen Daten zum Vergleich herangezogen. Die experimentellen Daten sollen zur Verbesserung der numerischen Modelle in Projekt 5 beitragen. Für den Vergleich wurde neben den Experimenten auch eine Schallemissionsanalyse im numerischen Modell durch Nicole Güldemeister durchgeführt. Für die optimale Anpassung wurden die Sensoren im numerischen Modell in der gleichen Entfernung auf den virtuellen Probekörper verteilt wie bei den Laborexperimenten. Die exakte Position der Sensoren kann auf Grund des numerischen Modells nicht übernommen werden, da die numerischen Berechnungen auf einem Zylinder beruhen. Abbildung 5-8 zeigt einen exemplarischen Probekörper bei der SEA Messungen mit den darauf verteilten Sensoren und daneben die Verteilung der Sensoren in dem numerischen Modell. Für die Vergleiche werden ein nicht poröser Quarzit und ein poröser Sandstein in der Simulation verwendet. Für die Simulation der Impaktprozesse wird der multi-Material, multi-Rheologie Hydrocode iSALE verwendet (Güldemeister et al. [2013b], Moser et al. [2013b]).



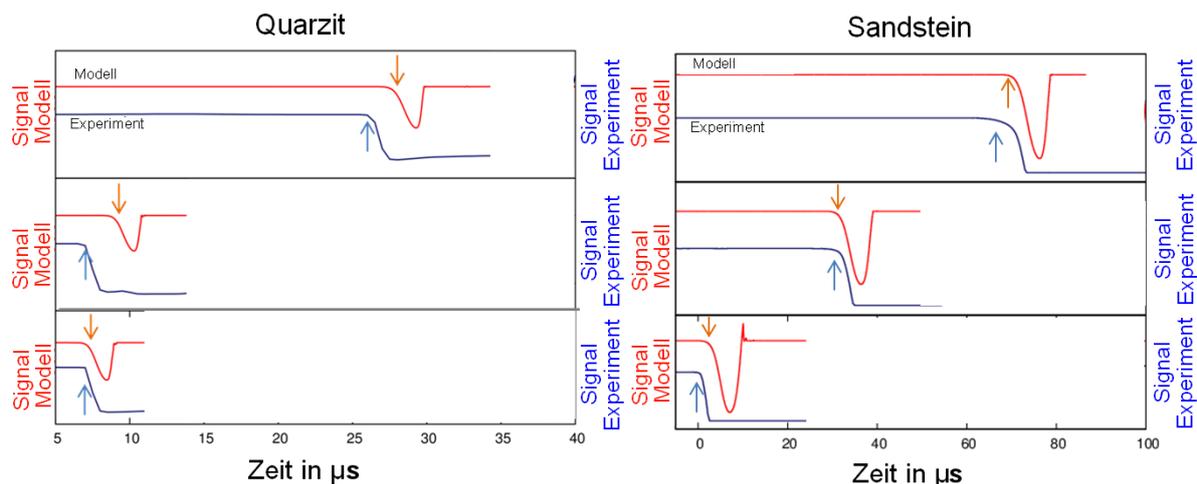
**Abbildung 5-8:** Gegenüberstellung der Sensorverteilung bei der Schallemissionsanalyse für die Laborexperimente an quadratischen Probekörpern (a) und die numerischen Berechnungen an Zylindern (b) (Güldemeister et al. [2013b]).

In Abbildung 5-9 werden die Laufzeitkurven für jeweils einen Quarzit und einen Sandstein aus den experimentellen und den numerischen Daten gezeigt. Für den Quarzit-Probekörper wird jeweils ein Probekörper mit 20 cm Kantenlänge verwendet. Der Sandstein-Probekörper hat für beide Fälle eine Kantenlänge von 50 cm. Beide

Kurven zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Für die numerische Berechnung bedeutet dies, dass die Anpassung durch die experimentellen Daten auch eine gute Vergleichbarkeit zu Impakten auf der Erde darstellen kann. Die gute Vergleichbarkeit der Daten wird auch in Abbildung 5-10 gezeigt. Dort wird für je einen Sandstein und einen Quarzit-Probekörper der Vergleich von Signalen dreier Sensoren aus der numerischen und der experimentellen SEA gezeigt. Die Daten stimmen sehr gut überein, einschließlich der Polarität des ersten Ausschlags. Für alle Sensoren ist der Wellengang negativ, was auf eine Druckkomponente schließen lässt.

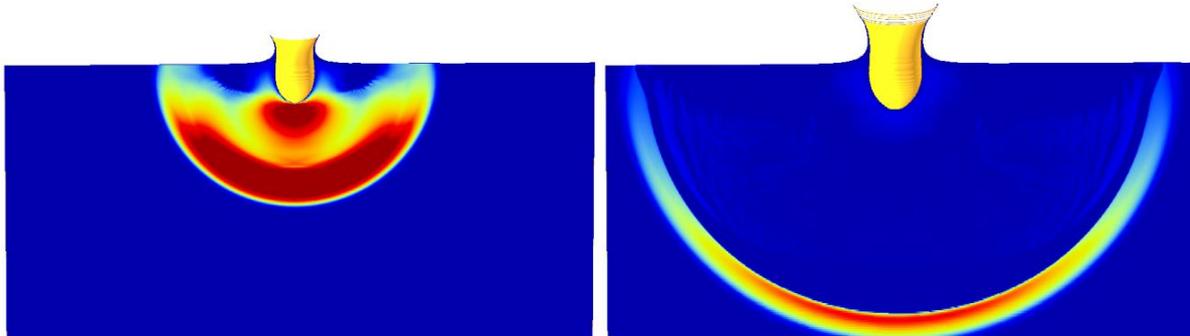


**Abbildung 5-9:** Vergleich der Wellenausbreitung der numerischen Berechnung (rote Dreiecke) und den experimentell ermittelten Daten aus der SEA (blaue Vierecke) in Quarzit (links) und Sandstein (rechts) (modifiziert nach Moser et al. [2013b] durch Güldemeister [2013c]).



**Abbildung 5-10:** Vergleich der experimentell gemessenen (blau) und numerisch erzeugten (rot) Signale. Die Ankunftszeiten für Quarzit (links) und Sandstein (rechts) stimmen gut überein (modifiziert nach Moser et al. [2013b] durch Güldemeister [2013c]).

In Kapitel 4.3 wurde bereits die geradlinige Ausbreitung der Welle analysiert. Die numerischen Daten lassen ebenfalls auf eine geradlinige Ausbreitung der Welle schließen. In Abbildung 5-11 wird numerisch eine solche Wellenausbreitung in zwei Schritten gezeigt.



**Abbildung 5-11: Simulation der Wellenausbreitung in einem Sandstein-Probekörper. Rot bedeutet, dass dort ein höherer Druck vorherrscht als im Umgebungsgestein (blau dargestellt) vorherrscht (persönlicher Kontakt: Güldemeister [2013c]).**

Der Vergleich von Laborexperimenten zu terrestrischen Kratern ist nicht einfach, aber durchaus möglich. Im Labor werden ideale Bedingungen erzeugt. Der Probekörper ist möglichst homogen, das Projektil eine Kugel und der Impakt entsteht in einem  $90^\circ$  Winkel zur Oberfläche. Auf der Erdoberfläche hingegen liegen Sedimente, magmatische oder metamorphe Gesteine vor. Des Weiteren sind etwa 70 % der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt. Ein terrestrischer Impakt erfolgt voraussichtlich auch nicht in einem  $90^\circ$  Winkel, sondern in einem spitzen Winkel zur Erdoberfläche. Außerdem kann der Meteorit bereits vor dem Aufprall auf der Erdoberfläche in mehrere Stücke zerbrochen sein. Zum Schluss muss bedacht werden, dass das Projektil aller Wahrscheinlichkeit nach keine Kugelform aufweist. Demnach ist der Vergleich von Laborexperimenten, numerischen Modellen und terrestrischen Daten bisher nur in der Anfangsphase und muss durch weitere Versuche und bessere Annäherungen weiter voran gebracht werden.

## 6. Diskussion

In dieser Arbeit wurden drei Messmethoden der zerstörungsfreien Prüfung in Zusammenhang mit einer spezifischen Schädigung in Naturmaterialien näher betrachtet. Zusätzlich wurden einige Computer-Tomographie (CT) -Messungen in Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen durchgeführt. Für alle Messmethoden kann vorab gesagt werden, dass bei ihrer Durchführung Ergebnisse erzielt wurden, jedoch unabhängig voneinander diskutiert werden sollten.

Die Schallemissionsanalyse (SEA) ist trotz ihres aufwendigen Aufbaus eine zielführende Methode. Da die Probekörper in einer Kammer mit Niederdruck (nahe Vakuum) positioniert sind, müssen die Sensoren dieser Umgebungssituation standhalten. Zusätzlich müssen die Kabel über die Kammerwand zu der Messeinheit geführt werden, ohne dass dadurch die Kammer undicht wird. Da der Probekörper während der Messung nicht einsehbar ist und auch die Messeinheit nicht überprüft werden kann, müssen vor dem Experiment ausführliche Tests gemacht werden, um zu überprüfen, ob die Messanlage alle Anforderungen erfüllt. Bei fast allen Experimenten konnten Daten aufgezeichnet werden, mit Ausnahme eines Experiments bei dem die Messanlage ausfiel. Nach weiterführenden Untersuchungen wurde die Samplingrate und somit die Auflösung der Daten herabgesetzt. Der Computer konnte daher die Aufzeichnung mit weniger Rechenaufwand durchführen und ein systembedingter Neustart konnte vermieden werden.

Für die Auswertung der Impaktsignale wurde die Aufzeichnung der Signale variabel für die Sensoren eingestellt. Das bedeutet, dass die Signale an einem Teil der Sensoren verstärkt wurden, um kleinere Signale zu registrieren, damit diese dann auch in der Signalcoda identifiziert werden können. Bei dem anderen Teil der Sensoren wurde auf eine Verstärkung verzichtet, da das Impaktsignal so stark war, dass es sich deutlich vom Rauschen abhob. Für die Weiterverarbeitung ist einerseits die Bearbeitung der Schwingungen mit der vollen Aufnahme der Amplitude als auch andererseits eine möglichst präzise Bearbeitung der weiteren Schwingungen mit geringeren lokalen Maxima notwendig. Für die beiden unterschiedlichen Anforderungen können die Messeingänge so eingestellt werden, dass nur innerhalb einstellbarer Spannungswerte die Signale aufgenommen werden. Ist innerhalb der aufgezeichneten Schwingung die Amplitude komplett dargestellt, kann damit auch eine Auswertung der Energie und der vorherrschenden Frequenzen durchgeführt werden. Eine solche Analyse wird hier nicht näher behandelt. In Anhang VII wird ein Ansatz für die Frequenzanalyse gezeigt.

Kleinere Risse, die durch den Impakt verursacht wurden, konnten nicht aus dem Signal gefiltert werden. Signale wie sie in Abbildung 4-4 (unten, S. 81) gezeigt werden, wurden zwar häufig gefunden, allerdings konnten diese nicht mit Hilfe des Lokalisierungsalgorithmus bestimmt werden. Die Ergebnisse können jedoch nicht

solchen Rissprozessen zugeordnet werden, sondern beruhen wahrscheinlich auf anderen Ursachen. Zum Beispiel wurden Quellen lokalisiert, die für alle drei Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  den Wert 10 cm haben oder es gab Lokalisierungen direkt auf einer der Oberflächen des Probekörpers. Bei diesen Signalen muss davon ausgegangen werden, dass es sich nicht um Risse, sondern um externe Störsignale handelt. Ein externes Signal kann zum Beispiel von einem herunterfallenden Sensor herrühren oder ein Geräusch, das durch den entstehenden Luftstrom verursacht wird. Die Signale können auch durch kleinere Erschütterungen von *Ejecta* auf dem Boden oder Ähnlichem stammen. Diese Vermutung wird unter anderem von der numerischen Auswertung solcher Impaktprozesse gestützt. Laut Hiermaier [2011] kann bei einem Probekörper mit einer Größe von 80 cm x 80 cm x 50 cm und einem Impakt mit einem Projektil von 1,2 cm Durchmesser aus Stahl und einer Geschwindigkeit von 4500 m/s nach etwa einer Millisekunde keine Drücke der direkten Welle oder anderen Spannungsentlastungen mehr gemessen werden. Dies würde bedeuten, dass alles, was nach der ersten Millisekunde an Signalen an den Sensoren registriert wird, entweder Reflektionen oder Multiplen des Impaktsignals oder externe Geräusche sind, die in der Kammer auftauchen, aber nicht genau benannt werden können. Natürlich muss hier auch bedacht werden, dass es sich um Naturmaterialien handelt, die sich nicht ideal verhalten. Es können durchaus Spannungen vorhanden sein, die erst später abgebaut werden und mit einer Rissentwicklung einhergehen.

Die Auswertung der Impakte kann dagegen sehr gut durchgeführt werden (Kapitel 4.1). Die Lokalisierung zeigt eine Übereinstimmung mit den Mittelpunkten der Krater (Tabelle 4-2, S. 85). Die größte Abweichung liegt im Millimeterbereich. Einzig für die wassergesättigten Probekörper wird eine größere Abweichung gemessen, da sich hier die Wellengeschwindigkeit durch die inhomogene Feuchteverteilung nicht homogen über den Probekörper verteilt. Dies führt bei den Berechnungen, die sich der Geschwindigkeit bedienen, zu großen Abweichungen und folglich zu großen Fehlerbalken. Wenn die Ergebnisse der Lokalisierung als richtig betrachtet werden, so darf die Formel von Melosh [1989] angezweifelt werden. Diese besagt, dass sich die Wellen erst unterhalb der Oberfläche nach Formel 4.1 (S. 87) ausbreiten. Hier muss vermutet werden, dass experimentelle Impakte und terrestrische Impakte unterschiedlich eingeordnet werden müssen, da mit größer werdendem Projektil auch die Impaktenergie steigt.

Mit der SEA wurde zusätzlich die Wellenausbreitung der direkten Welle betrachtet (Kapitel 4.3). In Anhang VI werden für alle Experimente die Gradienten der gemessenen Laufzeiten, auch für die gesättigten Probekörper, dargestellt. Für die trockenen Probekörper hat sich gezeigt, dass die Ausbreitung der Welle quasi linear verläuft (Kapitel 4.3). Trotz der Schichtung konnte keine elliptische Ausbreitung der Welle festgestellt werden. Dieses Ergebnis wurde zusätzlich von den Daten der Ultraschall-Tomographie (UST) unterstützt, die einen linearen Zusammenhang

zwischen Sensorabstand und Laufzeit zeigen. Für die wassergesättigten Probekörper konnte die lineare Ausbreitung nicht verifiziert werden. Dort hat sich kein eindeutiger Trend für die Ausbreitung gezeigt. Somit konnte für diese Probekörper auch nicht eindeutig die Wellengeschwindigkeit bestimmt werden, was sich wiederum auf die Lokalisierungsergebnisse auswirkte (Tabelle 4-2, S. 85).

Gute Ergebnisse werden mit der Ultraschall-Tomographie (UST) erzielt. Gerade die Betrachtung der Probekörper ohne und mit Schädigung bestätigt, dass sich eine Schädigungszone deutlich von der Umgebung abhebt. Es hat sich auch gezeigt, dass die Betrachtung der Probekörper vor dem Experiment sehr wichtig ist. Nur die Tatsache, dass der Probekörper auch schon vor dem Experiment starke Unterschiede in der Geschwindigkeitsverteilung aufweist, kann eine genauere Analyse der Schädigungszone zulassen. Ohne die Betrachtung vor dem Experiment würde die Schädigungszone als tiefer eingeordnet werden, als sie wahrscheinlich ist. Aber auch die UST weist noch einige systematische Mängel in der Durchführung und in der Auswertung auf. Bei der Durchführung werden zum Beispiel hohe Messfehler durch ein manuelles Versetzen der Sensoren in Kauf genommen. Da der Anpressdruck durch die manuelle Handhabung stark variiert, können die Signale nicht automatisch von einem entsprechenden Programm ausgewertet (*gepickt*) werden. Alle Ersteinsätze der Kompressionswelle wurden nachträglich per Hand nochmals überprüft und wenn nötig angepasst.

Ein zweiter Punkt ist die Messgenauigkeit der Methode. Für die hier untersuchten Probekörper liegt das Messraster im Bereich von einem Zentimeter. Dies entspricht 1323 Einzelmessungen für einen Probekörper mit 20 cm Kantenlänge. Je kleiner der Abstand im Messraster gewählt wird, desto besser wird die Auflösung. Auch eine Flächenmessung verbessert das Ergebnis deutlich, da so mehr Bereiche des Probekörpers abgedeckt werden. Allerdings erhöht sich so die Anzahl der Messungen in den Millionenbereich. Hierfür wäre ein automatisches Messsystem notwendig.

Aber nicht nur die Messung selbst kann noch optimiert werden, sondern auch die Auswertung. Bisher wird für die Auswertung immer der höchste Geschwindigkeitswert von drei sich kreuzenden Messungen (bei geraden Strahlenwegen) angenommen, da dieser Wert dem Tatsächlichen am nächsten kommt. Diese Annahme hat einen Nachteil. Obwohl im Bereich des Kraters keine Messungen durchgeführt werden und daher eine Geschwindigkeit von null angenommen wird, entsteht hier eine Geschwindigkeit die ungleich null und eventuell nahe den umliegenden Geschwindigkeiten ist. Im Bereich des Kraters befindet sich Luft und daher müsste eine Geschwindigkeit von circa 340 m/s vorherrschen. In diesem Bereich entsteht somit ein großer Fehler bei der Berechnung der Geschwindigkeitsdaten. Allerdings gibt es dort auch eine Materialabweichung vom Probekörper. Auch wenn der Probekörper mit einer Masse wie Epoxidharz ausgefüllt werden würde, und damit

Messungen im Bereich des Kraters möglich werden, ist hier das Problem der Materialabweichung immer noch vorhanden.

Dadurch, dass im Krater keine Messungen durchgeführt werden, entsteht ein Fehler für die Visualisierung der Schädigungszone. Unterhalb des Kraters werden alle Werte nur durch zwei Messungen berechnet, was eine eckige Darstellung unterhalb des Kraters und der Schädigungszone (im nicht gemessenen Bereich) nach sich zieht. Die UST ist also für einen Überblick sehr gut geeignet, jedoch ist sie auch an interessanten Stellen relativ ungenau.

Im Vergleich zu den auf der Computer-Tomographie (CT) basierenden Methoden zeigt die UST auch einen sehr viel größeren Bereich für die Schädigung. Dies hängt mit der Auflösung der Computer-Tomographie zusammen. Bei den radiographischen Verfahren wird eine Auflösung von  $140\ \mu\text{m}$  bzw. knapp  $60\ \mu\text{m}$  erreicht. Diese Auflösung wird für die feine Rissstruktur, die in dem Probekörper vermutet wird, noch zu gering sein. Gleichzeitig müsste dann angenommen werden, dass die UST mit einem Messraster von  $1\ \text{cm}$  erst recht eine zu geringe Auflösung hat. Bei US ist jedoch bekannt, dass die Wellen durch sehr viele kleine und feine Rissstrukturen deutlich stärker beeinflusst werden als bei einzelnen großen Rissen. Ist die Schädigung kleiner als die minimale Auflösung der CT-Messung, sind damit beide Verfahren ungeeignet, um eine gute Auflösung der Schädigung zu zeigen. Bezug nehmend auf die Motivation dieser Arbeit ist von Bedeutung, dass geophysikalische Messungen bei einem Krater mit einer Ausdehnung von mehreren Kilometern im Bereich der Auflösung der UST liegen. Für einen Krater mit  $60\ \text{km}$  Durchmesser (die Laborkrater der  $20\ \text{cm}$  Probekörper liegen bei  $6\ \text{cm}$ ) würde, für die gleiche Auflösung wie im Labor, ein Sensorabstand der Geophone von  $10\ \text{km}$  verwendet werden. In der Geophysik werden die Sensoren meist im Abstand von mehreren Metern (eventuell noch in  $100\ \text{m}$  Schritten) meist auf einer Linie installiert. Die Überdeckung der gesuchten Zone ist damit sehr viel besser. Allerdings wird in der Geophysik nur von der Oberfläche aus und eventuell noch in Bohrlöchern gemessen. Zusätzlich werden meistens nur einige Profile gemessen, sodass dann doch nicht eine solch gute Überdeckung wie bei der UST entsteht.

Die Modalanalyse zeigt die größten Probleme bei der Messung an den vorliegenden Probekörpern. Bei der richtigen Wahl der Geometrie ist diese Methode sehr zielführend und kann eine gute Aussage über die elastischen Parameter des Probekörpers geben. Ein großes Problem dieser Messung liegt aber schon in dem Ergebnis selbst. Das Ergebnis lässt lediglich eine Aussage über die elastischen Parameter für den gesamten Probekörper zu. Für die Probekörper, die hier betrachtet werden, liegt jedoch eine lokale Schädigung vor. Diese erstreckt sich radial um den Impaktkrater und nimmt mit der Entfernung ab. Mit dieser Methode gibt es keine örtliche Auflösung. Sind jedoch die Werte der Probekörper vor dem Experiment

bekannt, so kann ein Vergleich mit den Probekörpern mit Schädigung durchgeführt werden. Es kann mit der Modalanalyse eine Aussage über den Grad der Schädigung sowie über die prozentuale Reduzierung der Werte der elastischen Parameter gegeben werden.

Die hier verwendeten Probekörper sind Würfel, alle Kantenlängen sind gleich lang. Diese Geometrie ist nicht geeignet, um die Eigenschwingungsfrequenzen eindeutig anzuregen, sodass die hier gezeigten Ergebnisse nur schwer zu interpretieren sind (Kapitel 4.4). Messungen an einem Prisma und einem Würfel aus Sandstein, jeweils ohne Schädigung, haben deutliche Unterschiede in der Frequenzdarstellung und für die Ergebnisse der elastischen Parameter gezeigt. Die elastischen Parameter, die an dem Würfel gemessen wurden, weichen auch von den Literaturwerten ab (Kapitel 4.4). Dies lässt vermuten, dass die gemessenen Frequenzen keine genauen Aussagen über die Schwingungsformen der Würfel geben. Somit ist auch die prozentuale Abweichung der Werte zwischen ungeschädigten und geschädigten Probekörpern eher fragwürdig und nicht direkt vergleichbar. Zwar können deutliche Änderungen zu kleineren Frequenzen gezeigt werden, allerdings sind die Absolutwerte nicht gut untereinander vergleichbar und korrelieren auch nicht mit den Literaturwerten.

Wie aussagekräftig die Messmethoden sind, zeigt auch die Fehlerbetrachtung im folgenden Kapitelabschnitt.

## **6.1 Fehlerbetrachtung**

Die Fehlerbetrachtung ist ein sehr wichtiger Aspekt für die hier durchgeführten Messungen. Neben den Fehlern der Messtechnik, die nicht immer bekannt sind, müssen hier noch weitere Fehlerquellen bedacht werden, die nicht unbedingt erkennbar oder messbar und teilweise auch nicht nachvollziehbar sind.

Die Vergleichbarkeit aller Messungen, die hier gezeigt wurden, basieren auf gleichbleibenden Messbedingungen. Diese Voraussetzung ist jedoch nicht tatsächlich gegeben. Die Ergebnisse von Schallemissionsanalyse (SEA), Ultraschall-Tomographie (UST) und Modalanalyse sind unter anderem von den Eigenschaften der Kompressionswellengeschwindigkeit im untersuchten Material abhängig. Die Materialgeschwindigkeit ist wiederum von äußeren Einflüssen wie der Material- und Raumtemperatur sowie der vorherrschenden Feuchte im Material und der Luft abhängig. Dabei sind die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchte interessant, da diese die jeweiligen Werte des Materials beeinflussen. Letztlich bedeutet dies, dass für gleichbleibende Messvoraussetzungen bei allen Messungen die Temperatur und die Feuchte für Material und Umgebung gleich bleiben müssten. Durch nicht kontrollierte und geographisch wechselnde Räumlichkeiten (deutschlandweit) konnte dieser Punkt nicht eingehalten werden. Somit könnten Temperaturänderungen einen Einfluss auf

die UST-Messungen gehabt haben. Dies ist dann entscheidend, wenn für einen Probekörper zwischen dem Messbeginn und der Fertigstellung der Messung eine Pause von mehreren Tagen oder sogar Wochen entsteht. Auch ein Wetterumschwung kann zu einer schnell veränderten Feuchteverteilung führen. Der Fehler, entstehend durch Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen, kann nicht ohne Zusatzmessungen nachvollzogen oder reproduziert werden. Einige der Probekörper wurden zeitweise auch in einem Trockenschrank gelagert. Diese Probekörper zeigen damit eine reduzierte Feuchtigkeit im Gestein, die wiederum auch nicht gemessen worden ist.

Bei jeder Messmethode entstehen Fehler (insbesondere systembedingte Fehler), die nicht immer in die Auswertung mit einbezogen werden können. Für die SEA entstehen gleich mehrere Fehlerquellen. Die hier durchgeführten Experimente benötigen eine sehr lange Kabelauslage, um die Sensoren mit dem Transientenrekorder zu verbinden. Zusätzlich müssen die Kabel über Steckplätze durch die Wand geführt werden, sodass die Verbindung aus mehreren zusammengesetzten Teilabschnitten besteht. Auch wenn die Länge der Kabel keinen Einfluss auf den Datentransport haben sollte, kann es durchaus vorkommen, dass hier ein Teil der Informationen durch die Länge oder an den Kopplungsstellen (Dämpfungsverluste) verloren geht. Dieser Verlust ist nur sehr aufwendig nachvollziehbar. Testmessungen im Labor haben keinen erkennbaren Unterschied zwischen kurzen, langen und aneinander gekoppelten Kabeln gezeigt. Ganz ausgeschlossen werden kann diese Fehlerquelle damit jedoch nicht.

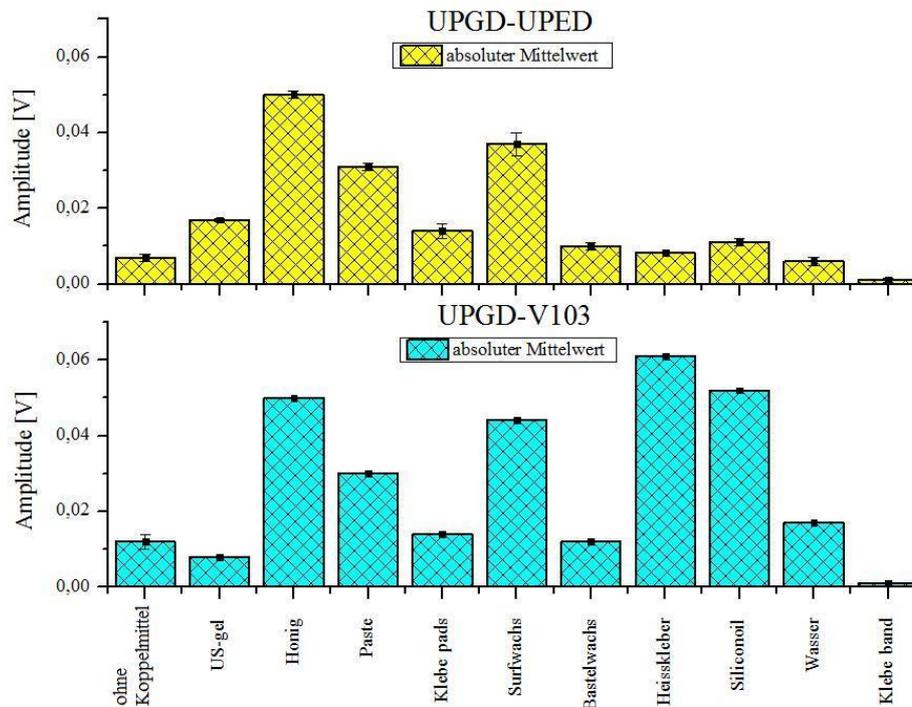
Eine weitere große Fehlerquelle, die nur teilweise berücksichtigt werden kann, liegt bei den Sensoren. Dieses Problem tritt letztlich bei allen mit Sensorik behafteten Messmethoden auf. Bei der SEA ist dieser Fehler jedoch besonders groß, da die Mess- und Koppelfläche der verwendeten V103 Panametrics Sensoren einen Durchmesser von 12,5 mm bzw. 14 mm haben. Diese Fläche ist im Vergleich zu der Kantenlänge der Probekörper (20 cm bis 80 cm) relativ groß. Für die kleinen Probekörper sind das immerhin 6,25 % der Kantenlänge. Bei den Sensoren, die auf der Impaktoberfläche befestigt sind und damit nur einen kurzen Laufweg von zum Beispiel 7 cm (Sensor 1 beim A3) haben, ist der Fehler sehr groß. Bei einem Abstand vom Impaktpunkt zum Mittelpunkt des Sensors liegt die Abweichung des Laufweges zum äußeren Punkt des Sensors immerhin bei knapp 9 %. Für die Wellengeschwindigkeitsberechnung handelt es sich bei einem solchen Fehler um 270 m/s bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 3000 m/s. Diese Abweichung erklärt unter anderem den nicht ganz linearen Gradienten in der Betrachtung der Wellengeschwindigkeit über die SEA Messergebnisse (Kapitel 4.3). Auch wenn die Sensorcharakteristik der V103 Sensoren relativ gut bekannt ist, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, an welcher Stelle des Sensors die Welle zuerst registriert wird. Ein zweiter Punkt in Bezug auf die Genauigkeit der Sensoren ist die exakte Platzierung an den abgemessenen Koordinaten. Hierbei kommt es zu Abweichungen im Millimeterbereich, die auch einen weiteren Einfluss auf den Abstand von Sensor zu Impakt haben. Hierbei spielen

auch die Abmessungen des Probekörpers eine Rolle. Kontrollmessungen mit dem Meterstab und Winkelmessungen haben deutlich gezeigt, dass die Probekörper teilweise nicht exakt geschnitten waren. Das heißt, dass die Kantenlänge nicht immer den Angaben entsprach und bei einigen Probekörpern an den Ecken nicht immer ein rechter Winkel vorhanden war.

Bei allen Messsystemen müssen unvermeidbare Störgeräusche ebenfalls als Fehlerquelle in Betracht gezogen werden. Diese können häufig nicht eindeutig identifiziert werden und beeinflussen daher die Messergebnisse. Bei den SEA-Messungen kommt es zum Beispiel kurz nach dem Schuss beim Impaktexperiment zu einem starken Luftzug, der durch den Druckausgleich zwischen Tank und Kammer entsteht und somit ein Störgeräusch darstellt. Weitere Störquellen sind zu Boden fallende Gesteinsstücke oder Sensoren. Durch die später eingesetzten Sensorhalterungen kommt es zusätzlich auch zu unerwünschten Dämpfungen, beziehungsweise können unerwünschte größere Signale entstehen. Die Halterungen sorgen dafür, dass die Sensoren an dem Probekörper befestigt bleiben. Dies beinhaltet allerdings auch, dass die Sensoren nicht mehr ganz frei schwingen können und so die Signale schneller gedämpft werden. Ein größeres Signal könnte durch die Halterungen entstehen, wenn die Energie des Impaktes so groß ist, dass sich der Sensor vom Probekörper löst und von der Halterung wieder an das Gestein gepresst wird. So entsteht am Sensor eine zusätzliche, unbeabsichtigte Schwingung in der Coda des Signals. Auch die angenommene Homogenität des Probekörpers wird durch die Halterungen und die dafür verwendeten Schrauben beeinflusst.

Eine sehr wichtige und bereits oft untersuchte Fehlerquelle ist die des Koppelmittels (hier Klebstoff zwischen Sensor und Probekörper). Hier gibt es unzählige Möglichkeiten an Materialien, die dazu verwendet werden können. Ein Allzweck-Koppelmittel gibt es nicht, da das Mittel immer auch an die Bedürfnisse der Messung und des Materials angepasst werden muss. Bei der SEA wird für die V103 Sensoren Heißkleber verwendet. Dieser eignet sich besonders gut, da die heiße Masse zwischen Sensor und Probekörper gegeben werden kann und durch gutes Anpressen des Sensors an den Probekörper die Schichtdicke des Heißklebers minimiert wird. Da der Heißkleber beim Erkalten fest wird, haftet der Sensor meist ohne Probleme an dem Probekörper. Die Schichtdicke des Heißklebers ist annähernd zu vernachlässigen. Einziges Problem dabei ist, dass bei zu hohen Impaktenergien der Kleber nicht mehr an der Oberfläche hält und abgelöst wird. Der Sensor ist nicht mehr an den Probekörper gekoppelt. Für die KRNB-PC Sensoren ist Heißkleber nicht geeignet. Durch den Aufbau des Sensors könnte der Heißkleber in das Innere des Sensors gelangen und die freischwingenden Elemente behindern. Aus diesem Grund werden die Sensoren in Halterungen geschraubt, die wiederum an dem Probekörper befestigt werden müssen. Als Koppelmittel wird hier Sekundenkleber auf die Oberfläche aufgetragen. Bevor der Sensor auf den Probekörper gesetzt wird, sollte der Kleber

ausgehärtet sein. Die glatte Oberfläche des Sekundenklebers sorgt für einen guten Kontakt zu dem Ankopplungspunkt des Sensors. Bei der UST wird dagegen Wachs verwendet.



**Abbildung 6-1: Amplitudenvergleich von Ultraschallmessungen mit verschiedenen Koppelmitteln an einem Sandsteinprisma (Lyalyuk [2012]).**

Innerhalb einer Seminararbeit wurden Messungen durchgeführt, in der die verschiedenen Koppelmittel getestet wurden (Lyalyuk [2012]), mit dem Ergebnis, dass Wachs nicht unbedingt das beste Koppelmittel darstellt. Trotzdem ist Wachs für die durchgeführten UST-Messungen das Koppelmittel erster Wahl. Keines der Koppelmittel ist immer ideal, Koppelmittel wie Öl oder Honig würden die Probekörperoberfläche komplett beschmutzen und daher nicht gewährleisten, dass der Probekörper wieder sauber wird. Bei Messungen an Plastikprobekörpern wäre dies zum Beispiel kein Problem, da der Probekörper danach wieder abgewaschen werden kann. Ultraschallgel hat sich bei den Gesteinsprobekörpern leider nicht bewährt, da der Probekörper dem Gel das Wasser sehr schnell entzogen hat. In Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 werden die unterschiedlichen Koppelmittel im Rahmen der Seminararbeit von Lyalyuk [2012] zur Ankopplung bei US-Messungen miteinander verglichen. In beiden Abbildungen werden die Kombinationen von zwei Sensorpaaren (UPED-UPGD und UPGD-V103) gezeigt. Abbildung 6-1 zeigt den Vergleich der Amplituden für jede Messung. Der kontinuierliche Anpressdruck ist hier nicht gegeben. Dennoch zeigt sich deutlich, dass sich Honig bei beiden

Sensorkombinationen als geeignet herausstellt. Nur der Heißkleber und das *Siliconoil* (Silikon-Öl) weichen in ihren Ergebnissen stark voneinander ab. Bei dem Vergleich der Laufzeiten in Abbildung 6-2 zeigt sich, dass die Wahl des Koppelmittels auch die Laufzeit beeinflusst. Die Abweichungen sind nur sehr gering, aber messbar. Das Koppelmittel sollte während einer Messperiode nicht gewechselt werden, wenn die einzelnen Messungen dieser Messperiode vergleichbar sein sollen.

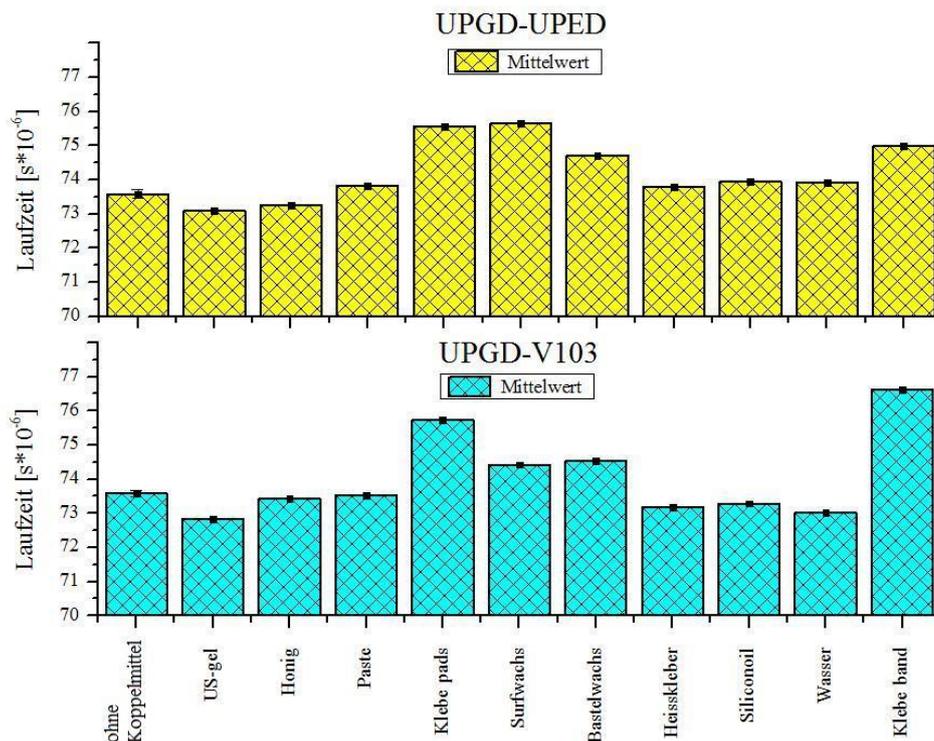


Abbildung 6-2: Vergleich von Laufzeitmessungen an einem Sandsteinprisma mit unterschiedlichen Koppelmitteln (Lyalyuk [2012]).

Eine Fehlerquelle, die auch bei den UST-Messungen auftritt, entsteht durch die Art der Berechnung (Kapitel 3.2.2). Für die Berechnung wird angenommen, dass drei gemessene Strahlen durch einen Punkt verlaufen. Die Messung mit der höchsten Geschwindigkeit verläuft dabei durch die wenigsten Verwerfungszonen oder Strukturveränderungen und hat damit die Geschwindigkeit, die der in diesem Punkt tatsächlichen Geschwindigkeit am nächsten kommt. Sie zeigt nicht die absolute Geschwindigkeit an. In Abbildung 4-10 (S. 91) wurde die Messung an einem Quarzit-Probekörper mit einer Keilform gezeigt. Der Riss scheint durchgehend zu sein. Dadurch kommt es bei der Geschwindigkeitsberechnung innerhalb des Keils zu einer reduzierten Geschwindigkeit. Die Messungen, die für die Punkte innerhalb des Keils verwendet werden, durchlaufen alle eine Störung der gleichen Größenordnung und suggerieren damit eine reduzierten Geschwindigkeit innerhalb dieses Bereiches.

Dieser Fehler kann nur durch eine komplette Tomographie bestimmt werden. Bei einer kompletten Tomographie werden auch Messungen durchgeführt, die nicht durch die Risse laufen, das heißt, dass eine höhere Geschwindigkeit innerhalb der Keilstruktur zu erwarten ist. Dadurch, dass im Bereich des Kraters keine Messungen für die UST gemacht werden, kommt es unterhalb des Kraters bei der Betrachtung der Ergebnisse zu einem Fehler. Die Schädigungszone erscheint rechteckig und nicht rund, wie angenommen wird. Die eckige Darstellung entsteht, weil in diesem Bereich die Geschwindigkeitsberechnung mit nur zwei Messwerten durchgeführt wird und nicht wie bei allen anderen Punkten mit drei Messwerten.

Bei den UST-Messungen müssen auch die verwendeten Frequenzen beachtet werden. Die minimale Abmessung bei der Darstellung eines Risses oder einer Gefügeveränderung innerhalb der Probekörper entspricht für die Ultraschallmessungen der halben Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) der ausgesendeten Ultraschallwelle (Ai und Ahrens [2004]). Kleine Strukturen können somit nur mit entsprechend großen Frequenzen gefunden werden. Eine zusätzliche Fehlerquelle ist, dass bei hohen Frequenzen auch die Streuung des Signals zunimmt. Das Signal wird im Probekörper durch Dispersion und Absorption verändert und kann im extremsten Fall den Probekörper nicht durchqueren. Für die UST wurde als Durchschallungsfrequenz 20 kHz verwendet. Dies entspricht nach Formel (3.11) (S. 27) einer Wellenlänge von 15 cm bei einer Wellengeschwindigkeit von 3000 m/s. Dies würde bedeuten, dass alles was kleiner als 15 cm ist, von der UST nicht registriert werden kann. Messungen mit der höchstmöglichen Frequenz von 350 kHz haben eine Wellenlänge von 0,8 cm. Auch diese Wellenlänge wäre noch zu groß für die gesuchten Risse. Tests haben jedoch zusätzlich gezeigt, dass das registrierte Signal bei 350 kHz ein sehr schlechtes ‚Signal zu Rausch‘ (S/N) - Verhältnis hat und daher für die Auswertung ungeeignet ist (siehe Winkler [2013]). Eine Überlegung für die Fehlerbetrachtung ist auch die Reproduzierbarkeit der Daten. Bei der Ultraschallprüfung ist es durchaus üblich eine Messung mehrfach zu wiederholen und damit einen Fehlerbereich teilweise zu bestimmen. Da die Wiederholung einer kompletten UST zu aufwendig wäre, wurden einzelne Messreihen mehrfach wiederholt. Damit kann dann ein Fehlerbereich für die komplette Messung abgeschätzt werden. Für die Überprüfung wurden Messungen an dem Sandstein-Probekörper (A3) in 3 cm Tiefe unterhalb des Kraters durchgeführt (Abbildung 6-3). Die Messungen zeigen deutlich, dass die Messreihen noch innerhalb der Schädigungszone liegen. Die einzelnen Kurven im Diagramm zeigen die zehn Wiederholungen der Messreihe. Die Messungen für die Fehlerabschätzung werden mit x3(1) bis x3(10) bezeichnet. Zusätzlich wird mit x3(UST) die Messung gezeigt, die für die Tomographie verwendet wurde. Die x3(UST)-Kurve weicht im Schnitt 1,4 % von den anderen Kurven ab. Die Form der Kurve ist jedoch sehr ähnlich. Diese Variation kann insbesondere auch dadurch entstehen, dass zwischen der UST-Messung und den Wiederholungsmessungen für die Reproduzierbarkeit einige Monate vergangen sind. Innerhalb dieser Zeit kann es (wie oben bereits erwähnt) zu

Geschwindigkeitsänderungen im Gestein z. B. durch Feuchte- und Temperaturunterschiede kommen. Die Standardabweichung der Wiederholungsmessungen liegt bei 1,1 %. Die maximale Abweichung beträgt 2,4 % (Dura [2013]). Die Reproduzierbarkeit der Messungen kann somit als sehr gut eingestuft werden, vorausgesetzt, die Messungen werden innerhalb kurzer Zeit durchgeführt, damit Feuchte- und Temperaturveränderungen minimal gehalten werden.

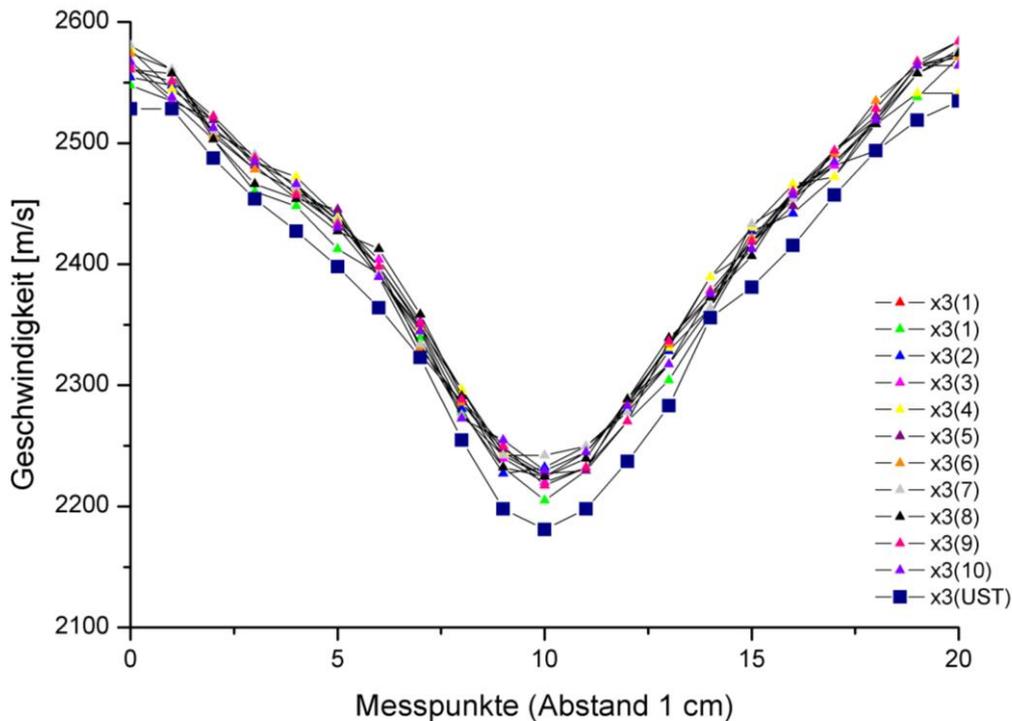


Abbildung 6-3: Ultraschall-Durchschallung entlang einer Messreihe. Zehn Wiederholungsmessungen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit (modifiziert nach Dura [2013]).

Auch bei der Modalanalyse sind einige Aspekte zu beachten, die zu systematischen Fehlern führen und nicht gemessen werden können. Eine Fehlerquelle wird durch den Beschleunigungssensor beigetragen. Dessen Masse ( $8,13 \pm 0,01$  g) beeinflusst die Schwingung des Probekörpers und wird letztlich bei der Berechnung für die elastischen Konstanten nicht berücksichtigt. Laut Jones und Façaoaru [1984] kann die Masse des Sensors vernachlässigt werden, sollte sie unter 3 % des Probekörpergewichtes liegen. Der leichteste Probekörper besteht aus Tuff mit ca. 13000 g. Dies entspricht 0,06 % der Masse des Tuffs für den Sensor. Eine zweite Fehlerquelle ist die Lagerung der Probekörper während der Messung. In den hier gezeigten Experimenten wurden die Körper ausschließlich auf Schaumstoff gelagert. Durch die große Masse der Probekörper war die Aufhängung über Nylonschnüre nicht möglich. Der Versuch

dickere Schnüre zu verwenden, hat zwar grundsätzlich funktioniert, hat sich jedoch nicht als praktikabel herausgestellt. Zudem haben mehrere Versuche gezeigt, dass die Unterschiede bei der Lagerung auf Pyramiden, Schaumstoff oder die Aufhängung mit den dickeren Schnüren kaum oder gar nicht messbar sind. Bei allen Lagerungen wird die Schwingung gedämpft, sodass nicht die exaktesten Werte erzielt werden können. Jedoch zeigen die Versuche an dem Sandsteinprisma deutlich, dass bei einer gut gewählten Geometrie, sehr gute Messergebnisse erzielt werden können.

Bei der Modalanalyse handelt es sich um die Messung von Resonanzschwingungen. Jede Schwingung in einem anisotropen Material mit endlicher Geometrie weist auch Effekte wie Beugung, Brechung, Reflektion und Dämpfung auf (Hertlin und Herkel [2003]). Diese Effekte sind nicht ohne weiteres messbar und wurden in den hier durchgeführten Messungen vernachlässigt.

Eine genauere Fehlerberechnung wird hier nicht durchgeführt, da für den Großteil der verwendeten Messsysteme leider keine Fehlerangaben durch den Hersteller verfügbar sind.

## 7. Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethode auf die Erfassung einer Schädigung unterhalb von Impaktkratern zu testen und weiter zu entwickeln. Dazu wurden drei verschiedene Methoden getestet. Die Schallemissionsanalyse (SEA) ist eine passive Prüfmethode während der Experimente. Die Ultraschall-Tomographie (UST) und die Modalanalyse dienen als aktive Prüfmethode für einen Vorher-Nachher-Vergleich der Probekörper. Zusätzlich wurden einige Untersuchungen mit Computer-Tomographie-Messeinrichtungen durchgeführt, die ähnlich den Ergebnissen der UST interpretiert werden. Eine weitere Messmethode, die Phasenspektroskopie, wird lediglich im Anhang erwähnt. Für diese Methode waren die Probekörper zu groß beziehungsweise zu dicht bei der vorhandenen Sensorik.

Für zukünftige Experimente ist es mit Sicherheit von Interesse, auch weiterhin Messungen während der Impaktexperimente auszuführen. Nur auf diese Weise ist es möglich, Daten aufzuzeichnen, die während der Schädigung entstehen. Durch die Auswertung solcher Daten kann etwas über die Art, den Ort und die Intensität der Quelle in Erfahrung gebracht werden. Messungen, die im Nachhinein gemacht werden, können bezüglich der Quelle, wenn überhaupt nur eine Aussage über den Ort machen. Um also möglichst viele Informationen über das eigentliche Ereignis zu erhalten, sind die Messungen während der Experimente unabdingbar. Für diese Messungen eignet sich die SEA gut. Alle Signale können aufgezeichnet werden, solange sie in einem bestimmten Frequenzbereich liegen. Im Anschluss können die Signale sehr genau analysiert und extrahiert werden. Nachteil dieser Methode bei Impaktexperimenten ist der hohe Energieanteil, der durch den Impakt freigesetzt wird. Das daraus resultierende Signal überlagert eventuelle Rissprozesse. Es ist daher wichtig, eine Methode zu finden, auch die kleineren Risse, die durch die Spannungsverschiebung in dem Probekörper auftreten, erfassen zu können. Im Anhang VII wird dafür bereits ein Ansatz geliefert. Die Analyse der Frequenzanteile kann die Veränderung der Risse aus dem kompletten Signal extrahieren, sodass auch diese lokalisiert werden könnten. Dazu müssen verschiedene Filter verwendet werden und das gesuchte Signal muss sich im Filterbereich befinden. Dieser Vorgang ist besonders schwierig, da der Frequenzbereich der Risse nicht bekannt ist und in den Impaktensignalen keine weiteren kleinen Signale, die eindeutig als Rissentstehung identifiziert wurden, ohne Filterung zu finden sind.

Für weitere Messungen sollte auch die Verteilung der Sensoren optimiert werden. Die Sensoren sollten von jeder Seite an dem Probekörper angebracht werden, also auch von unten auf der Ablagefläche. Damit wird die Lokalisierung erheblich verbessert. Zusätzlich ist es erforderlich die Anzahl der Sensoren zu maximieren, damit der Intensitätsbereich weiterhin variabel aufgezeichnet werden kann. Um jedoch die

Ergebnisse, wie ursprünglich vorgesehen, mit geophysikalischen Messungen an terrestrischen Kratern vergleichen zu können, ist es unbedingt erforderlich die Messungen an solche anzupassen. Aus diesem Grund sollten für folgende Experimente auch SEA-Messungen durchgeführt werden, bei denen Sensoren nur an der Impaktoberfläche angebracht werden. Dadurch sinkt zwar der Grad der Überdeckung der Sensoren über den Probekörper, jedoch entspricht dieser Aufbau eher einer geophysikalischen Messung. In der Geophysik wird nur von der Erdoberfläche aus gemessen und eventuell können Bohrlöcher in die Sensoranordnung mit einbezogen werden, sodass auch unterhalb der Erdoberfläche gemessen werden kann. Eine weitere Möglichkeit wäre der Beschuss einer Gesteinskugel, dann könnten ähnlich wie bei Erdbeben-Sensornetzwerken die Sensoren auf der gesamten Kugel verteilt werden. Hier würde jedoch die Größenordnung zwischen Projektil (Meteorit) und Probekörper (Erdoberfläche) nicht mehr stimmen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Befestigung der Sensoren an der Oberfläche. Teilweise wurden die Sensoren mit Kleber an der Oberfläche befestigt und teilweise sogar angeschraubt. In vielen Fällen ist der Kleber eine gute Möglichkeit die Sensoren an der Oberfläche zu befestigen ohne die Schwingfähigkeit der Piezoelemente, zumindest nicht wesentlich, zu beeinflussen. Bei den hier gezeigten Experimenten war jedoch die Energie zu hoch, sodass einige Sensoren einfach abfielen. Als Lösung dieses Problems wurden die Sensoren mit Rohrschellen an die Oberfläche angeschraubt (Abbildung 3-16). Hierbei besteht die Gefahr, dass die Sensoren nicht mehr frei schwingen können und damit schneller gedämpft werden. Daher sollte zum Beispiel eine Möglichkeit untersucht werden, die Sensoren möglichst fest anzubringen, ohne gleichzeitig eine Dämpfung zu erzeugen.

Für die Auswertung der Experimente mit Wassersättigung muss das Geschwindigkeitsfeld bekannt sein. Ist dieses nicht bekannt, so sollten Messungen an gesättigten und trockenen Materialien durchgeführt und so ein Geschwindigkeitsfeld angepasst werden. Eine Möglichkeit wäre auch die Auswertung über das am Lehrstuhl entstehende Lokalisierungsprogramm *Squirrel AE*. Dieses soll die Lokalisierung in einem unbekanntem Geschwindigkeitsfeld ermöglichen und wird im Rahmen der Arbeiten am ZIM Brandprojekt am Lehrstuhl für ZfP von Herrn Richter entwickelt.

Um die Wasserverteilung im Probekörper zu messen, wären auch Methoden mit elektromagnetischen Wellen denkbar. RADAR ist eine Möglichkeit. Mit einer *post-processing* (Nachbearbeitung) Technik können Messungen im ZfP-Bereich genauso wie geophysikalische Messungen bearbeitet werden. Hierbei ist die Wahl einer geeigneten Antenne von zentraler Bedeutung. Mikrowellen werden im Bauwesen oft dafür eingesetzt, Wasserstellen zu finden. Bei einer Antenne zwischen 2 GHz und 10 GHz können Tiefen bis zu 80 cm betrachtet werden. Die sogenannte NMR (Nuclear

Magnetic Resonance) Maus kann verwendet werden, um Feuchte innerhalb der ersten Zentimeter eines Probekörpers aufzufinden.

Eine weitere Methode zur Messung verschiedener Parameter innerhalb des Probekörpers sind entsprechende Sensoren. Diese können z. B. Feuchte, Temperatur und Druck messen. Jedoch ist dies nur dann interessant, wenn es sich um eigens hergestellte Probekörper handelt. Die Anbringung in Naturmaterialien ist damit verbunden, dass die Sensoren durch Zement oder Ähnlichem in einem Bohrloch untergebracht werden. Somit ist der Kontakt nur von einer Seite zum ursprünglichen Material gegeben und eine neu entstandene Heterogenität ist vorhanden.

Die UST zeigt bessere Ergebnisse als vorher angenommen. Ursprünglich sollte eine dreidimensionale Tomographie durchgeführt werden, bei der von jedem Messpunkt aus zu jedem anderen Messpunkt ein Ultraschallimpuls ausgesendet werden sollte. Dies würde mit Sicherheit eine bessere Auflösung ergeben als die Messungen, die in Kapitel 4.2 vorgestellt wurden. Die Frage ist hier jedoch, welche Auflösung für den Vergleich mit geophysikalischen Messdaten wichtig ist. Allgemein kann man sagen, dass das Messraster so dicht wie möglich gewählt werden sollte, da meistens auch sehr kleine Strukturen innerhalb der Probekörper gesucht werden. Für ein dichteres Messraster auf dem Probekörper sollten die Messungen in jedem Fall automatisiert werden. Der Messaufwand für diese Methode ist enorm hoch und zeitaufwendig. Auch die Nachbereitung der Messdaten ist sehr aufwendig. Aufgrund der (für eine automatische Pickung) meist schlechten Datenqualität durch eine hohe Absorption im Probekörper, müssen die Daten bisher manuell ausgewertet und für die Berechnung in das notwendige Datenformat übertragen werden. All diese Schritte würden durch eine Automatisierung wegfallen und die Messungen und Auswertungen vereinfachen. Die UST lieferte gute Ergebnisse mit einer guten Auflösung. Auch für andere Probekörper mit gesuchten lokalen Schädigungen kann die UST gute Ergebnisse liefern. Jedoch muss hier bekannt sein, ob es sich um eine Art Rissstruktur handelt, oder um einen größeren Defekt. Je nach Art der Schädigung muss die verwendete Frequenz angepasst werden. Tendenziell hat sich herausgestellt, dass die UST für feine Rissstrukturen empfindlicher ist als für größere Volumen (Moser und Grosse [2010], Moser et al. [2013], Winkler [2013]).

Zum Vergleich der Daten mit geophysikalischen Messungen im Feld sollte eine eventuell notwendige Größenanpassung berücksichtigt werden. Mit der Annahme von einem Krater mit 6 cm Durchmesser und einem Messraster von 1 cm würde die Hochskalierung bei einem Krater mit 6000 m Durchmesser bei einem Messraster von 1000 m liegen. Dies liegt durchaus im Bereich geophysikalischer Messungen, wenn auch das Raster meist durch Sensorauslagen (nur von der Erdoberfläche aus) deutlich kleiner gewählt wird. Für einen besseren Vergleich der Daten wäre es sinnvoll auch an den experimentellen Kratern Reflektionsmessungen durchzuführen. In der Geophysik

ist es nicht möglich an lokalen Stellen wie bei der SEA von allen Seiten zu messen. Die Seismologie wird zwar ähnlich wie die SEA angewendet, jedoch verteilen sich hierbei die Sensoren rund um die Erde. Einzig an einzelnen Bohrlöchern könnten seitliche Messungen durchgeführt werden. Eine Möglichkeit wäre hier die Impakt-Echo-Methode als zerstörungsfreies Prüfverfahren zu testen. Dies wäre ein guter Vergleich zur Hammerschlagseismik. Eine weitere Möglichkeit bietet die Methode Sampling Phased Array. Hierbei wird ein Prüfkopf mit mehreren Sensoren verwendet. Das Signal wird gebündelt von mehreren Sensoren in den Prüfkörper gesendet und dann an mehreren Sensoren registriert. Durch die Bündelung der Signale wird das Verhältnis vom Signal zum Rauschen (S/N-Verhältnis) verbessert. Die Methode funktioniert in Reflektion und ähnelt damit geophysikalischen Messungen an der Erdoberfläche.

Ähnlich der UST, betrachtet auch die Computer-Tomographie (CT) den Probekörper von allen Seiten. Diese Messung ist somit nicht auf geophysikalische Messungen anwendbar. Für die hier untersuchten Probekörper wurde die CT jedoch nur begleitend und nur an ausgewählten Sandstein-Probekörpern durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass das Material Sandstein für die CT eine zu hohe Dichte aufweist, um sehr gute Daten zu erhalten. Zusätzlich sind die Probekörper zu groß, weshalb die Auflösung bei einem Würfel mit 20 cm Kantenlänge maximal 140  $\mu\text{m}$  erreicht. Im Kapitel 4.5 wurde bereits erwähnt, dass der Probekörper auf einen Würfel mit 10 cm Kantenlänge zurechtgeschnitten wurde und damit eine Auflösung von knapp 60  $\mu\text{m}$  erreicht wurde. Die Auswertung der Bilder hat jedoch auch gezeigt, dass nur größere Risse direkt unterhalb der Krateroberfläche ausgemacht werden konnten. Diese liegen in dem Bereich, der auch bei den mikroskopischen Untersuchungen im MEMIN-Projekt 2 gefunden worden ist. Mit der UST wurde eine Schädigungszone gefunden, die deutlich tiefer reicht als bei der CT oder den mikroskopischen Analysen. Durch einzelne Risse, die mit der UST gefunden werden konnten, kann vermutet werden, dass die UST eine sehr gute Aussage über die Schädigung gibt. Zudem ist bekannt, dass eine Ultraschallwelle besonders stark von kleinen Rissen beeinflusst wird. Sollten weiter Messungen mit der CT durchgeführt werden, so müsste der Probekörper deutlich kleiner geschnitten werden. Eventuell könnten Untersuchungen an einer Reihe von Probekörpern durchgeführt werden, zum Beispiel 1 cm Blöcke von der Oberfläche in die Tiefe reichend, direkt durch den Krater. Damit wird die Auflösung der Messmethode maximiert. Eine dabei jedoch auftauchende Fehlerquelle entsteht beim Zerteilen der Blöcke. Durch das Sägen können neue Risse entstehen oder bereits vorhandene Risse geweitet und verlängert werden.

Die Modalanalyse hat Ergebnisse geliefert, mit denen eine Aussage über die Abnahme der elastischen Module durch die innere Schädigung möglich ist. Dabei hat sich herausgestellt, dass die hier verwendete Geometrie der Probekörper einen starken negativen Einfluss auf die Messungen ausübt. Die Messergebnisse sind teilweise nur

sehr schwer zu interpretieren und können nicht vollständig verwendet werden. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Messung wäre die Wahl einer anderen Geometrie für die Impaktexperimente. Jedoch muss auch bedacht werden, dass mit der Modalanalyse lediglich eine globale Schädigung beziehungsweise Abnahme der elastischen Module angegeben werden kann. Es muss also ein Weg gefunden werden, die elastischen Module auch lokal für Teilbereiche zu bestimmen. Das E-Modul kann auch über die Longitudinal- und die Scherwelle berechnet werden. Somit ist eine Möglichkeit, neben der UST aus der Wellengeschwindigkeit der Longitudinalwelle eine weitere Tomographie mit der Scherwelle durchzuführen und dann daraus das E-Modul zu berechnen. Die Modalanalyse kann nicht herangezogen werden, um eine geeignete Aussage für die Schädigung unterhalb von Impaktkratern bei würfelförmigen Probekörpern zu geben.

Eine Messmethode, die der UST sehr ähnlich ist, ist die Phasenspektroskopie, die hier nur kurz in Anhang IX erwähnt wird. Sie soll auch die Schädigungszone in einem Probekörper visualisieren, indem Messungen entlang eines Rasters durchgeführt werden. Die Schädigung wird sichtbar durch den gemessenen Phasenversatz der Ultraschallmessung der farb kodiert dargestellt wird. Durch eine Strukturänderung im Probekörper verändert sich der Phasenversatz gegenüber dem Umgebungsmaterial. Mit der vorhandenen Messtechnik konnten keine auswertbaren Ergebnisse an den hier verwendeten Probekörpern erzielt werden. Erst bei kleineren Probekörpern  $\leq 10$  cm konnten auswertbare Messungen angefertigt werden. Diese Methode zeigt somit ähnlich wie bei den CT-Messungen nur Ergebnisse bei kleineren Probekörpern. Es wäre damit möglich eine Messung an einem kleiner gesägten Block durchzuführen und das Ergebnis mit der UST zu vergleichen. Als Testprobekörper eignet sich der bereits zurechtgeschnittene Sandsteinblock A8, an dem erste Messungen durchgeführt worden sind.

## Literaturverzeichnis

**Ackermann, H. D. und Godson, R. H.**, A Seismic Refraction Techniques Used for Subsurface Investigations at Meteor Crater, Arizona. *Journal of Geophysical Research*, 80, S. 765-775, (1975).

**Ahrens, T. J. und Rubin, A. M.**, Impact-induced tensional failure in rock. *Journal of Geophysical Research*, 98, S. 1185-1203, (1993).

**Ahrens, T. J., Xia, K. und Coker, D.**, Depth of cracking beneath impact craters: New constraint for impact velocity. *Shock Compression of Condensed Matter 2001*, S. 1393-1396 (2001).

**Ai, H. und Ahrens, J.**, Dynamic tensile strength of terrestrial rocks and application to impact cratering. *Meteoritics and Planetary Science*, 39, S. 233-246, (2004).

**Ai, H.**, Shock-Induced Damage in Rocks: Application to Impact Cratering. California Institute of Technology, PhD Thesis, 178 Seiten, (2006).

**Aki, K. und Richards, P. G.**, Quantitative Seismology. University Science Books, Sausalito, USA, 700 Seiten, (1980).

**ASTM E 976-99**, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response. American Society for Testing and Materials, Techn. Ber., (1999).

**Augsburg, U.**, Versuch FP 14 Schallemissionsanalyse - Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum Teil A, 16 Seiten, (2013).

**Berckhemmer, H.**, Grundlagen der Geophysik. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 201 Seiten, (1990).

**Bergmann, L. und Schaefer, C.**, Lehrbuch der Experimentalphysik Vol. 1: Mechanik, Akustik, Wärme. W. de Gruyter, Berlin, Auflage 9, 1354 Seiten, (1974).

**Berthelot, J. M. und Robert, J. L.**, Modeling concrete damage by acoustic emission. *Journal of Acoustic emission*, 6, S. 43-60, (1987).

**Birch, F.**, The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars. *Journal of Geophysical Research*, 65, S. 1083-1102, (1960).

**Bücherl, T., Guo, J. und Gostomski, C. L. v.**, Radiography and Tomography Using Fission Neutrons The NECTAR facility. Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), S. 4022-4025 (2009).

**Bücherl, T., Gostomski, C. L. v., Breitzkreutz, H., Jungwirth, M. und Wagner, F. M.,** NECTAR - A fission neutron radiography and tomography facility. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 651, S. 4, (2011).

**Buhl, E., Poelchau, M. H., Dresen, G. und Kenkmann, T.,** Deformation of dry and wet sandstone targets during hypervelocity impact experiments, as revealed from MEMIN Program. Meteoritics and Planetary Science, 48, S. 16, (2013).

**Chillé, R.,** Bewertung der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton unter dem kombinierten Angriff von Frost-Tausalz und Chloriden. Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, Master, 162 Seiten, (2012).

**Deschauer, T.,** Parameteranalyse von Probekörpern bei Modalanalysemessungen. Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, Bachelor, 68 Seiten, (2013).

**Dinnebier, H.,** Persönliches Gespräch, (2012).

**Donofrio, R. R.,** Survey of Hydrocarbon-Producing Impact Structures in North America: Exploration Results to Date and Potential for Discovery in Precambrian Basement Rock. Oklahoma Geological Survey Circular, 100, S. 13, (1997).

**Dufresne, A., poelchau, M. H., Kenkmann, T., Deutsch, A., Hoerth, T., Schäfer, F. und Thoma, K.,** Crater morphology in sandstone targets: The MEMIN impact parameter study. Meteoritics and Planetary Science, 48, S. 21, (2013).

**Dura, M.,** Ultraschallmessungen an Meteoritenkratern. Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 53 Seiten, (2013).

**Ebert, M., Hecht, L., Deutsch, A. und Kenkmann, T.,** Chemical modification of projectile residues and target material in a MEMIN cratering experiment. Meteoritics and Planetary Science, 48, S. 16, (2013).

**Erfurt, W.,** Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit. Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 192 Seiten, (2002).

**Ferriere, L.,** MeteorImpactOnEarth.com. <http://www.meteorimpactonearth.com/meteorite.html>, 15.12.2013, (2011).

**Finck, F., Große, C. U., Ruck, H.-J. und Reinhardt, H.-W.,** Untersuchung der Schädigungszone einer Teilflächenlast auf Gestein, DGZfP-Jahrestagung, 5 Seiten, (2002).

**Finck, F.,** Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der Schallemissionsanalyse. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, 147 Seiten, (2005).

**Friese, M., Mielentz, F. und Wiggenhauser, H.**, Ultraschall-Linienarray zur Untersuchung von Betonbauteilen, DGZfP-Fachtagung Bauwerksdiagnose, 11 Seiten, (2008).

**Graff, K. F.**, Wave motion in elastic solids. Dover Publications, New York, 649 Seiten, (1975).

**Große, C. U. und Reinhardt, H. W.**, Basis for the determination of the elastic parameters in concrete referring to measurings of body and surface wave velocity. Otto-Graf-Journal, 4, S. 132-159, (1993).

**Große, C. U.**, Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Dissertation, 167 Seiten, (1996).

**Große, C. U., Finck, F., Kurz, J. H. und Reinhardt, H. W.**, Improvements of AE technique using wavelet algorithms, coherence functions and automatic data analysis. Construction and Building Materials, 18, S. 203-213, (2004).

**Große, C. U.**, Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 150 Seiten, (2005).

**Große, C. U. und Ohtsu, M.**, Acoustic Emission Testing, Basics for Research - Applications in Civil Engineering. Springer, 396 Seiten, (2008).

**Große, C. U.**, Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen - Möglichkeiten und Grenzen. VDI-Bautechnik, Jahressausgabe 2011/2012, S. 122-131, (2011).

**Güldemeister, N., Wünnemann, K. und MEMIN-Team**, The formation of meteorite impact craters - insights from laboratory experiments and numerical modeling. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 1, S. 8, (2012).

**Güldemeister, N., Wünnemann, K., Durr, N. und Hiermaier, S.**, Propagation of impact-induced shock waves in porous sandstone using mesoscale modeling. Meteoritics and Planetary Science, 48, S. 19, (2013a).

**Güldemeister, N., Moser, D., Wünnemann, K. und Grosse, C.**, Recording the seismic signal generated by hypervelocity impact in experiments and numerical models, Lunar and Planetary Science Conference 2Seiten, (2013b).

**Güldemeister, N.**, Persönlicher Kontakt, Abbildung, (2013c).

**Hertlin, I. und Herkel, T.**, Riss- und Gefügeprüfung mit akustischer Resonanzanalyse im Schall- und Ultraschallbereich für Kfz-Sicherheitsteile, DGZfP-Jahrestagung 2003, Seiten, (2003).

**Hiermaier, S.**, Power Point Präsentation, (2011).

**Hoerth, T., Schäfer, F., Thoma, K., Kenkmann, T., Poelchau, M. H., Lexow, B. und Deutsch, A.,** Hypervelocity impacts on dry and wet sandstone: Observations of ejecta dynamics and crater growth. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, S. 10, (2013).

**Housen, K. R. und Holsapple, K. A.,** Impact cratering on porous asteroids. *Icarus*, 163, S. 18, (2003).

**Jones, R. und Façoaru, I.,** Recommendation for the use of resonant-frequency method in testing concrete specimens. *Material and Structures*, 2, S. 4, (1984).

**Kenkmann, T., Wünnemann, K., Deutsch, A., Poelchau, M. H., Schäfer, F. und Thoma, K.,** Impact cratering in sandstone: The MEMIN pilot study on the effect of pore water. *Meteoritics and Planetary Science*, 46, S. 13, (2011).

**Kenkmann, T., Trullenque, G., Deutsch, A., Hecht, L., Ebert, M., Salge, T., Schäfer, F. und Thoma, K.,** Deformation and melting of steel projectiles in hypervelocity cratering experiments. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, S. 15, (2013).

**Kieffer, S. W.,** Shock metamorphism of the coconino sandstone at Meteor Crater, Arizona. *Journal of Geophysical Research*, 76, S. 25, (1971).

**Köppel, S.,** Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken. Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 174 Seiten, (2002).

**Kowitz, A., Schmitt, R. T., Reimold, W. U. und Hornemann, U.,** The first MEMIN shock recovery experiments at low shock pressure (5-12.5 GPa) with dry, porous sandstone. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, S. 16, (2013).

**Krause, M., Milmann, B., Mielentz, F., D.Streicher, Redmer, B., Mayer, K., Langenberg, K.-J. und Schickert, M.,** Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 27, S. 16, (2008).

**Krautkrämer, J. und Krautkrämer, H.,** Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Springer, Berlin, 5. Aufl., 1204 Seiten, (1986).

**Kuchling, H.,** Taschenbuch der Physik. Carl Hanser Verlag, Leipzig, 711 Seiten, (1980).

**Kurz, J. H.,** Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, Dissertation, 171 Seiten, (2006).

**Labusz, J. F., Chang, H. S., Dowding, C. H. und Shah, S. P.,** Parametric study of AE location using only four sensors. *Rock mechanics and rock engineering*, 21, S. 10, (1988).

**Langen, A.,** Ein Verfahren zur Konstruktion anwendungsoptimierter Ultraschallsensoren auf der Basis von Schallkanälen. Springer, Berlin, 156 Seiten, (1993).

- Lexow, B., Wickert, M., Thoma, K., Schäfer, F., Poelchau, M. H. und Kenkmann, T.**, The extra-large light-gas gun of the Fraunhofer EMI: Applications for impact cratering research. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, S. 5, (2013).
- Love, S. G., Hörz, F. und Brownlee, D. E.**, Target porosity effects in impact cratering and collisional distribution. *Icarus*, 105, S. 14, (1993).
- Lyalyuk, M.**, Genauigkeitsstudie von Ultraschallmessungen - Koppelmittel im Vergleich. Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, Seminararbeit, 38 Seiten, (2012).
- Lynnworth, L., Papadakis, E. P. und W.Rea**, Ultrasonic measurements of phase and group velocity using continuous wave transmission techniques. *CRT Reihe 73 Nr.*, 3 Seiten, (1973).
- Maji, A. K. und Shah, S. P.**, Prozess zone and acoustic-emission measurements in concrete. *Experimental Mechanics*, 28, S. 7, (1988).
- Malm, F.**, Schallemissionsanalyse am humanen Femur. Lehrstuhl Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, Masterarbeit, 113 Seiten, (2012).
- Malm, F.**, CAD-Abbildung eines Panametrics-Sensors, (2013).
- Manke, I., Hartnig, C., Kardjilov, N., Hilger, A., Lehnert, W. und Banhart, J.**, Neutronen-Radiographie und -Tomographie in der Brennstoffzellenforschung. *ZfP-Zeitung*, 109, S. 5, (2008).
- McLaskey, G.**, Stress Wave Source Characterization: Impact, Fracture, and Sliding Friction. University of California, Berkeley, Phd Thesis, 78 Seiten, (2011).
- McLaskey, G. C. und Glaser, S. D.**, Temporal evolution and 3D locations of Acoustic Emissions produced from the drying shrinkage of concrete. *Journal of Acoustic emission*, 25, S. 52-57, (2007).
- Melosh, H. J.**, Impact cratering: A geological process. New York: Oxford University Press, New York, 245 Seiten, (1989).
- Michael, G.**, X-Ray computed tomography. *Physics Education*, 36, S. 10, (2001).
- Moser, D.**, Lokalisierung mikroseismischer Daten aus Nordchile: Anwendung einer migrationsbasierenden Methode. *Geophysik*, Freie Universität Berlin, Diplomarbeit, 115 Seiten, (2009).
- Moser, D. und Grosse, C.**, Ultraschall-Tomographie von Rissstrukturen bei Meteoriteneinschlägen, *DGZfP-Jahrestagung*, 8 Seiten, (2010).

**Moser, D., Poelchau, M. H., Stark, F. und Große, C.**, Application of nondestructive testing methods to study the damage zone underneath impact craters of MEMIN laboratory experiments. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, S. 12, (2013).

**Moser, D., Güldemeister, N., Wünnemann, K. und Grosse, C.**, Acoustic Emission Analysis of Experimental Impact Processes in Comparison to Ultrasound Measurements and Numerical Modelling. *Journal of Acoustic emission*, S.????, (2013b) (accepted).

**Neukum, G., König, B., Fechtig, H. und Storzer, D.**, Cratering in the earth-moon system: Consequences determination by crater counting. *Lunar Science Conference 6th*, 3, S. 2597-2620 (1975).

**NGA World Geodetic System 1984 (WGS 84).** National Geospatial-Intelligence Agency, (1984).

**O`Connell, R. und Budiansky, B.**, Seismic velocities in dry and saturated crackes solids. *Journal of Geophysical Research*, 79, S. 15, (1974).

**Ohtsu, M., Shigeishi, M., Iwase, H. und Koyanagi, W.**, Determination of crack location, type and orientation in concrete structures by acoustic emission. *Magazin of Concrete Research*, 43, S. 8, (1991).

**Ohtsu, M.**, Damage evaluation in freezing and thawing test of concrete by elastic-wave methods. *Material and Structures*, 44, S. 1725-1734, (2011).

**Ono, K.**, Trends of recent acoustic emission literature. *Journal of Acoustic emission*, 12, S. 22, (1994).

**Osterloh, K., Fratzscher, D., Zscherpel, U., Ewert, U., Hasenstab, A., Bücherl, T. und Schillinger, B.**, Partielle Tomographie mit Neutronen zur Beurteilung von Leimschichten in Holz, DGZfP-Jahrestagung, 6 Seiten, (2011).

**Ouyang, C., Landis, E. N. und Shah, S. P.**, Damage assesment on concrete using quantitative acoustic emission. *Journal of Engineering Mechanics*, 117, S. 17, (1991).

**Pesonen, L. J.**, The Impact Cratering Record of Fennoscandia. *Earth, Moon, and Planats*, 72, S. 17, (1996).

**Pilkington, M. und Grieve, R. A. F.**, The Geophysical Signature of Terrestrial Impact Craters. *Reviews of Geophysics*, 30, S. 21, (1992).

**Poelchau, M. H., Kenkmann, T., Thoma, K., Hoerth, T., Dufresne, A. und Schäfer, F.**, The MEMIN research unit: Scaling impact cratering experiments in porous sandstone. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, S. 15, (2013a).

**Poelchau, M. H.**, Persönliche Kommunikation, Information zu Gesteinsmerkmalen bei MEMIN-Experimenten, (2013b).

- Polanskey, C. A. und Ahrens, T. J.**, Impact spallation experiments: Fracture patterns and spall velocities. *Icarus*, 87, S. 16, (1990).
- Richter, R.**, Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung. Diplom, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 121 Seiten, (2009).
- Ritter, J. R. R., Shapiro, S. A. und Schechinger, B.**, Scattering parameters of the lithosphere below the Massif Central, France, from teleseismic wavefield records. *Geophysical Journal International*, 134, S. 187-198, (1997).
- Roddy, D. J., Boyce, J. M., Colton, G. W. und Dial, A. L. J.**, Meteor Crater, Arizona, rim drilling with thickness, structural uplift, diameter, depth, volume, and mass-balance calculation Proceedings. 6th Lunar Science Conference, S. 2621-2644 (1975).
- Rosat, S., Sato, T., Imanishi, Y., Hinderer, J., Tamura, Y., McQueen, H. und Ohashi, M.**, High-resolution analysis of the gravest seismic normal modes after the 2004  $M_w = 9$  Sumatra earthquake using superconducting gravimeter data. *Geophysical Research Letters*, 32, S. L13304, (2005).
- Roth, H.**, PowerPoint Vortrag, (2009).
- Ruck, H.-J.**, Application of the ultrasound phase spectroscopy on construction materials. *Otto-Graf-Journal*, 14, S. 14, (2003).
- Sachse, W. und Kim, K. Y.**, Quantitative acoustic emission and failure mechanics of composite materials. *Ultrasonics*, 25, S. 9, (1987).
- Schechinger, B.**, Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Schädigung von Stahlbeton. Institut für Bastatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 149 Seiten, (2005).
- Schickert, M., Krause, M. und Müller, W.**, Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. *Journal of Materials in Cevil Engineering*, 15, S. 12, (2003).
- Schickert, M. und Hillger, W.**, Ein Ultraschall-Multikanal-Messsystem mit SAFT-Rekonstruktion für die Abbildung von Betonbauteilen, DGZfP-Jahrestagung 2009, 10 Seiten, (2009).
- Schifferli, C.**, Material Archiv - Quarzit. <http://www.materialarchiv.ch/detail/301#/detail/301/quarzit>, 15.12.2013, (2008-2013a).
- Schifferli, C.**, Material Archiv - Tuff. <http://www.materialarchiv.ch/detail/416#/detail/416/tuff>, 15.12.2013, (2008-2013b).
- Schillinger, B. und Bücherl, T.**, Neutronen sehen, was Röntgenstrahlen verborgen bleibt. *ZfP-Zeitung*, 89, S. 8, (2004).

**Schwarzkopf, J.**, CAD-Abbildung eines Impakt-Probekörpers mit Sensoren (Panametrics und Glaser), (2013).

**Shearer, P.**, Introduction to Seismology. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 408 Seiten, (1999).

**Shoemaker, E. M.**, Meteor Crater, Arizona. Geological Society of America Centennial Field Guid, Rocky Mountain Section, S. 6, (1987).

**Sommer, F., Reiser, F., Dufresne, A., Poelchau, M. H., Hoerth, T., Deutsch, A., Kenkmann, T. und Thoma, K.**, Ejection behavior characteristics in experimental cratering in sandstone targets. Meteoritics and Planetary Science, 48, S. 17, (2013).

**Spies, M. und Rieder, H.**, Dreidimensionale Ultraschall-Tomographie an schwer prüfbar strukturellen Werkstoffen (Mi.2.A.1), DGZfP-Jahrestagung 2009, 8 Seiten, (2009).

**Spray, J. und Elliot, B.**, Earth Impact Database. [http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/;](http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/) <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html>, 15.12.2013, (2011).

**Stoessel, R., Kiefel, D., Oster, R., Diewel, B. und Prieto, L. L.**,  $\mu$ -Computed Tomography for 3D Porosity Evaluation in Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP), International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, 7 Seiten, (2011).

**Stück, H., Forgó, L. Z., Rüdrieh, J., S.Siegsmund und Török, Á.**, The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. Environmental Geology, 56, S. 15, (2008).

**Stück, H., Siedesmund, S. und Rüdrieh, J.**, Weathering behaviour and construction suitability of dimension stones from the Drei Gleichen area (Thuringia, Germany). Environmental Earth Sciences, 63, S. 24, (2011).

**Telford, W. M., Geldart, L. P. und Sheriff, R. E.**, Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 770 Seiten, (1990).

**Trächtler, A.**, Tomographische Methoden in der Meßtechnik. Fortschritt-Bericht VDI Reihe 8 Nr., 114 Seiten, (2001).

**Udias, A.**, Principle of Seismology. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 475 Seiten, (1999).

**Vogel, H.**, Gerthsen Physik. Springer, 1262 Seiten, (1995).

**Weiler, B. und Große, C. U.**, Elastic Constants - Their dynamic measurements and calculation. Otto-Graf-Journal, 6, S. 116-131, (1995).

**Winkler, L.**, Ultraschall-Tomographie - Eine Studie über die Messgenauigkeit. Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 45 Seiten, (2013).

**Wünnemann, K.**, Persönlicher Kontakt, Screenshot aus einem Video zum Vergleich experimenteller und numerischer Daten, (2013).

**Xia, K. und Ahrens, T. J.**, Impact induced damage beneath craters. *Geophysical Research Letters*, 28, S. 3, (2001).

**Zeis, S., Gajewski, D. und Prodehl, C.**, Crustal structure of southern Germany from seismic refraction data. *Tectonophysics*, 176, S. 28, (1989).

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Querschnitt eines Impaktkraters. Gezeigt wird ein Krater ( $\varnothing \approx 20$ cm, nicht komplett abgebildet) in einem Sandstein-Probekörper (50 cm x 50 cm x 50 cm). Sehr deutlich ist die kompakte Zone an der Krateroberfläche zu erkennen. Unterhalb des Kraters ist eine fast parallel verlaufende Rissausbreitung zu sehen. ....	1
Abbildung 1-2: Verteilung der zur Zeit bekannten Impaktkrater auf der Erdoberfläche (Ferriere [2011]).....	4
Abbildung 1-3: Schematischer Aufbau einer Leichtgaskanone des Ernst-Mach-Institutes (deutsche Version aus Lexow et al. [2013]).....	9
Abbildung 1-4: Oben: Vereinfachter schematischer Überblick einer zweistufigen Leichtgaskanone. Unten: Experimenteller Aufbau der MEMIN Experimente in der Targetkammer. Jeweils von oben betrachtet und nicht skaliert (modifiziert nach Poelchau et al. [2013a]).....	10
Abbildung 1-5: Quarzit-Probekörper, der mit einem Krahn aus der Targetkammer der XLLGG herausgehoben wird. Die Kantenlängen betragen hier 80 cm x 80 cm x 40 cm und das Gewicht liegt bei etwa 665 kg..	11
Abbildung 1-6: Links: <i>Ejecta</i> -Fänger zum Auffangen der beim Impact ausgeworfenen Bruchstücke ( <i>Ejecta</i> ). Teilweise mit Vaseline (links) und Blumensteckmasse (rechts). Rechts: Auftragen der farbigen Zielscheibe für den Impact (vorne im Bild) und Anbringung der Sensortechnik für die Schallemissionsanalyse (hinten im Bild). ....	12
Abbildung 1-7: Blick auf die XLLGG. Zu sehen ist hier die Öffnung der Pulverkammer, in die das Beschleunigungspulver eingefüllt wird (Hoerth et al. [2013]).....	13
Abbildung 1-8: Drei Probekörper aus den drei unterschiedlichen Materialien. Von links nach rechts: Trockener Seeberger Sandstein mit Krater nach dem Experiment; Trockener Taunus Quarzit vor dem Experiment mit Zielscheibe; Wassergesättigter Weiberner Tuff vor dem Experiment mit Zielscheibe und befestigten Sensoren.....	14
Abbildung 1-9: Bruchstück vom Meteoritengestein Campo del Cielo (ca. 6 kg, 18 cm x 10 cm x 10 cm) (links), angefertigtes Projektil (10 mm Kugel, Campo del Cielo) für ein Impaktexperiment (Mitte) und ein Stück des Projektils nach dem Impact (rechts).....	16
Abbildung 1-10: Ultraschall-Messungen an einem Meteoriten (s. Abbildung 1-9, links). Durch unterschiedlich starke Oxidation an der Oberfläche entsteht eine große Spanne an Messwerten. ....	17
Abbildung 1-11: Vergleich zwischen experimentell erhaltenen Daten (links) und numerischer Berechnung (rechts) des Impaktes (persönlicher Kontakt: Wünnemann [2013]).....	18
Abbildung 2-1: Geologische Karte des Meteor Kraters in Arizona mit seismischen Profilen (Ackermann und Godson [1975]).....	21
Abbildung 3-1: Schwingungsformen der Kompressionswelle (links) und Scherwelle (rechts) (Berckhemmer [1990]).....	25
Abbildung 3-2: Experimenteller Aufbau in der Targetkammer an der XLLGG. Von links nach rechts: in einem Holzkasten eingebauter <i>Ejecta</i> -Fänger, Sandstein- Probekörper mit an der Oberfläche platzierten Ultraschall-Sensoren. ....	29
Abbildung 3-3: Prinzipskizze zur Erklärung von aktiven und passiven ZfP-Techniken (Große und Ohtsu [2008]). ....	33
Abbildung 3-4: Prinzip für die Messkette der Schallemissionsanalyse. Der Weg über die Kammerwand ist abhängig vom Versuchsaufbau.....	37
Abbildung 3-5: Grafische TransAX Oberfläche. Oben: Kurvenanzeige für die gemessenen Schallemissionen. Die Abszisse zeigt die Zeit in Sekunden, die Ordinate die Amplitude in Volt. Unten: In dem Control Panel können die Messparameter für jeden Kartensteckplatz (A1-A8 und B1-B8) sowie generelle Einstellungen wie Aufnahmebedingungen und Trigger eingestellt werden. ....	38
Abbildung 3-6: Piezoelektrische Ultraschallsensoren. Links: Panametrics-NDT V103 Olympus mit $\varnothing=12$ mm Messfläche. Rechts: Glaser-type KRNBB-PC mit Quasi-Punktkontakt. ....	39

Abbildung 3-7: Abmessungen bzw. Prinzipskizze eines KRNB-PC Sensors (Datenblatt, angepasst).....	40
Abbildung 3-8: Frequenzverhalten für einen V103 (links, (Richter [2009])) und für einen KRNB-PC, ermittelt aus vier verschiedenen Versuchen (rechts, (McLaskey [2011])). .....	41
Abbildung 3-9: Großaufnahme der Kabelformate. Microdot-Anschluss für KRNB Sensoren (links) und BNC-Anschluss für V103 Sensoren (rechts).....	42
Abbildung 3-10: Targetkammer der SLGG am EMI in Freiburg mit der Möglichkeit ein Vakuum zu erzeugen.	44
Abbildung 3-11: Ein Blick in das Innere der SLGG Targetkammer mit Sandstein- Probekörper, SEA Sensorik und <i>Ejecta</i> -Fänger im Hintergrund.....	44
Abbildung 3-12: Aufbau der SEA Messtechnik außerhalb der XLLGG Targetkammer. Von links nach rechts: Blitzlicht (EMI), Hochgeschwindigkeitskamera (EMI), SEA Messtechnik mit Transienten-Rekorder (TUM) und Vorverstärker (TUM). .....	44
Abbildung 3-13: Ein Blick in das Innere der begehbaren XLLGG Targetkammer mit Sandstein Probekörper und SEA Sensorik. Um den Probekörper herum ist ein Holzkasten zum Auffangen des ausgeworfenen Materials. Unten links ist ein Steg zum Schutz der Kabel zu sehen. ....	45
Abbildung 3-14: V103 Sensor für die SEA mit einer großen Menge Heißkleber für eine bessere Fixierung an der rauen Oberfläche. ....	46
Abbildung 3-15: Abgefallener Sensor durch hohen Energiegehalt der durchlaufenden elastischen Welle. ....	46
Abbildung 3-16: Extrahalterung für eine bessere Fixierung der V103 Sensoren.....	47
Abbildung 3-17: Halterung für die KRNB-PC Sensoren, hier zusätzlich mit Schrauben am Probekörper fixiert. ....	47
Abbildung 3-18: Sensorhalterung für die Sensoren in den Bohrlöchern. Hier nach einem Experiment mit teilweise gesättigtem Sandstein. Durch das Sandstein-Wasser-Gemisch kommt es zu starken Verschmutzungen der Sensorik. ....	48
Abbildung 3-19: Äußere Fixierung der Halterung für einen Bohrloch-Sensor.....	48
Abbildung 3-20: Schematische Darstellung des direkten Laufweges einer Welle und des angenommenen Laufweges einer Welle im dreidimensionalen Raum, beeinflusst durch die Heterogenität des Prüfobjektes.....	52
Abbildung 3-21: Schematische Darstellung zur Erläuterung von A-, B- und C-Scan in der Ultraschalltechnik. Oben: Versuchsschema; Unten: Ergebnisdarstellung (Große [1996])......	53
Abbildung 3-22: Geotron Sensoren. Ein Sensor fungiert als Geber (UPG-D) und ein Sensor als Empfänger (UPE-D). Die Kontaktfläche an der Spitze beträgt bei beiden etwa 2-3 mm im Durchmesser.....	55
Abbildung 3-23: Typische Messkette der Ultraschall-Tomographie. ....	56
Abbildung 3-24: Typisches Ultraschall-Signal eines Sandstein-Probekörpers aus der Ultraschall-Tomographie, dargestellt mit dem <i>SmartPick</i> Programm. Auf der Ordinate ist die Amplitude und auf der Abszisse die Zeit aufgetragen. Der rote Cursor zeigt den Zeitpunkt der untersuchten Welle an. ....	56
Abbildung 3-25: Prinzip zur Berechnung der Ultraschall-Tomographie-Darstellung. Die rote, blaue und grüne Linie stellen jeweils eine Durchschallungsmessung dar, die Dreiecke die Positionen der Sensoren. ....	58
Abbildung 3-26: Beispiele für die Richtungscharakteristik von Ultraschallaufnehmern, gemessen von Langen [1993] (oben) und Große [1996] (unten). ....	58
Abbildung 3-27: Verlauf einer Linienmessung bei der Ultraschall-Tomographie. Das Sensorpaar wandert entlang des Messrasters von einer Kante zur gegenüberliegenden Kante (Dura [2013]). ....	59
Abbildung 3-28: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Anregung der Longitudinalschwingung (oben), der Torsionalschwingung (Mitte) und der Flexurschwingung (unten). 1 bezeichnet den Erregerimpuls, 2 den Probekörper und 3 den Beschleunigungssensor (modifiziert nach Jones und Façoaru [1984]). ....	62
Abbildung 3-29: Zwei Formen einer stehenden Welle zur Erklärung von Knotenpunkten bei der Schwingungsanalyse. Je nach Schwingungsmode gibt es eine andere Anzahl an Schwingungsknoten, an denen keine Auslenkung stattfindet. Die Knoten verteilen sich symmetrisch auf die gesamte Strecke. Die Länge ist hier mit L benannt (Jones und Façoaru [1984]). ....	63

Abbildung 3-30: Zwei Impulshämmer (links) und zwei Beschleunigungssensoren (rechts). Die Hammergröße ist abhängig von der zu messenden Frequenz. Der linke Sensor arbeitet triaxial und der rechte Sensor uniaxial. ....	66
Abbildung 3-31: Messkette der Modal- bzw. Schwingungsanalyse.....	67
Abbildung 3-32: Sandsteinprisma, gelagert auf Schaumstoff. Die Anordnung von Hammer und Sensor ist geeignet um eine flexurale Schwingung anzuregen und aufzunehmen. ....	69
Abbildung 3-33: Eigenschwingungen eines Würfelraumes. Die Schwingungsbäuche sind hell, die Knoten dunkel dargestellt. Die Zahlen geben die Anzahl der Bäuche in den drei Raumrichtungen, die Gesamtzahl der Knoten und die Eigenfrequenzen als Vielfache der Grundfrequenzen an (Vogel [1995]). ....	70
Abbildung 3-34: Schematischer Aufbau einer Computer-Tomographie-Anlage mit Röntgenquelle. Die Röntgenröhre sendet die Strahlen in Richtung des planaren Detektors. Dazwischen liegt der Probekörper, der sich auf einer Rotationsachse um 360° drehen kann. Auf dem Detektor werden die durch den Probekörper veränderten Strahlen aufgenommen (modifiziert nach Moser et al. [2013])...	71
Abbildung 3-35: Erklärung zur Bildauflösung in der Computer-Tomographie. Jedes Pixel in einem zweidimensionalen Bild wird als dreidimensionales Voxel interpretiert (Michael [2001]).....	72
Abbildung 3-36: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen von Röntgenstrahlen (oben) und Neutronen (unten) (verändert nach Manke et al. [2008]).....	73
Abbildung 3-37: Blick in die Messkammer der Computer-Tomographie von GE. ....	74
Abbildung 4-1: CAD Modelle von Probekörpern. Links – 50 cm x 80 cm x 80 cm Probekörper (E1) mit Bohrlöchern für Sensoren. Rechts – 20 cm x 20 cm x 20 cm Probekörper (A3) (in Zusammenarbeit mit Malm [2013] und Schwarzkopf [2013]).....	77
Abbildung 4-2: Typisches Signal einer Schallemissionsanalyse. Hier wird das Signal eines Impaktexperiments an einem Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge gezeigt. Die Impaktenergie lag bei 838,50 J (A3, Tabelle 1-2). Das Zeitfenster beträgt 0,004 s. ....	78
Abbildung 4-3: Datenausschnitt eines Impaktsignals von acht Sensoren über 4 ms. Die Aufzeichnung wurde im Bereich $\pm 50$ V aufgezeichnet. Alle acht Signale sind innerhalb der ersten 0,3 ms bei den Sensoren angekommen (modifiziert nach Moser et al. [2013b]).....	79
Abbildung 4-4: Drei Amplitudendarstellungen zur Verdeutlichung der Signaldynamik. Oben: Vier Sensoren im Bereich von -55 V bis 55 V in einem Zeitfenster von 0,31 s. Mitte: Zeigt das gleiche Zeitfenster wie oben, aber der Amplitudenbereich wurde verkleinert (-1 V bis 1 V). Unten: Zusätzlich zum Amplitudenbereich wurde das Zeitfenster auf 0,9 s bis 0,115 s verkleinert. ....	81
Abbildung 4-5: Links – Schematische Erklärung des Bleistiftminentests (Hsu-Nielsen-Quelle). Über die Bleistiftminen wird ein Teflon-Schuh gesetzt, sodass ein 30° Winkel zur Oberfläche entsteht (Augsburg [2013]). Rechts – Praktische Durchführung eines Bleistiftminentests an einem Sandstein-Probekörper. ....	83
Abbildung 4-6: (a) dreidimensionale Darstellung der Bleistiftminentest Ergebnisse an einem Sandstein mit 20 cm Kantenlänge (Positionierung entspricht der Aufstellung im Experiment). Braune Fünfecke: Sensorpositionen auf der Oberfläche der Probekörper. Grüne Dreiecke: Quellkoordinate der Bleistiftminenbrüche. Rote Kugeln: Lokalisierung vor dem Impaktexperiment. Blaue Kugeln: Lokalisierung nach dem Impaktexperiment. Die Punkte und Linien dienen der Orientierung und sind farblich an die Koordinaten der Lokalisierung angepasst. (b)-(d) 2-dimensionale Darstellung der Bleistiftminentests. (b) y-z Ebene, (c) x-z Ebene und (d) x-y Ebene. ....	84
Abbildung 4-7: Darstellung von sechs Lokalisierungsergebnissen (A5, A6, A20, A22, A24 und A25, siehe Tabelle 4-2) im Vergleich zu den gemessenen Kratermittelpunkten. Gezeigt werden hier nur die oberen vier Zentimeter (modifiziert nach Moser et al. [2013b]). ....	86
Abbildung 4-8: Sandstein-Probekörper mit 30 cm Kantenlänge. Die Schichtung ist schon übergeordnet (hier horizontal) sichtbar. Oben rechts ist die Schichtung schematisch eingezeichnet. Zusätzlich sind Färbungen durch Wassereinlagerungen und zusätzlichen Mineralen erkennbar (vorwiegend vertikal). ....	88

Abbildung 4-9: Sichtbare Schichtung im Quarzit (20 cm Kantenlänge), die hier parallel zu den deutlich sichtbaren Rissstrukturen verläuft. ....	88
Abbildung 4-10: Drei Seitenansichten eines Quarzit-Probekörpers (Block A21) jeweils auf der linken Seite und drei Seitenansichten der dazugehörigen Ultraschall-Tomographie an der Oberfläche auf der rechten Seite. Hier sind deutlich die Bruchkanten eines Keils im Block zu erkennen. Von oben nach unten: Bruchkante rechts, Bruchkante links, Bruchkante unten links. ....	91
Abbildung 4-11: Ultraschall-Tomographie eines Quarzit-Probekörpers (Block A20) nach dem Impaktexperiment. Der Krater ist mittig im Gestein (oben, rechts) und in dem Ultraschall-Tomographie-Bild gut sichtbar (oben, links). An der linken äußeren Kante (unten, rot unterzeichnet) ist ein Riss erkennbar, der auch bei der Ultraschall-Tomographie mit einer reduzierten Geschwindigkeit gefunden wurde. ....	92
Abbildung 4-12: Drei Schnittbilder von drei verschiedenen Ultraschall-Tomographie-Messungen an ungeschädigten Probekörpern. Oben: Sandstein; Mitte: Quarzit; Unten: Tuff. In allen Bildern wird die x-z-Ebene bei $y = 10$ cm dargestellt. Die prozentualen Geschwindigkeitsunterschiede liegen bei ca. 9 % (Sandstein), ca. 10 % (Quarzit) und ca. 10 % (Tuff). ....	94
Abbildung 4-13: Sandstein A3 mit Impaktkrater. Oben: 3D Ansicht mit Interpolationsschritten beschriftet (links), y-z-Ebene (rechts). Unten: x-z-Ebene (links), x-y-Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt. ....	95
Abbildung 4-14: Quarzit A20 mit Impaktkrater. Oben: 3D Ansicht (links), y-z-Ebene (rechts). Unten: x-z-Ebene (links), x-y-Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt. ....	97
Abbildung 4-15: Tuff A25 mit Impaktkrater. Oben: 3D Ansicht (links), y-z-Ebene (rechts). Unten: x-z-Ebene (links), x-y-Ebene (rechts). Alle Ebenen treffen sich im Kratermittelpunkt. ....	98
Abbildung 4-16: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Sandstein mit 20 cm Kantenlänge (A3). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca. $v = 2400$ m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca. $v = 2600$ m/s). ....	102
Abbildung 4-17: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Quarzit mit 20 cm Kantenlänge (A20). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca. $v = 5050$ m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca. $v = 5000$ m/s). ....	103
Abbildung 4-18: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Tuff mit 20 cm Kantenlänge (A24). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca. $v = 2100$ m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca. $v = 2300$ m/s). ....	104
Abbildung 4-19: Betrachtung der Wellenausbreitung in einem Sandstein mit 50 cm Kantenlänge (D3). Aufgetragen ist die Entfernung vom Sensor zum Impaktpunkt über der gemessenen Laufzeit von der Quelle zum Sensor. Oben: Ultraschall-Tomographie (ca. $v = 2800$ m/s). Unten: Schallemissionsanalyse (ca. $v = 3150$ m/s). ....	105
Abbildung 4-20: Schwingungsbilder der Modalanalyse an einem ungeschädigten Sandstein mit 20 cm Kantenlänge. a) und b) zeigen die Maximalauslenkungen einer Torsionalschwingung. c) und d) zeigen die Maximalauslenkungen der Flexuralschwingung (Moser et al. [2013]). ....	106
Abbildung 4-21: Frequenzdarstellung der Eigenmoden für einen Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge mit (dunkelgrau) und ohne (hellgrau) Schädigung (modifiziert nach Moser et al. [2013]). ....	107
Abbildung 4-22: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines ungeschädigten Sandstein-Probekörpers. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot). ....	108
Abbildung 4-23: Modellierter Modalanalyse eines Quaders mit den Eigenschaften eines Seeberger Sandsteins. Oben links werden die gefundenen Schwingungsmoden mit den dazugehörigen Frequenzen gezeigt, daneben ist das Koordinatenkreuz mit der Orientierung der Quader. Die Abbildungen zeigen drei verschiedene Schwingungsmoden. Jeweils links ist die Farbskala, die die Intensität der Auslenkung beschreibt, wobei rot die maximale Dehnung und blau die minimale Dehnung definiert. ....	109

Abbildung 4-24: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines ungeschädigten Quarzit-Probekörpers. Hier wird nur die Flexural- (blau) und die Longitudinalschwingung (grün) gezeigt. ....	110
Abbildung 4-25: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines ungeschädigten Tuff-Probekörpers. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot).....	111
Abbildung 4-26: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines geschädigten Sandsteins. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot). ....	112
Abbildung 4-27: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines geschädigten Quarzits. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot). ....	112
Abbildung 4-28: Ergebnisse der Schwingungsanalyse eines geschädigten Tuffs. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot). ....	113
Abbildung 4-29: Ergebnis der Schwingungsanalyse eines Sandsteinprismas. Flexural- (blau), Longitudinal- (grün) und Torsionalschwingung (rot). ....	114
Abbildung 4-30: Modellierter Modalanalyse eines Prismas mit den Eigenschaften eines Seeberger Sandsteins. Ganz oben werden die gefundenen Schwingungsmoden mit den dazugehörigen Frequenzen gezeigt, daneben ist das Koordinatenkreuz mit der Orientierung der Prismen. Die Abbildungen zeigen vier verschiedene Schwingungsmoden. Links ist die Farbskala, die die Intensität der Auslenkung beschreibt, wobei rot die maximale Dehnung und blau die minimale Dehnung definiert. ....	116
Abbildung 4-31: Zwei Schnittbilder einer Radiographie Messung am WIWeB. Gezeigt wird ein Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge. Die Auflösung beträgt circa 140 $\mu\text{m}$ . Die weißen Pfeile deuten auf sichtbare Rissstrukturen (Moser und Grosse [2010]) (gemessen am WIWeB). ....	119
Abbildung 4-32: Schnittbild unterhalb der Krateroberfläche mit Frontalblick auf den Krater. Rings um den Krater sind kleinere Rissstrukturen erkennbar (gemessen vom WIWeB). ....	120
Abbildung 4-33: Zwei Schnittbilder einer Radiographie-Messung an einem Sandstein-Probekörper mit 10 cm Kantenlänge. Die Auflösung liegt hier bei 50 $\mu\text{m}$ (gemessen von GE). ....	121
Abbildung 4-34: Links: Originalschnittbild aus Abbildung 4-33 (unten) mit weißem Kasten, der den Detailblick rechts markiert. In der Detailansicht ist ein schwacher Schatten innerhalb der weißen Ellipse zu erkennen, der als Riss interpretiert werden kann (gemessen bei GE). ....	122
Abbildung 4-35: Ergebnis der Computer-Tomographie bei EADS. Dreidimensionales Bild der Krateroberfläche mit Querschnitt im Kraterbereich (gemessen bei EADS). ....	122
Abbildung 4-36: Zwei Schnittbilder der Computer-Tomographie bei EADS. Ein paar Risse nahe der Krateroberfläche sind gut erkennbar. Das schlechte Signal-zu-Noise-Verhältnis lässt jedoch keine genaue Interpretation zu (gemessen von EADS). ....	123
Abbildung 4-37: Radiographische Aufnahme eines Sandstein-Probekörpers mit NECTAR. Jeweils mit einem Blickwinkel von 0°. Links wird die Messung ohne zusätzliche Bearbeitung gezeigt. Rechts wurde mit einem Filter gearbeitet (gemessen vom Institut für Radiochemie der TUM). ....	124
Abbildung 5-1: Abhängigkeit zwischen dem Kratervolumen und dem Schädigungsvolumen für drei verschiedene Materialien. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert. ....	126
Abbildung 5-2: Abhängigkeit zwischen der Schädigungstiefe und der Impaktenergie für drei verschiedene Materialien. Die Abszisse mit der Energie ist logarithmisch dargestellt. ....	126
Abbildung 5-3: Abhängigkeit der normierten Schädigungstiefe und der Impaktenergie für verschiedene Impaktexperiment Studien (modifiziert nach Moser et al. [2013]. ....	129
Abbildung 5-4: Blick auf zwei Schnittebenen zweier Sandstein-Probekörper (100 cm x 100 cm x 50 cm). Der Krater ist gut erkennbar (Oben: trockener Sandstein, $\varnothing \approx 25$ cm und 5,6 cm tief; Unten: wassergesättigter Sandstein, $\varnothing \approx 28$ cm und 4,5 cm tief). Unterhalb des Kraters wurden verschiedene Risse rot markiert (Kenkmann et al. [2011]). ....	132
Abbildung 5-5: Makroskopische Analyse der Rissmuster unterhalb eines experimentell erzeugten Impaktkraters (Polansky und Ahrens [1990]).....	132
Abbildung 5-6: Mikroskopische Analyse der Schädigungszone (shear fracture zone) unterhalb eines MEMIN-Probekörpers aus Sandstein. Gezeigt wird nur ein kleiner Bereich des Kraters (Buhl et al. [2013]). ...	132

Abbildung 5-7: Links – Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Rissausbreitung und der makroskopischen Analyse an jeweils an einem Sandstein-Probekörper (Güldemeister et al. [2012]). Rechts – Zum Vergleich ein Schnittbild der Ultraschall-Tomographie. Die Farben der numerischen Berechnung und der Ultraschall-Tomographie sind invers zueinander. ....	133
Abbildung 5-8: Gegenüberstellung der Sensorverteilung bei der Schallemissionsanalyse für die Laborexperimente an quadratischen Probekörpern (a) und die numerischen Berechnungen an Zylindern (b) (Güldemeister et al. [2013b]). ....	134
Abbildung 5-9: Vergleich der Wellenausbreitung der numerischen Berechnung (rote Dreiecke) und den experimentell ermittelten Daten aus der SEA (blaue Vierecke) in Quarzit (links) und Sandstein (rechts) (modifiziert nach Moser et al. [2013b] durch Güldemeister [2013c] ). ....	135
Abbildung 5-10: Vergleich der experimentell gemessen (blau) und numerisch erzeugten (rot) Signale. Die Ankunftszeiten für Quarzit (links) und Sandstein (rechts) stimmen gut überein (modifiziert nach Moser et al. [2013b] durch Güldemeister [2013c]. ....	135
Abbildung 5-11: Simulation der Wellenausbreitung in einem Sandstein-Probekörper. Rot bedeutet, dass dort ein höherer Druck vorherrscht als im Umgebungsgestein (blau dargestellt) vorherrscht (persönlicher Kontakt: Güldemeister [2013c]). ....	136
Abbildung 6-1: Amplitudenvergleich von Ultraschallmessungen mit verschiedenen Koppelmitteln an einem Sandsteinprisma (Lyalyuk [2012]). ....	144
Abbildung 6-2: Vergleich von Laufzeitmessungen an einem Sandsteinprisma mit unterschiedlichen Koppelmitteln (Lyalyuk [2012]). ....	145
Abbildung 6-3: Ultraschall-Durchschallung entlang einer Messreihe. Zehn Wiederholungsmessungen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit (modifiziert nach Dura [2013]). ....	147
Abbildung 0-1: Dreidimensionale Ansichten der mit Ultraschall-Tomographie gemessenen Probekörper. ....XX	
Abbildung 0-2: FFT der ersten drei Sensoren aus Abbildung 4-3. Die Abszisse wird in MHz dargestellt, für die Ordinate wurde die lineare Darstellung für den Energieanteil gewählt. ....	XXXIII
Abbildung 0-3: T-Form für die Modalanalyse. Links: Abmessungen der Form ohne Höhenangabe. Rechts: Einer der Probekörper mit Messraster und Sensor oben links (Deschauer [2013]). ....	XXXIV
Abbildung 0-4: Frequenzdarstellung der gemessenen Schwingungen des T-Trägers. Es sind eindeutige Spitzen zu erkennen. Im unteren Bereich wird der Phasenverlauf gezeigt, hier durch sehr viele Messungen nur schwer erkennbar (Deschauer [2013]). ....	XXXV
Abbildung 0-5: Schwingungsbilder für die Flexurschwingung (links) und die Torsionalschwingung (rechts) (Deschauer [2013]). ....	XXXV
Abbildung 0-6: U-Form für die Modalanalyse. Links: Abmessungen der Form ohne Höhenangabe. Rechts: Einer der Probekörper mit Maßstab (Deschauer [2013]). ....	XXXVI
Abbildung 0-7: Schwingungsbilder für die Flexurschwingung (oben) und die Torsionalschwingung (unten). ....	XXXVI
Abbildung 0-8: Würfel mit 4 cm Kantenlänge. Von links nach rechts: Probekörper, Schwingungsbild der Torsionalschwingung, Schwingungsbild der eventuellen Longitudinalschwingung. ....	XXXVI
Abbildung 0-9: Würfel mit Kantenlänge 4 cm x 4 cm x 1 cm. Von links nach rechts: Probekörper, Schwingungsbild der Torsionalschwingung, Schwingungsbild der Flexurschwingung. ....	XXXVII
Abbildung 0-10: Oben: Probekörper (links) und Schwingungsbild der Flexurschwingung (rechts). Unten: Schwingungsbild der Longitudinalschwingung (links) und der Torsionalschwingung (rechts). ....	XXXVII
Abbildung 0-11: Aufbau der Phasenspektroskopie mit Messrechner, Netzwerkanalysator und Sensoren (links) und den Sensoren und einem Probekörper (rechts). ....	XXXIX
Abbildung 0-12: Phasenspektroskopie Messung an acht verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlicher Temperaturbehandlung. Die Temperaturen sind in der Legende abzulesen. ....	XXXIX
Abbildung 0-13: Messergebnisse der Phasenspektroskopie für einen Sandstein mit 20 cm Kantenlänge ohne Schädigung. ....	XL
Abbildung 0-14: Messergebnisse der Phasenspektroskopie für einen Sandstein mit 10 cm Kantenlänge mit Schädigung. ....	XLI

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Kompressionswellengeschwindigkeiten (in m/s) der drei verwendeten Probekörper in allen drei Raumrichtungen. Der Sandstein hat eine Kantenlänge von 50 cm, hier wurden nur Messungen in der Mitte der Probekörper durchgeführt. Der Quarzit und Tuff haben jeweils eine Kantenlänge von 20 cm, die Daten stammen hier aus der Ultraschall-Tomographie.....	15
Tabelle 1-2: Schussparameter für die Laborexperimente .....	19
Tabelle 3-1: Spezifische Eigenschaften der verschiedenen Probekörper und Projektile.....	29
Tabelle 4-1: Koordinaten der Bleistiftminentests. Wahrer Quellort (Q), Lokalisierung vor (V) und nach (N) dem Experiment.....	85
Tabelle 4-2: Vergleich der numerisch lokalisierten Quellorte der Kratermittelpunkte projiziert auf die Oberfläche und der Berechnung durch Melosh [1989]. .....	85
Tabelle 4-3: Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen mit UST (vor dem Experiment) und SEA (während des Experiments) für vier verschiedene Probekörper mit drei verschiedenen Materialien, berechnet aus den Gradienten der Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19. ....	101
Tabelle 4-4: Auflistung der Frequenzen für die Grundswingungsmoden von ungeschädigten und geschädigten Materialien sowie eines Prismas und der numerischen Berechnung für den Sandsteinblock.....	117
Tabelle 4-5: Auflistung der aus den Frequenzen berechneten elastischen Module von ungeschädigtem und geschädigtem Material sowie eines Prismas und deren numerischen Berechnung. ....	117
Tabelle 4-6: Prozentualer Abfall der elastischen Module für die drei geschädigten Materialien. Quarzit kann nur mit den Literaturwerten verglichen werden.....	118
Tabelle 5-1: Schädigungstiefe und weitere Parameter für Impaktexperimente verschiedener Studien (Fortsetzung, nächste Seite). .....	127
Tabelle 5-2: Übersicht zum Verhältnis des Kraterdurchmesser zur Schädigungstiefe. ....	130
Tabelle 0-1: Bezeichnungen der Probekörper und deren Experimentnummern. ....	XIII
Tabelle 0-2: Sensorkoordinaten für alle Impaktexperimente. Es gab zwei verschiedene Schussanlagen. Die SLGG wurde für Probekörper mit 20 cm Kantenlänge verwendet. Die XLLGG wurde für Probekörper mit 50 cm und 80 cm Kantenlänge verwendet. Ebenfalls wurden zwei verschiedene Sensortypen verwendet. Teilweise wurden die Sensoren in Bohrlöcher eingebettet.....	XIV
Tabelle 0-3: Auflistung aller angestrebten und durchgeführten Arbeiten innerhalb der ersten MEMIN-Phase in Projekt 4.....	XIX

## Veröffentlichungen

Auflistung der Veröffentlichungen, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit entstanden sind.

### Artikel:

1. **Moser, D., Güldemeister, N., Wünnemann, K., Grosse, C.** (2013, accepted), *Acoustic emission analysis of experimental impact processes in comparison to ultrasound measurements and numerical modeling*. Journal of Acoustic Emission.
2. **Moser, D., Poelchau, M.H., Stark, F., Grosse, C.** (2013), *Application of non-destructive testing methods to study the damage underneath impact craters of MEMIN laboratory experiments*. Meteoritics & Planetary Science, S. 87-98.

### Zwischenbericht:

1. **Moser, D., Grosse, C.** (2012), Zwischenbericht zum Projekt: *Evaluation of hypervelocity impact-induced damage of rocks using elastic waves*. 18 Seiten.

### Konferenzbeiträge:

1. **Güldemeister, N., Moser, D., Wünnemann, K., Hoerth, T.** (2013), *Recording and investigation of the seismic signal generated by hypervelocity impact experiments and numerical models*. European Planetary Science Congress, London (Vortrag).
2. **Moser, D., Grosse, C.** (2013), *Charakterisierung von Target und Projektil bei Meteoritenexperimenten*. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Leipzig (Poster).
3. **Güldemeister, N., Moser, D., Wünnemann, K., Grosse, C.** (2013), *Recording the seismic signal generated by hypervelocity impact in experiments and numerical models*. Lunar and Planetary Science, Houston (Vortrag).
4. **Moser, D., Grosse, C.** (2012), *Non-destructive testing of damage underneath MEMIN impact craters*. Paneth Kolloquium, Nördlingen (Vortrag).
5. **Moser, D., Grosse, C., Stark, F.** (2012), *Elastische Wellen als bildgebendes Mittel der Schädigungszone durch Hochgeschwindigkeits-Experimente*. Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Graz (Poster).
6. **Moser, D., Grosse, C., Güldemeister, N., Buhl, E., Wünnemann, K., Kenkmann, T.** (2012), *Non-destructive testing of the fracture zone underneath an experimental impact crater in sandstone*. Lunar and Planetary Science, Houston (Poster).

7. **Moser, D., Grosse, C.** (2012), *Zerstörungsfreie Prüfung der Schädigungszone unterhalb eines Impaktkraters anhand von Laborexperimenten*. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Hamburg (Poster).
8. **Wünnemann, K., Grosse, U.C., Hiermaier, S., Gueldemeister, N., Moser, D., Durr, N.** (2011), *Geophysical Studies of Meteorite Impact Craters: New Developments and Perspectives*. AGU Fall Meeting, San Francisco (Vortrag).
9. **Moser, D., Grosse, C.** (2011), *Schallemissionsanalyse zur Erforschung von Impaktprozessen bei Meteoriteneinschlägen*. Schallemissions-Kolloquium, Wetzlar (Vortrag).
10. **Grosse, C., Moser, D.** (2011), *Study of the impact cratering process by means of non-destructive testing techniques on a model specimen*. Fragile Earth, München (Vortrag).
11. **Moser, D., Grosse, C.** (2011), *Ultraschall-Tomographie von Rissstrukturen bei Meteoriteneinschlägen*. Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Bremen (Vortrag).
12. **Moser, D., Grosse, C.** (2011), *Non-destructive testing of the fracture zone generated by model impacts underneath sandstone craters by means of ultrasound and acoustic emission*. Lunar and Planetary Science, Houston (Vortrag).
13. **Moser, D., Grosse, C.** (2011), *Zerstörungsfreie Prüfung von Rissprozessen bei experimentellen Impakten von Meteoriten*. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Köln (Vortrag).
14. **Moser, D., Grosse, C.** (2010), *Ultraschall-Tomographie von Rissstrukturen bei Meteoriteneinschlägen*. CT-Tagung, Industrielle Computertomographie, Wels (Poster).

#### Studentische Arbeiten:

1. **Dura, M.** (2013), *Ultraschallmessungen an Meteoritenkratern*. Betreuer: D. Moser, Typ: Bachelorarbeit.
2. **Deschauer, T.** (2013), *Parameteranalyse von Probekörpern bei Modalanalysemessungen*. Betreuer: D. Moser, Typ: Bachelorarbeit.
3. **Winkler, L.** (2013), *Ultraschall-Tomographie – Eine Studie über die Messgenauigkeit*. Betreuer: D. Moser, Typ: Bachelorarbeit.
4. **Wiesnet, S.** (2012), *Phasenspektroskopie*. Betreuer: D. Moser, Typ: Forschungspraktikum.
5. **Lylaluk, M.** (2012), *Genauigkeitsstudie von Ultraschallmessungen – Koppelmittel im Vergleich*. Betreuer: D. Moser, Typ: Seminararbeit.

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben

**Name:** Moser, Dorothee  
**E-Mail-Adresse:** dorothee.moser@outlook.com  
**Geburtsdaten:** 09/05/1984 in Berlin

### Berufliche Erfahrungen

- 05/2010 – 10/2013** Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialien/  
München, Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Lehrstuhl  
Zerstörungsfreie Prüfung, Aufgabenbereich: Forschungsprojekt  
MEMIN ([www.memin.de](http://www.memin.de), Projekt 4), Betreuung von  
Lehrveranstaltung und Studentischer Arbeiten.
- 05/2006 – 12/2009** Freie Universität Berlin / Berlin, Studentische Hilfskraft in der  
Fachrichtung Geophysik, Aufgabenbereich: Preprocessing seismischer  
Daten, Vorbereitung von Meetings (PHASE), Mithilfe bei  
Messeveranstaltungen (EAGE, DGG)
- 07/2008 - 08/2008** Außeruniversitäre Exkursion nach Rumänien,  
gesponsert von der SEG  
Aufgabenbereich: Untersuchungen einer Müllhalde in Rumänien mit  
unterschiedlichen geophysikalischen Messmethoden in einem  
Zeitraum von zwei Wochen
- 10/2007 - 11/2007** Freie Universität Berlin / Berlin, Studentische Hilfskraft während  
einer geophysikalischen Expedition in Chile unter der Leitung von Dr.  
Heinrich Brasse, in einem Zeitraum von fünf Wochen.  
Aufgabenbereich: Auf- und Abbau magnetotellurischer Messstationen  
und Entnahme aufgezeichneter Daten

### Schulische Ausbildung/Studium

- 10/2003 - 12/ 2009** Freie Universität Berlin / Berlin / Geophysik  
*Abschluss:* Diplom  
*Titel der Diplomarbeit:* Lokalisierung mikroseismischer Daten aus  
Nordchile: Anwendung einer migrationsbasierten Methode
- 07/2000 - 06/2003** Katholische Schule Sankt Marien / Berlin, Neukölln  
*Abschluss:* Allgemeine Hochschulreife (Abitur)
- 07/1996 - 06/2000** Katholische Schule Liebfrauen / Berlin, Charlottenburg  
*Abschluss:* Realschulabschluss
- 07/1990 - 06/1996** Käthe-Kollwitz-Grundschule / Berlin

## Danksagung

Ich bedanke mich besonders bei Herrn Professor Große, der diese Arbeit ermöglicht und gefördert hat. Er war stets ein hilfreicher und kritischer Betreuer. Die Zeit am cbm mit Herrn Prof. Große hat mich für meine berufliche Zukunft geprägt.

Bei Herrn Professor Thuro und Herrn Professor Pfeiffer bedanke ich mich, dass sie sich bereit erklärt haben diese Arbeit zu unterstützen und als Gutachter zu fungieren.

Besonders herzlich bedanke ich mich bei der kompletten MEMIN-Forschergemeinschaft, mit der ich drei Jahre die Impaktversuche vorbereiten, durchführen und diskutieren durfte. Trotz der unterschiedlichen Kenntnisse und Methoden konnten wir uns untereinander helfen und unterstützen, sodass ein umfassendes Wissen entstehen konnte.

Meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe 6 (ZfP) gilt ein großes Dankeschön. Sie haben mir immer geholfen, wenn eine dritte oder vierte Hand benötigt wurde, und mit denen ich auch die Ergebnisse der Messungen diskutieren konnte.

Den Hiwis in unserer Arbeitsgruppe, vor allem Herrn Michael Dura, danke ich für die hilfreiche Unterstützung, bei der Durchführung unzähliger Messungen.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner lieben Kollegin Franziska Gemander, die mir bei meinen Messkampagnen mit Rat, Tat und geistiger Unterstützung beiseite gestanden hat. Ebenso bedanke ich mich bei Gerhard Bahr, der mich vor allem in meiner Anfangsphase in Stuttgart bei den Messungen unterstützt hat.

Für eine schöne Zeit am cbm möchte ich mich auch bei allen anderen Kollegen am Institut bedanken, die meine Arbeit dort noch angenehmer gemacht haben, als sie ohnehin schon war.

Für die Möglichkeit kostenlose Messungen mit tomographischen Verfahren an den MEMIN-Probekörpern machen zu können, bedanke ich mich bei Herrn Dinnebier vom WIWeB in Erding, bei der Firma GE, Herrn Stöbel von EADS und dem Radiologischen Institut der TUM. Die dort durchgeführten Messungen und deren Ergebnisse durfte ich ohne jegliche Einschränkung verwenden und für meine Auswertung heranziehen.

Der DFG danke ich für die Förderung dieses äußerst interessanten Projektes (FOR-887).

Ich bedanke mich bei meinem Freund Falko Reichel, meiner großartigen Familie und meinen Freunden, die sich diese Arbeit durchgelesen und mir hilfreiche Fragen dazu gestellt haben. Sie haben fortwährend an mich geglaubt und mir immer wieder gezeigt haben, wie stolz sie auf mich sind. Auch für das Interesse an meiner Arbeit und kleineren Diskussionen, denen weitere Ideen für die Bearbeitung dieser Arbeit folgten, bedanke ich mich sehr.

Allen, die hier aufgeführt sind, und allen die mich unterstützt haben, obwohl sie sich hier nicht erwähnt fühlen, sei ein aufrichtiges Dankeschön gesagt. Eine solche Unterstützung möchte ich nicht mehr missen.

**Anhang**

## I. Probekörper-Bezeichnungen und Experimentnummern

Es wurden insgesamt drei verschiedene Materialien (Seeberger Sandstein, Taunusquarzit und Weiberner Tuff) für die Impaktexperimente verwendet. Die Bezeichnung A steht für einen Probekörper mit 20 cm Kantenlänge, D für einen Probekörper mit 50 cm Kantenlänge. Die Bezeichnung E steht für 80 cm x 80 cm x 50 cm, bis auf für den Probekörper E6 der nur eine Tiefe von 40 cm besitzt.

**Tabelle 0-1: Bezeichnungen der Probekörper und deren Experimentnummern.**

<b>Probekörper Bezeichnung</b>	<b>Experiment Schussnummer</b>	<b>bzw. Probekörpermaterial</b>
A1	----	Sandstein
A2	----	Sandstein
A3	5124 (SLGG)	Sandstein
A4	----	Sandstein
A5	5125 (SLGG)	Sandstein
A6	5126 (SLGG)	Sandstein
A7	5127 (SLGG)	Sandstein
A8	5128 (SLGG)	Sandstein
A11	5181 (SLGG)	Sandstein
A12	5183 (SLGG)	Sandstein
A13	5182 (SLGG)	Sandstein
A14	----	Sandstein
A15	5185 (SLGG)	Sandstein
A16	5186 (SLGG)	Sandstein
A20	5339 (SLGG)	Quarzit
A21	----	Quarzit
A22	5340 (SLGG)	Quarzit
A23	----	Quarzit
A24	5341 (SLGG)	Tuff
A25	5342 (SLGG)	Tuff
A26	5343 (SLGG)	Tuff
A27	----	Tuff
D1	----	Sandstein
D3	3298 (XLLGG)	Sandstein
D4	3299 (XLLGG)	Sandstein
D5	3300 (XLLGG)	Sandstein
E1	3382 (XLLGG)	Sandstein
E2	3383 (XLLGG)	Sandstein
E3	3384 (XLLGG)	Sandstein
E4	3450 (XLLGG)	Sandstein
E5	3451 (XLLGG)	Tuff
E6	3452 (XLLGG)	Quarzit

## II. Sensorkoordinaten für die SEA

Für die SEA ist es wichtig die Sensorposition mit Bedacht zu wählen und die Position so genau wie möglich zu kennen. Da die Daten der SEA zur Lokalisierung der auftretenden Ereignisse herangezogen werden sollen, werden die Koordinaten in x-, y- und z-Richtung notiert und später für die Berechnung des Quellortes verwendet. Um eine möglichst genaue Lokalisierung zu gewährleisten, müssen die Sensoren gut über den gesamten Probekörper verteilt werden. Dabei ist es von Vorteil, wenn die Möglichkeit besteht, an allen sechs Außenflächen des Probekörpers Sensoren befestigen zu können. Oft ist dies nicht der Fall. In den hier durchgeführten Experimenten lagen alle Probekörper auf einer Oberfläche auf. Eine Oberfläche wurde für den Krater zerstört, sodass keiner der Sensoren mittig auf dieser Seite des Probekörpers befestigt werden konnte. Dennoch wurden an der Impaktoberfläche bei jedem Versuch zwei Sensoren befestigt. Diese waren jedoch relativ weit außen befestigt und somit außerhalb der Beschusszone. Einige Experimente weisen sehr ähnliche oder identische Koordinaten für die Sensoren auf. Dies diente der Reproduzierbarkeit. Im Laufe der Experimente wurde jedoch klar, dass die Schüsse nicht im Millimeterbereich, sondern nur im Zentimeter Bereich positioniert werden konnten. Aus diesem Grund wurde dazu übergegangen, die Sensorpositionen bei den Experimenten zu variieren. Zudem kamen Befestigungen oder andere Aufbauten (Klebeband, Holzauffänger) dazu, die die gewählten Koordinaten nicht zuließen und somit die Koordinaten spontan geändert werden mussten. Die folgende Tabelle zeigt alle Sensorpositionen für die unterschiedlichen Probekörper mit Angabe der Schussanlage und des Sensortyps. G-Bohrloch steht dabei für KRNBB-PC Sensoren, die in Bohrlöcher eingelassen worden sind, wobei das G für den Entwickler der Sensoren, Herrn Professor Glaser, steht. Alle Positionsangaben für x, y, und z sind in cm angegeben. Der Koordinatenursprung befindet sich (mit Blick auf die Krater) hinten, unten, links (siehe als Beispiel zwei Probekörper (A3 und E1) mit Sensoren in Abbildung 4-1).

**Tabelle 0-2: Sensorkoordinaten für alle Impaktexperimente. Es gab zwei verschiedene Schussanlagen. Die SLGG wurde für Probekörper mit 20 cm Kantenlänge verwendet. Die XLLGG wurde für Probekörper mit 50 cm und 80 cm Kantenlänge verwendet. Ebenfalls wurden zwei verschiedene Sensortypen verwendet. Teilweise wurden die Sensoren in Bohrlöcher eingebettet.**

Schuss-anlage	Probekörper	Position x	Position y	Position z	Sensortyp
SLGG	A3, A5, A6, A7, A8	20	17	18	Panametrics
		20	8	3	Panametrics
		0	4	7	Panametrics
		0	11	15	Panametrics
		0	17	7	Panametrics
		0	13	2	Panametrics
		0	15	18	Panametrics
		0	3	16	Panametrics

Schuss-anlage	Probekörper	Position x	Position y	Position z	Sensortyp
		12	20	14	Panametrics
		16	0	17	Panametrics
		11	8	20	Panametrics
		5	14	20	Panametrics
SLGG	A11	20	2,8	17,4	Panametrics
		9,2	13,9	20	Panametrics
		4,4	5	20	Panametrics
		5,1	0	12,5	Panametrics
		12,3	0	4,7	Panametrics
		14,5	20	15,1	Panametrics
		7,1	20	7,5	Panametrics
		0	16,5	16,7	Panametrics
		0	7,1	14,4	Panametrics
		0	2,9	10,6	Panametrics
		0	8,1	6,5	Panametrics
		0	14,9	4,8	Panametrics
SLGG	A12	20	2,6	17,7	KRNBB-PC
		14,4	12,5	20	KRNBB-PC
		5,4	20	7,7	KRNBB-PC
		6,1	0	5,9	KRNBB-PC
		0	7,1	13,9	KRNBB-PC
		0	15	7,2	KRNBB-PC
		8,7	4,4	20	Panametrics
		14,9	20	15,7	Panametrics
		0	18,5	14,4	Panametrics
		0	8,4	7,5	Panametrics
		0	0	6,4	Panametrics
SLGG	A13	20	3,1	17,9	KRNBB-PC
		0	15,9	15	KRNBB-PC
		0	6,7	12,2	KRNBB-PC
		14,2	15,4	20	KRNBB-PC
		5,6	20	6,8	KRNBB-PC
		14,8	0	9,5	KRNBB-PC
		13,4	6,6	20	Panametrics
		0	20	16,5	Panametrics
		14,6	5,4	16,9	Panametrics
		16,4	3,6	4,8	Panametrics
		7	13	6,8	Panametrics
SLGG	A15	0	3,9	13,7	KRNBB-PC
		0	13	4	KRNBB-PC
		7	20	11,8	Panametrics
		3,9	0	5,6	Panametrics
		15,3	14,3	20	Panametrics
		20	1,9	17,9	Panametrics
		0	16	15,5	Panametrics
		0	7	6,7	Panametrics
SLGG	A16	20	1,4	18,3	Panametrics
		5,3	4,8	20	Panametrics
		14,4	0	4,5	Panametrics
		15,4	20	11,6	Panametrics
		0	16,3	15,8	Panametrics
		0	12,9	9,8	Panametrics
		0	15,4	15	Panametrics
		0	4,7	14,1	Panametrics

Schuss-anlage	Probekörper	Position x	Position y	Position z	Sensortyp
SLGG	A20, A22, A24, A25, A26	20	14	17	Panametrics
		0	13	16	Panametrics
		0	4	8	Panametrics
		0	15	5	Panametrics
		14	20	13	Panametrics
		9	0	9	Panametrics
		7	8	20	Panametrics
		15	4	20	Panametrics
		20	4	17	KRNBB-PC
		0	6	17	KRNBB-PC
		0	10	10	KRNBB-PC
		0	17	12	KRNBB-PC
		6	20	7	KRNBB-PC
		15	0	10	KRNBB-PC
14	15	20	KRNBB-PC		
XLLGG	D3, D4, D5	50	45	4	Panametrics
		0	7	26	Panametrics
		0	36	37	Panametrics
		0	43	18	Panametrics
		19	12	50	Panametrics
		28	0	20	Panametrics
		37	50	42	Panametrics
		45	45	50	Panametrics
XLLGG	E1, E2, E3	10	40	50	G- Bohrloch
		15	30	30	G- Bohrloch
		20	50	20	G- Bohrloch
		20	15	60	G- Bohrloch
		50	65	65	Panametrics
		35	35	80	Panametrics
		20	0	25	Panametrics
		10	80	50	Panametrics
		0	45	35	Panametrics
		50	50	10	KRNBB-PC
		20	60	80	KRNBB-PC
		10	0	55	KRNBB-PC
		30	80	35	KRNBB-PC
		0	55	65	KRNBB-PC
XLLGG	E4	10,8	40	50	G- Bohrloch
		15,5	30	30	G- Bohrloch
		21	50	20	G- Bohrloch
		20,7	15	60	G- Bohrloch
		50	65	65	Panametrics
		35	35	80	Panametrics
		20	0	25	Panametrics
		10	80	50	Panametrics
		0	45	35	Panametrics
		50	50	10	KRNBB-PC
		20	60	80	KRNBB-PC
		10	0	55	KRNBB-PC
		30	80	35	KRNBB-PC
		0	55	65	KRNBB-PC
XLLGG	E5	10,6	40	50	G- Bohrloch
		15	30	30	G- Bohrloch
		19,8	50	20	G- Bohrloch

Schuss-anlage	Probekörper	Position x	Position y	Position z	Sensortyp
		20,2	15	60	G- Bohrloch
		40	65	15	Panametrics
		25	35	80	Panametrics
		20	0	25	Panametrics
		10	80	50	Panametrics
		0	45	35	Panametrics
		40	65	70	KRNBB-PC
		20	60	80	KRNBB-PC
		10	0	55	KRNBB-PC
		30	80	35	KRNBB-PC
		0	55	65	KRNBB-PC
XLLGG	E6	15	80	25	Panametrics
		25	80	70	Panametrics
		10	0	35	Panametrics
		30	60	80	Panametrics
		40	10	30	Panametrics
		0	40	39	Panametrics
		0	18	65	Panametrics
		0	60	50	Panametrics
		10	80	55	KRNBB-PC
		30	0	50	KRNBB-PC
		15	0	15	KRNBB-PC
		25	25	80	KRNBB-PC
		40	70	10	KRNBB-PC
		0	55	15	KRNBB-PC
		0	25	30	KRNBB-PC
		0	50	64	KRNBB-PC

### **III. Eingesetzte ZfP-Verfahren an MEMIN-Probekörpern**

Für das MEMIN-Projekt wurden verschiedene Zerstörungsfreie Prüfverfahren getestet. Aus zeitlichen und organisatorischen Gründen war es nicht möglich alle Messungen für alle Probekörper durchzuführen. Vor allem die Messungen, die vor den Versuchen hätten stattfinden sollen, konnten erst bei den Experimenten mit fortschreitender Projektzeit durchgeführt werden. Teils aus Mangel an vorhandener Messtechnik und teils, weil die ersten Experimente bereits im zweiten Arbeitsmonat stattfanden. Zusätzlich kam ein organisatorisches Hindernis dazu. Die Messtechnik für die zerstörungsfreien Prüfverfahren ist in München untergebracht, ein Großteil der Probekörper liegt jedoch in Freiburg, da dort auch die Impaktexperimente durchgeführt werden. Für die Messungen nach den Experimenten konnten ebenfalls nicht alle Probekörper verwendet werden, da auch andere Teilprojekte von MEMIN zeitnahe Untersuchungen an den Probekörpern durchführen mussten und somit die Probekörper auch zerstörend untersucht wurden und für die zerstörungsfreien Messmethoden unbrauchbar wurden.

Die Phasenspektroskopie zeigte keine auswertbaren Ergebnisse und wurde daher nicht weiter berücksichtigt (Anhang IX). Bei einem der Impaktexperimente ist die Messtechnik der SEA ausgefallen, sodass keine Daten für dieses Experiment vorhanden sind.

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick der durchgeführten und beabsichtigten Versuche für jeden Probekörper.

**Tabelle 0-3: Auflistung aller angestrebten und durchgeführten Arbeiten innerhalb der ersten MEMIN-Phase in Projekt 4.**

Probekörper	Impakt exp.	UST vorher	US Info	UST nachher	MA vorher	MA nachher	AE während	PH-SP vorher	PH-SP nachher	μ-CT nachher
A 1 (S)	N	Y	Y	---	Y	---	---	m.o.e.	m.o.e.	---
A 2 (S)	N	I.P.	Y	---	Y	---	---			---
A 3 (S)	Y	N	Y	Y	N	Y	Y		Y	Y
A 5 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			N
A 6 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			N
A 7 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			N
A 8 (S)	Y	N	Y	Y	N	I.P.	Y		Y	Y
A 11 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			N
A 12 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			N
A 13 (S)	Y	N	Y	Y	N	N	Y			N
A 14 (S)	N	I.P.	Y	---	I.P.	---	---			---
A 16 (S)	Y	N	Y	Y	N	I.P.	Y			I.P.
A 20 (Q)	Y	Y	Y	Y	Y	I.P.	Y			I.P.
A 21 (Q)	N	Y	Y	---	I.P.	---	---			---
A 22 (Q)	Y	Y	Y	Y	Y	I.P.	Y			N
A 23 (Q)	N	Y	Y	---	I.P.	---	---			---
A 24 (T)	Y	N	Y	Y	Y	I.P.	Y			I.P.
A 25 (T)	Y	N	Y	Y	Y	I.P.	Y			N
A 26 (T)	Y	N	Y	Y	Y	N	Y			N
A 27 (T)	N	Y	---	---	I.P.	---	---			---
D 1 (S)	N	N	Y	---	N	---	---			---
D 3 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			---
D 4 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			---
D 5 (S)	Y	N	Y	Y	N	N	Y			---
E 1 (S)	Y	N	Y	Y	N	Y	m.o.e.			---
E 2 (S)	Y	N	Y	N	N	N	Y			---
E 3 (S)	Y	N	Y	Y	N	N	Y			---
E 4 (S)	Y	N	Y		N		Y			---
E 5 (T)	Y	N	Y		N		Y			---
E 6 (Q)	Y	N	Y	---	N	---	Y			---

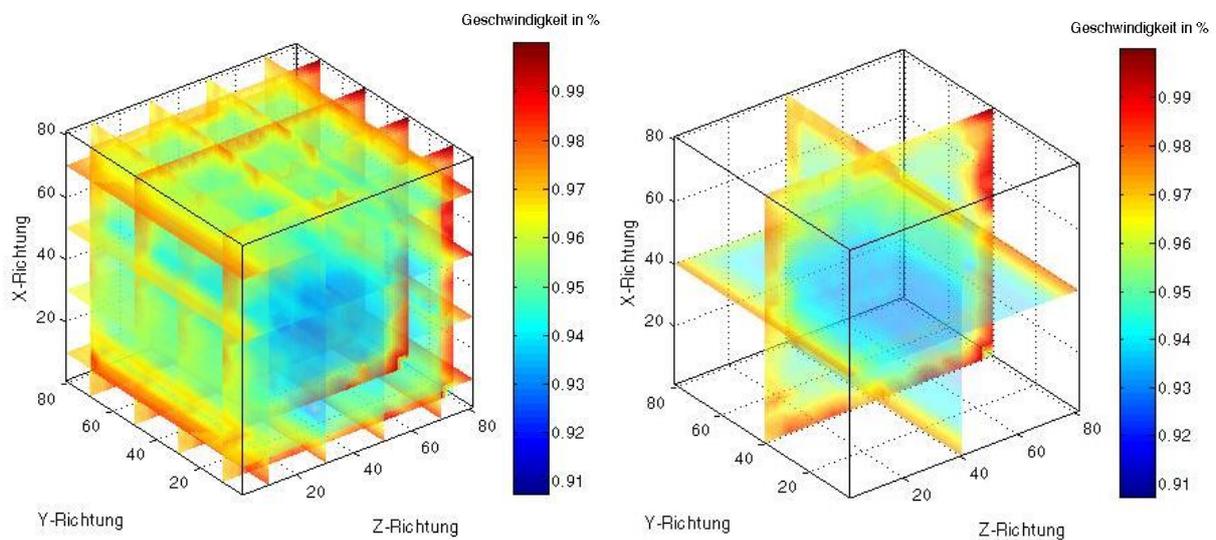
**UST** = Ultraschall-Tomographie, **MA** = Modalanalyse, **AE** = Acoustic Emission (bzw. Schallemissionsanalyse), **PH-SP** = Ultraschall-Phasenspektroskopie, **(S)** = Seeberger Sandstein, **(Q)** = Quarzit, **(T)** = Tuff, Rot **(N)** = Nicht durchgeführte Messungen, Grün **(Y)** = durchgeführte Messungen, Gelb **(I.P.)** = Arbeiten, die noch durchgeführt werden sollten, Weiß **(---**) = Messungen sind nicht möglich, **m.o.e.** = Messungen ohne Ergebnis.

#### IV. Schnittbilder aller Probekörper gemessen mit Ultraschall-Tomographie

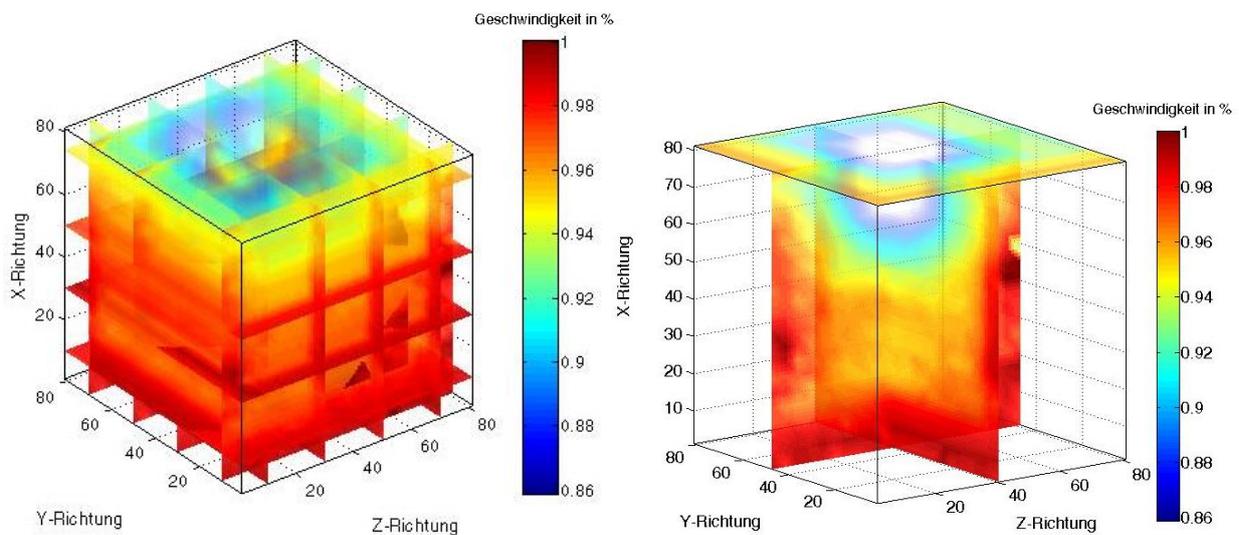
Dieser Anhang zeigt alle mit Ultraschall-Tomographie gemessenen Probekörper. Die Reihenfolge ist alphabetisch bzw. nach der Nummerierung aufsteigend. Daher sind Probekörper ohne und mit Schädigung nicht getrennt gezeigt. Bis auf den D5- und den E1-Probekörper wurden alle hier gezeigten Probekörper von allen drei Raumrichtungen aus gemessen. Einige der Probekörper wurden bereits in Dura [2013] vorgestellt.

Abbildung 0-1: Dreidimensionale Ansichten der mit Ultraschall-Tomographie gemessenen Probekörper.

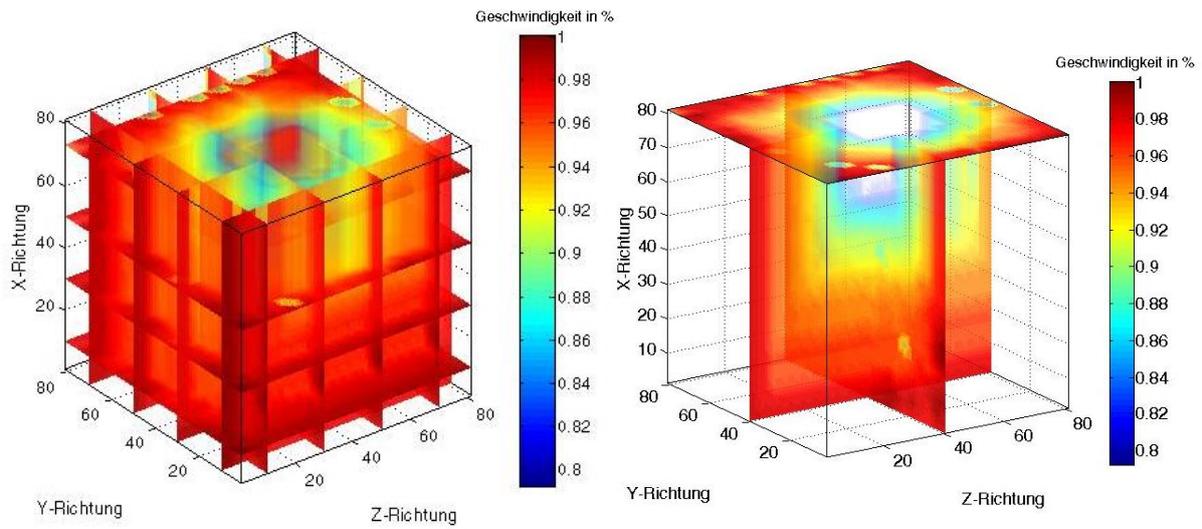
##### A1, Sandstein ohne Schädigung



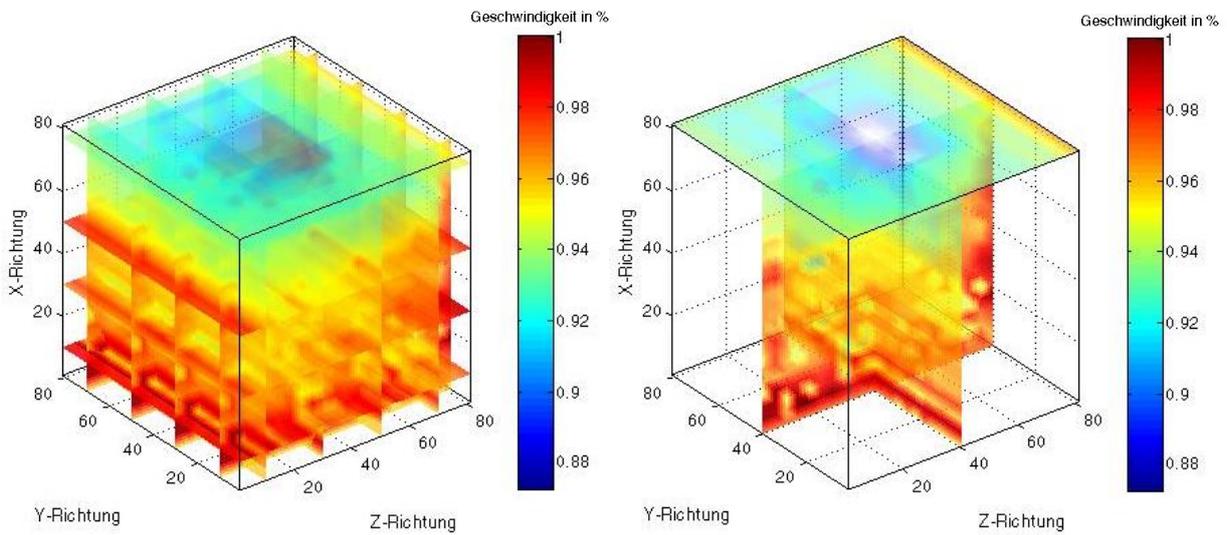
##### A3, Sandstein mit Schädigung



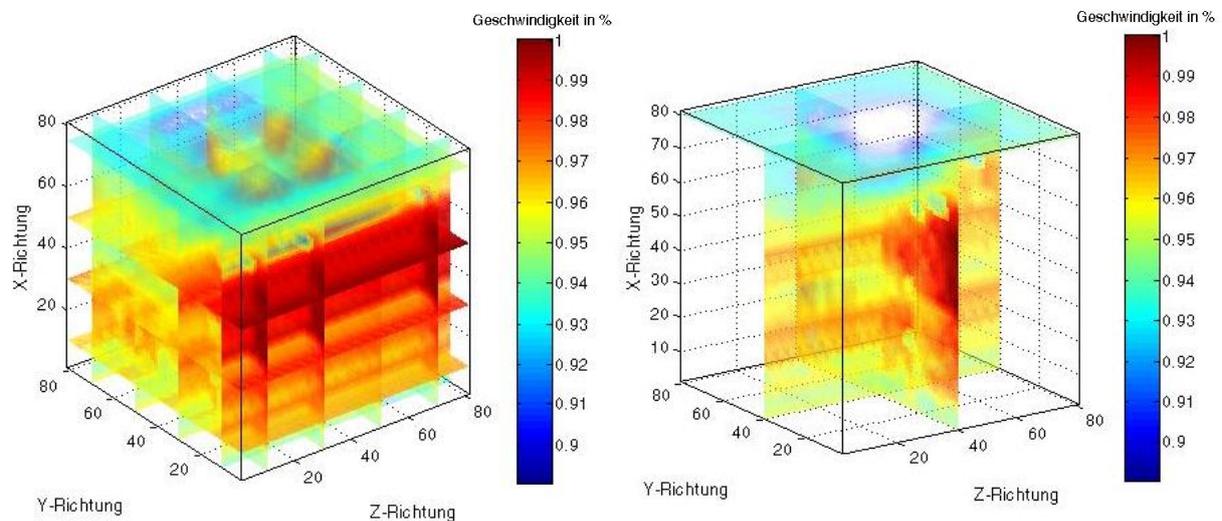
A8, Sandstein mit Schädigung



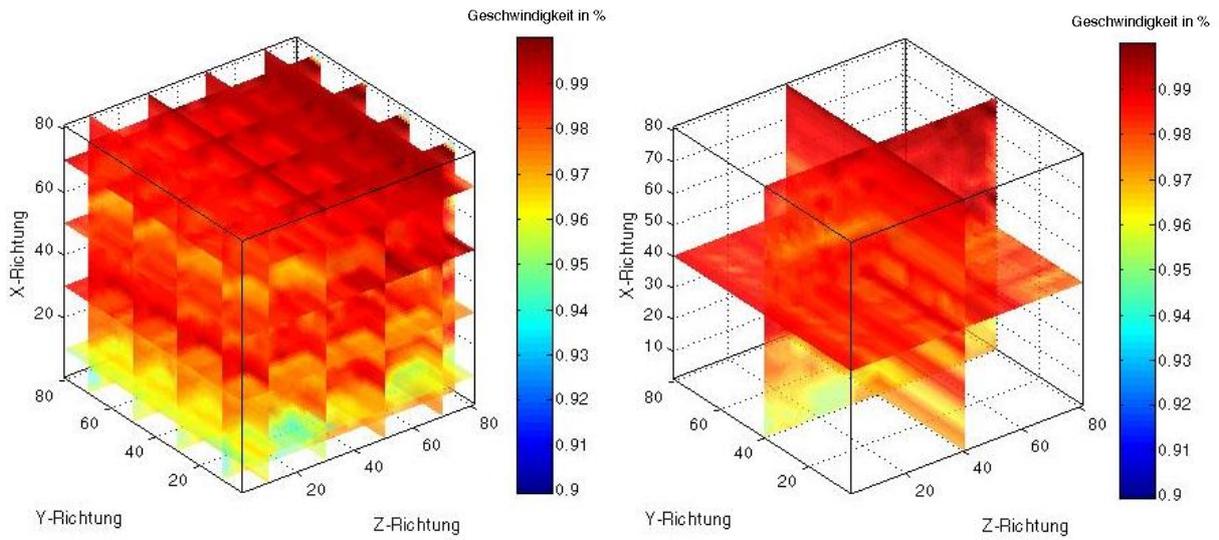
A13, Sandstein mit Schädigung



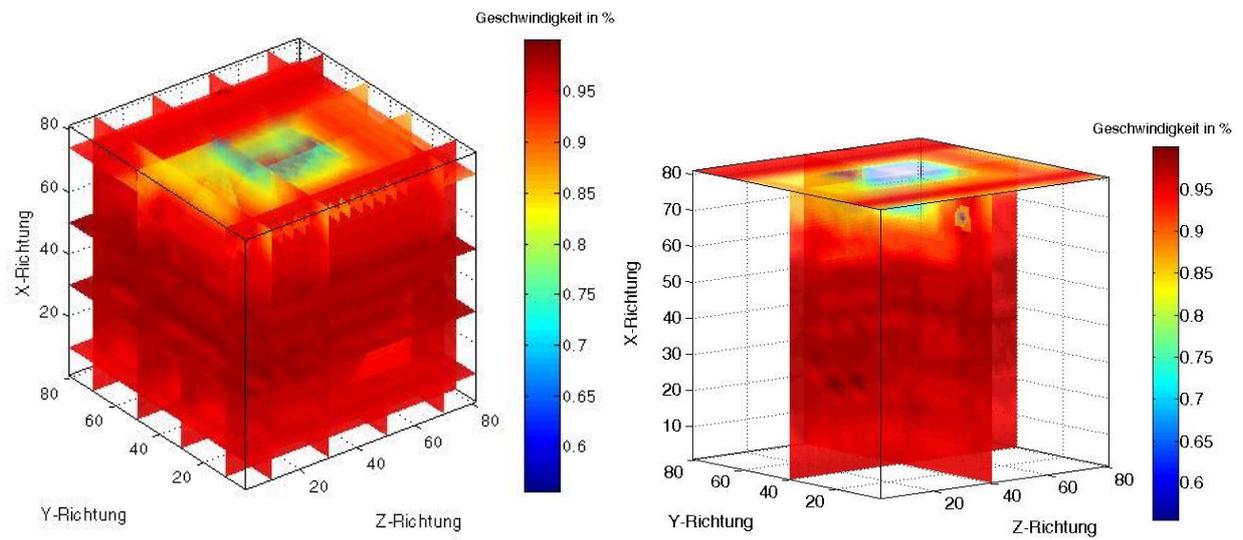
A16, Sandstein mit Schädigung



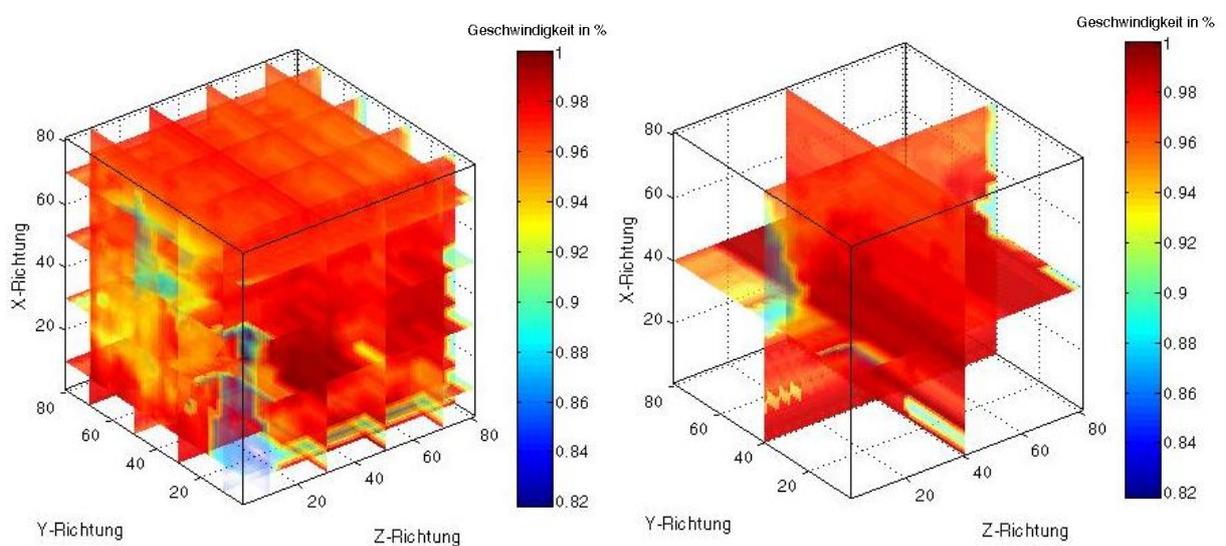
A20, Quarzit ohne Schädigung



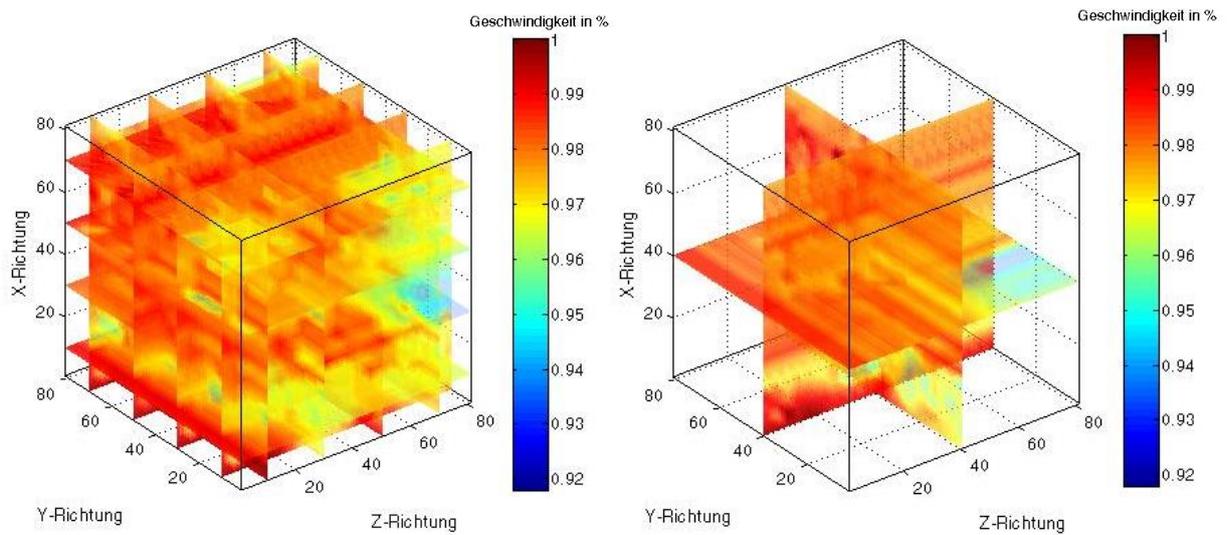
A20, Quarzit mit Schädigung



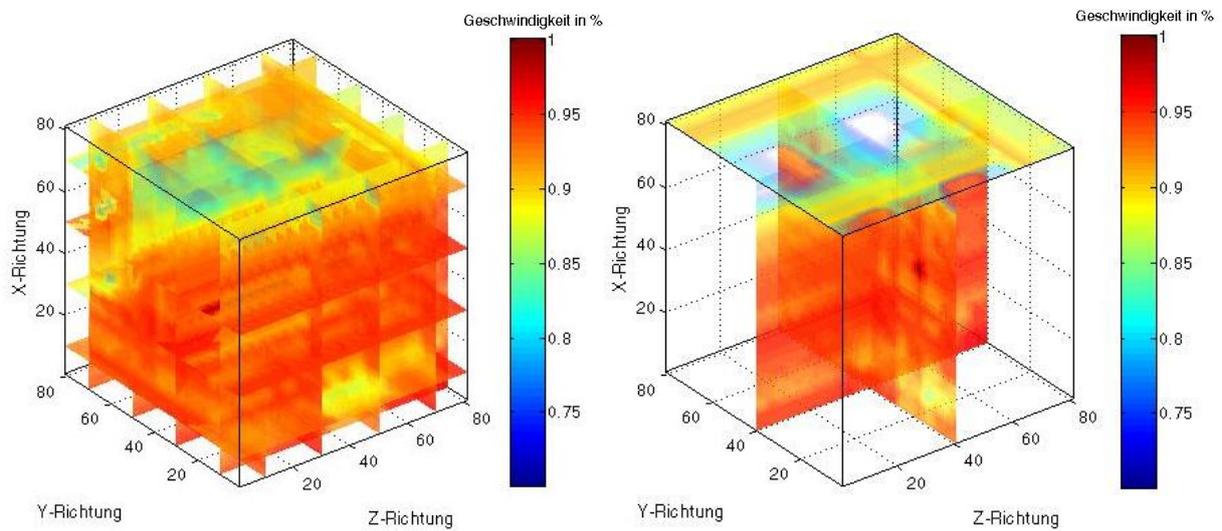
A21, Quarzit ohne Schädigung



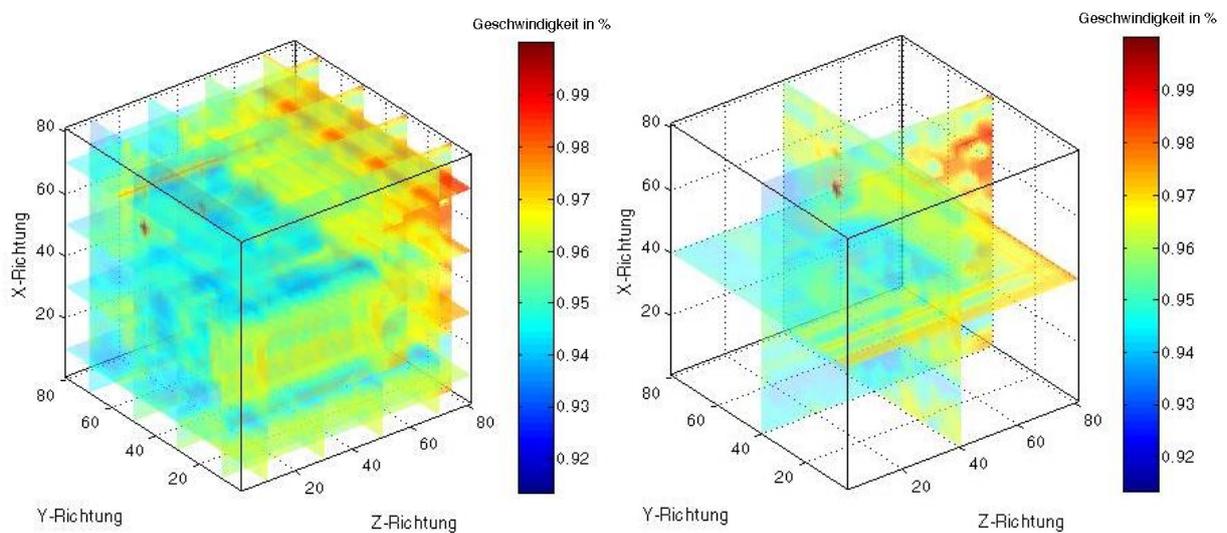
A22, Quarzit ohne Schädigung



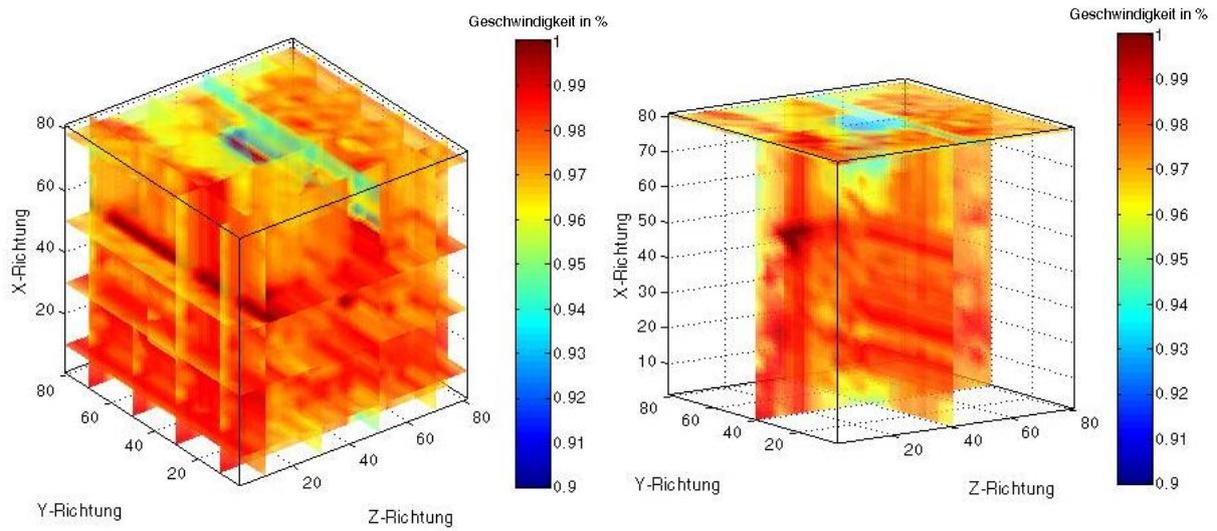
A22, Quarzit mit Schädigung



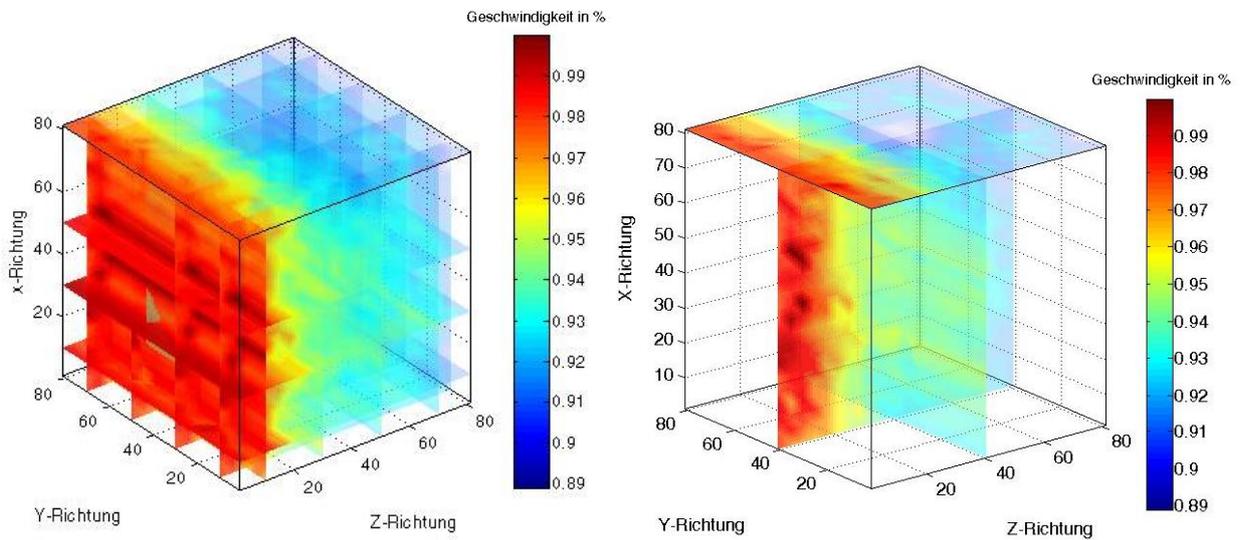
A23, Quarzit ohne Schädigung



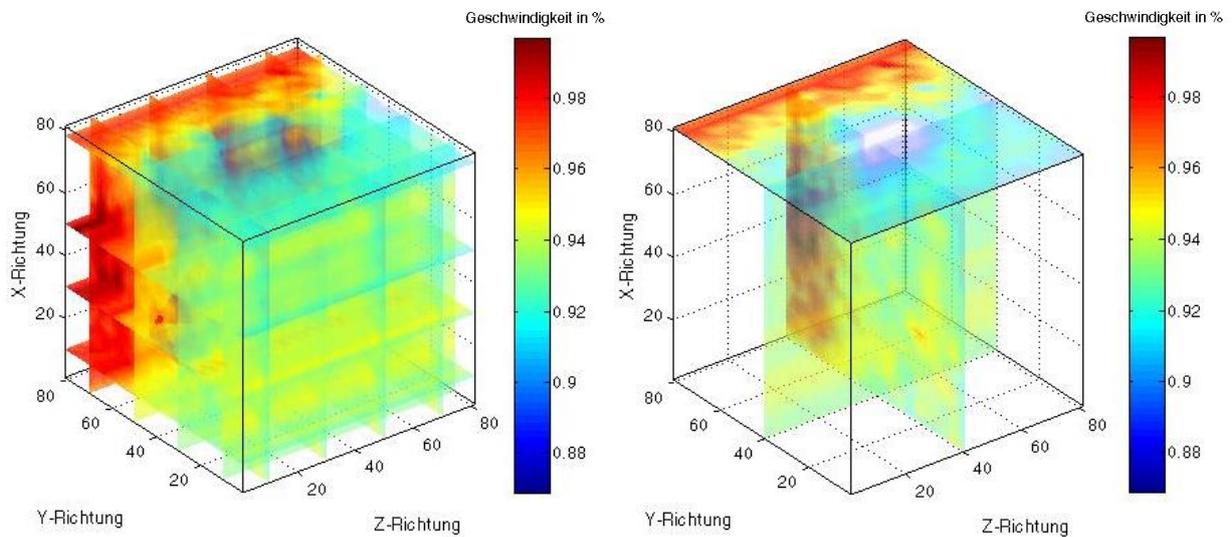
A24, Tuff mit Schädigung



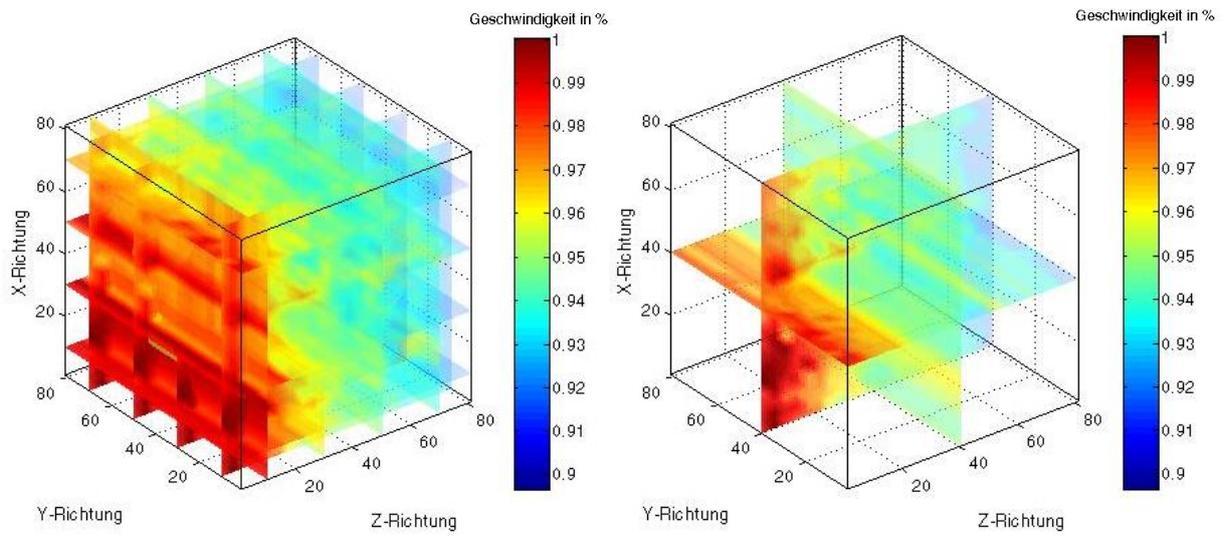
A25, Tuff mit Schädigung



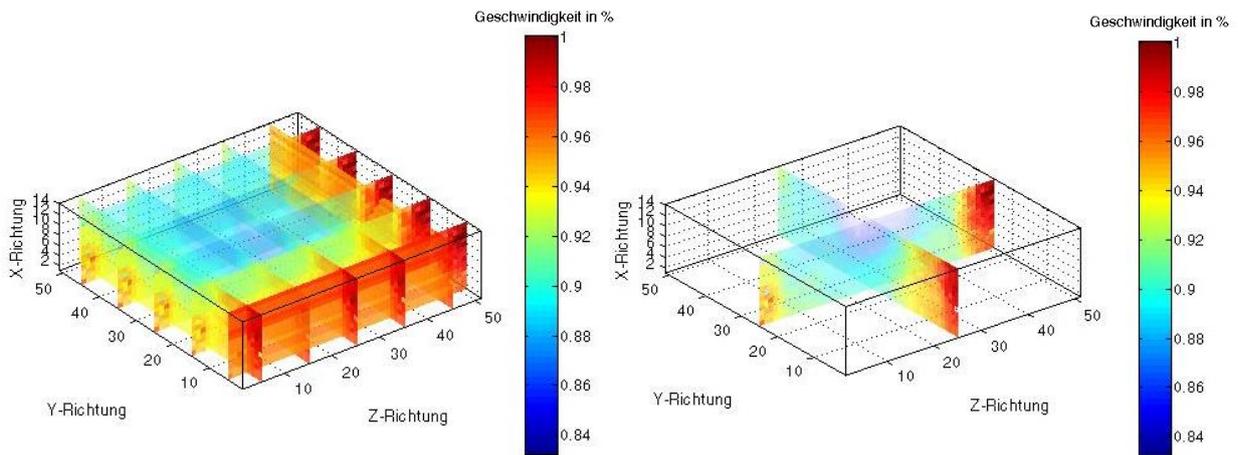
A26, Tuff mit Schädigung



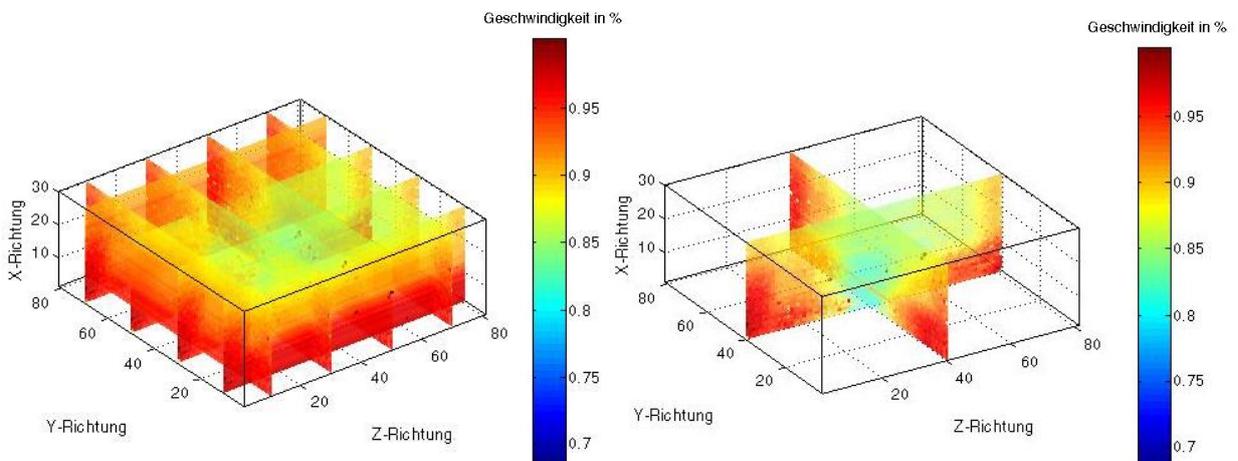
A27, Tuff ohne Schädigung



D5, Sandstein mit Schädigung



E1, Sandstein mit Schädigung



## V. MATLAB Programm zur Erstellung der Tomographie-Schnittbilder

Das folgende MATLAB Programm ist eine Gemeinschaftsarbeit mit Benjamin Portner und Michael Dura. Das Programm ist in einer steten Weiterentwicklung und zeigt daher nur den aktuellen Stand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit. Zudem werden hier nur Ausschnitte des Programmes gezeigt. Das komplette Programm ist am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung hinterlegt.

```

% Zur Darstellung der Daten von
% Ultraschall Tomographie-Messungen
% Autoren: Dorothee Moser, Benjamin Portner und Michael Dura

% stepsize for interpolation
stepsize=1;
% show interpolated volume
plot_interpol=1;

% zu betrachtender Probekörper: hier als Beispiel A1
v_lim_max = 2865;
v_lim_min = 2600;

% user input
xfilename = 'A1/Geschw.-Matrix_Y=0.xls';
yfilename = 'A1/Geschw.-Matrix_Z=0.xls';
zfilename = 'A1/Geschw.-Matrix_X=0.xls';
messpunkte = 21;

% PROGRAM START
currDir = strrep(mfilename('fullpath'),mfilename,'');

% read files
[xNum,xTxt,xRaw] = xlsread([currDir xfilename]);
[yNum,yTxt,yRaw] = xlsread([currDir yfilename]);
[zNum,zTxt,zRaw] = xlsread([currDir zfilename]);

ergebnis = zeros(messpunkte,messpunkte,messpunkte);
for x=1:messpunkte
    for y=1:messpunkte
        for z=1:messpunkte
            if print_flag
                fprintf('x = %d y = %d : %7f \t y = %d z = %d : %7f \t x
= %d z = %d : %7f\r\n',x,y,zNum(x,y),y,z,xNum(y,z),x,z,yNum(z,x));
            end
            ergebnis(x,y,z) = (nanmax([zNum(x,y),xNum(y,z),yNum(z,x)]));
        end;
    end;
end;

vmin = min(ergebnis(:));
vmax = max(ergebnis(:));

ergebnis(ergebnis>v_lim_max)=v_lim_max;
ergebnis(ergebnis<v_lim_min)=v_lim_min;

% norm matrix
ergebnis=ergebnis/vmax;

```

```
tx=0:1:messpunkte-1;
ty=tx;
tz=tx;

ix=0:stepsize:messpunkte-1;
iy=0:stepsize:messpunkte-1;
iz=0:stepsize:messpunkte-1;

[qxi,qyi,qzi]=meshgrid(ix,iy,iz);
[qx,qy,qz]=meshgrid(tx,ty,tz);

F=TriScatteredInterp(qx(:),qy(:),qz(:),ergebnis(:));

ergebnis_int=F(qxi,qyi,qzi);

%%
%saving plots
mkdir([currDir 'plots']);
mkdir([currDir 'plots\jpg']);
%%

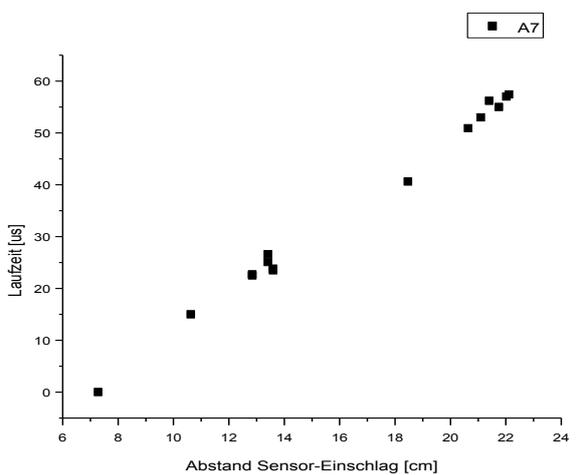
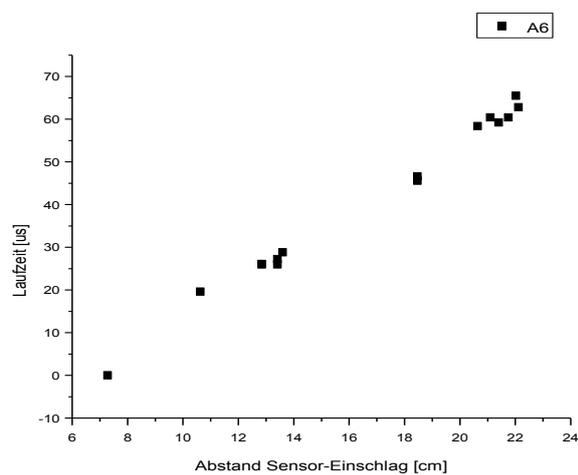
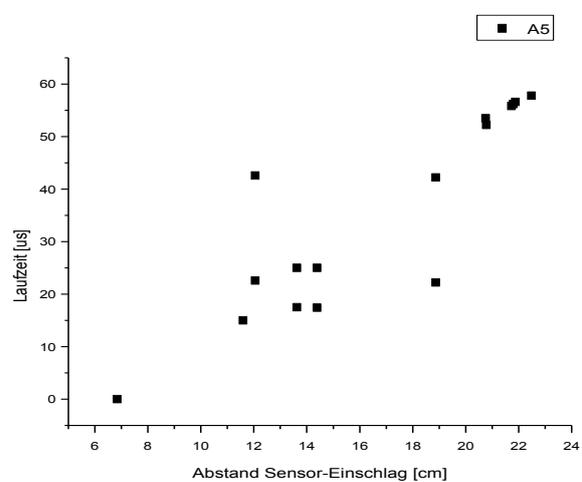
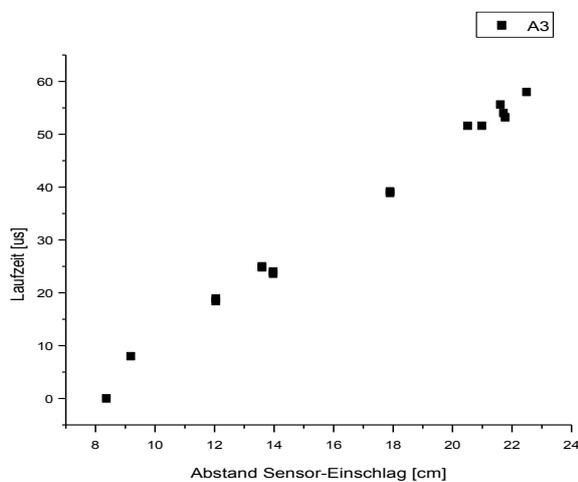
if ~plot_interpol
    for x=1:messpunkte
        .
        .
    end;
    %%
    for y=1:messpunkte
        .
        .
    end;
    %%
    for z=1:messpunkte
        .
        .
    end;
    %%
end

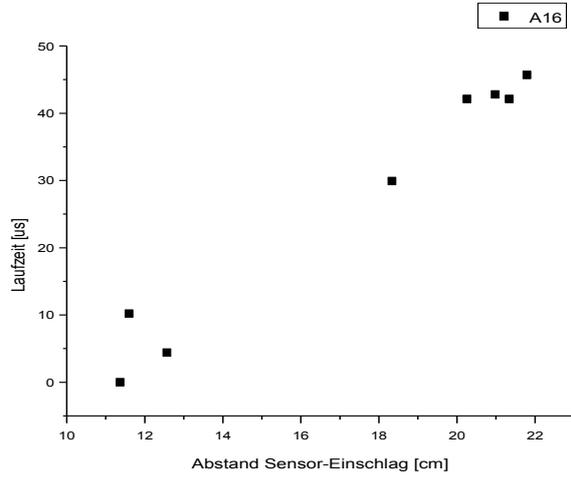
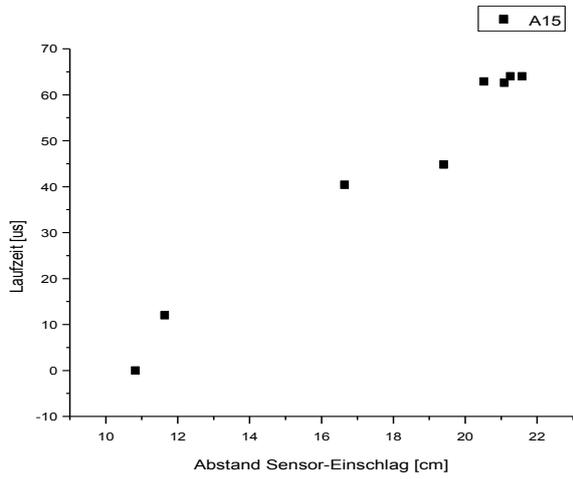
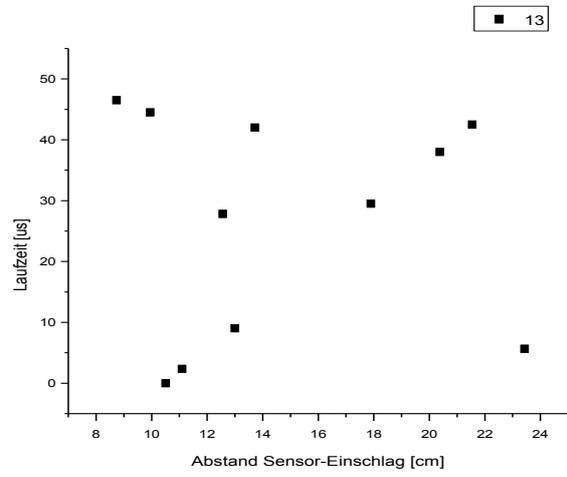
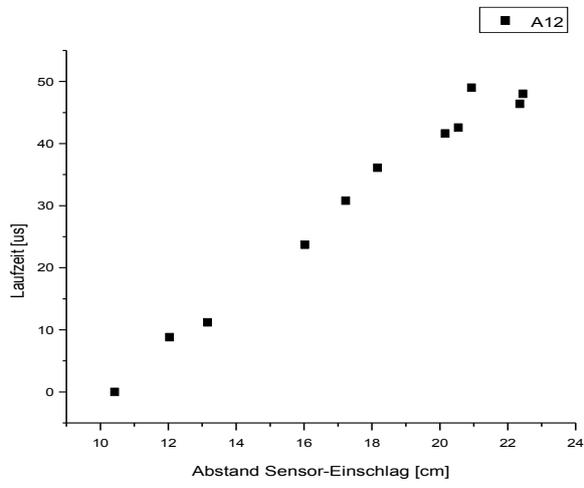
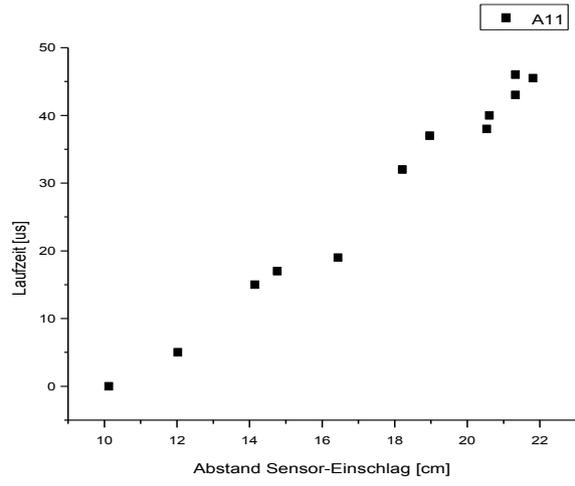
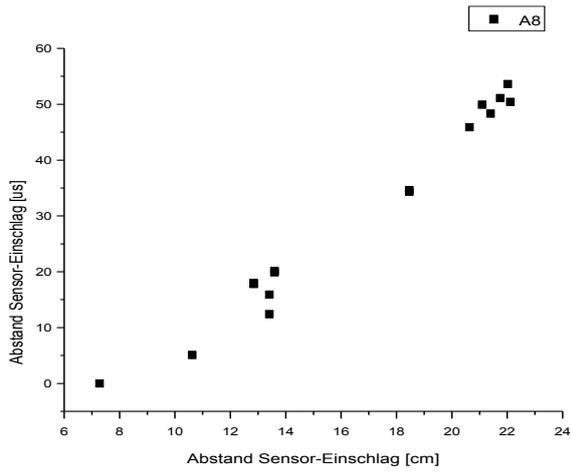
if plot_interpol
    %% view interpolated slices
    [sx,sy,sz]=size(ergebnis_int);
    for x=1:sx
        .
        .
    end;
    %%
    for y=1:sy
        .
        .
    end;
    %%
    for z=1:sz
        .
        .
    end;
    %%
end
```

## VI. Wellenausbreitung über die Schallemissionsanalyse

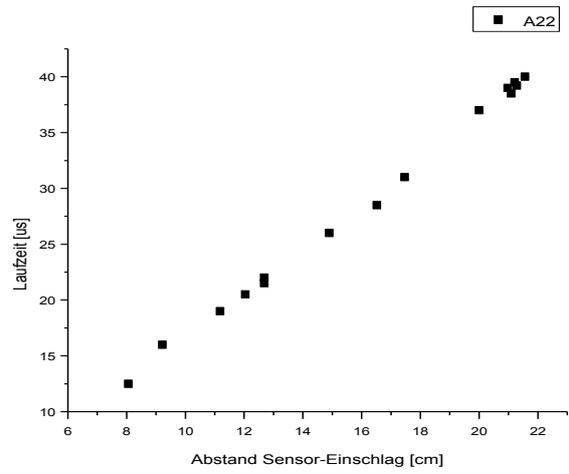
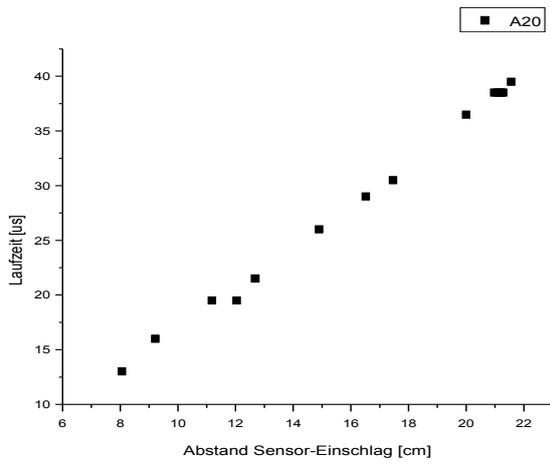
Dieser Anhang knüpft an das Kapitel 4.3 an. In den folgenden Abbildungen werden die Laufzeiten der direkten Welle in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Sensor und Impaktpunkt dargestellt. Die meisten Experimente zeigen einen sehr linearen Verlauf der Wellenausbreitung. Lediglich die Probekörper mit Wassersättigung zeigen auffällig viele Abweichungen im Datenverlauf. Zum Beispiel ist der E6 Probekörper sehr auffällig. Dieser Block zeigte bereits bei oberflächlicher Betrachtung große Anteile von Toneinlagerungen, sodass hier nicht mehr von einem quasi-homogenen Probekörper gesprochen werden kann.

### Sandstein; 20 cm Kantenlänge

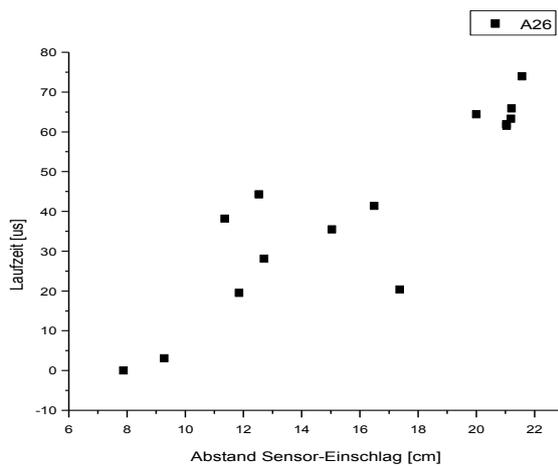
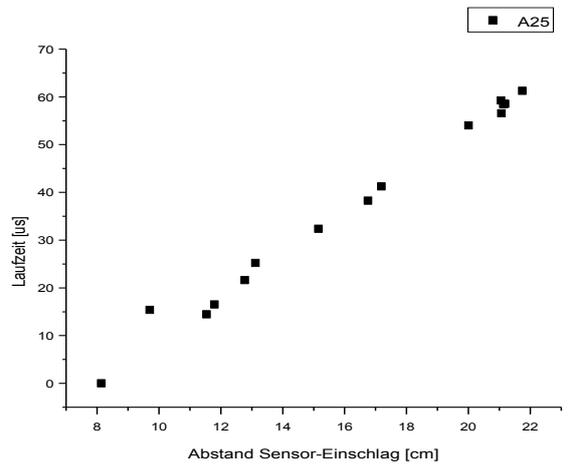
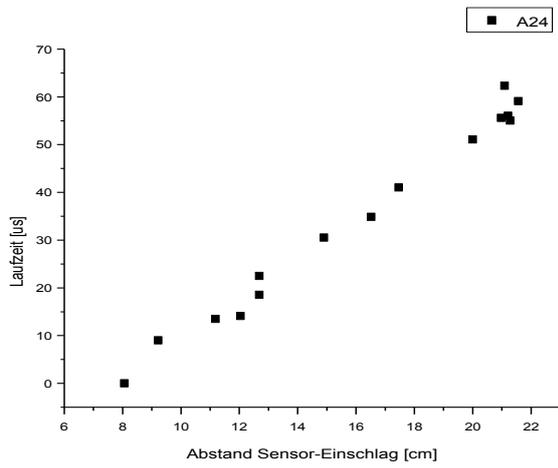




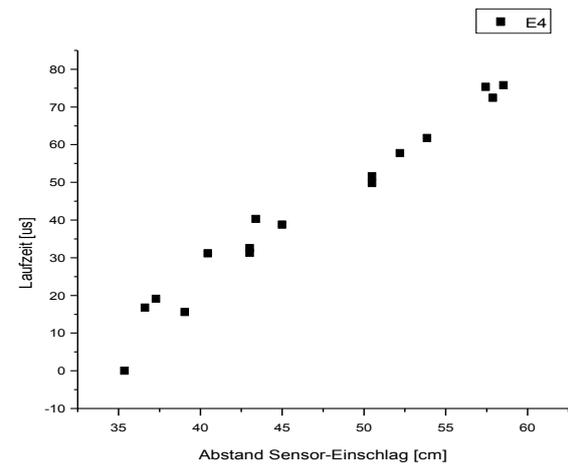
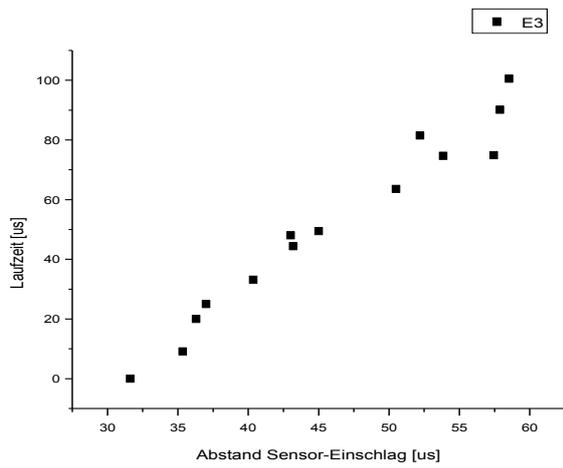
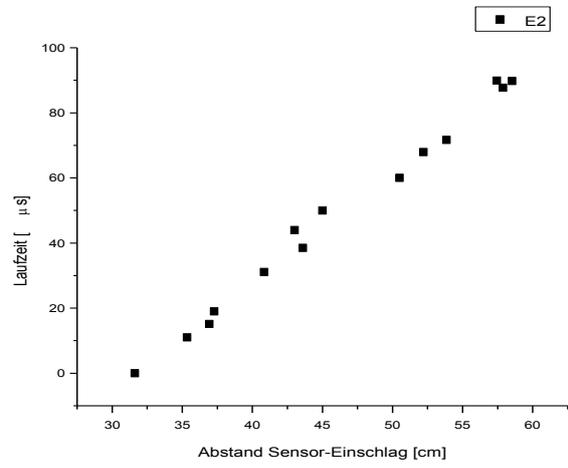
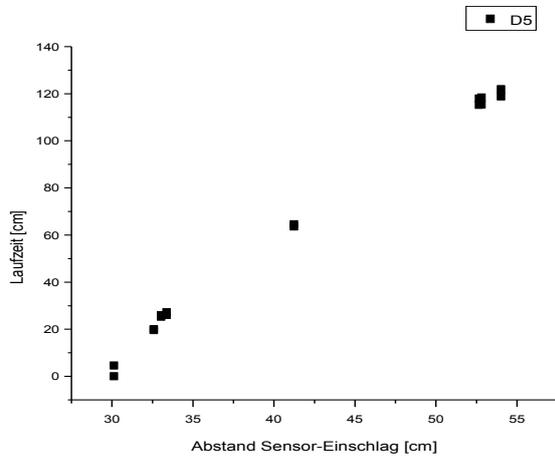
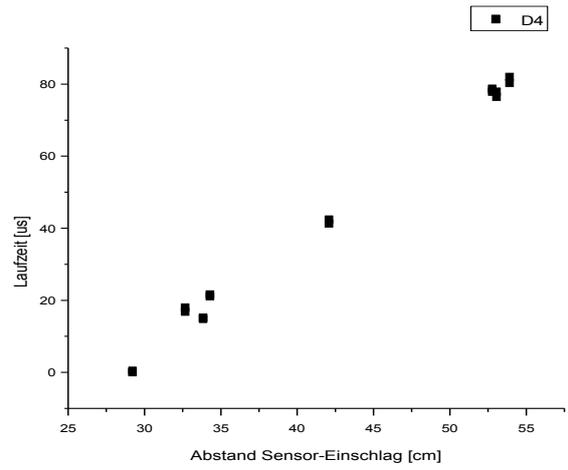
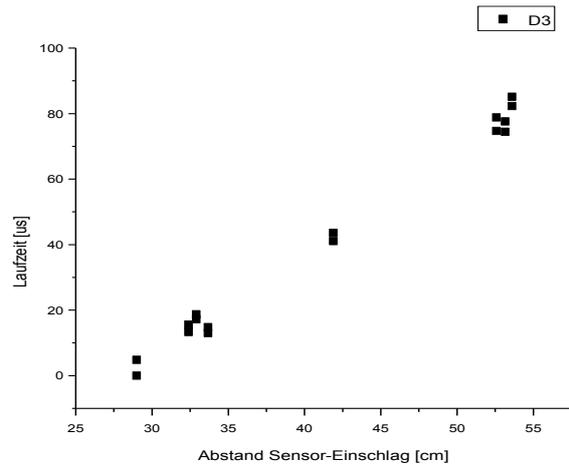
Quarzit; 20 cm Kantenlänge

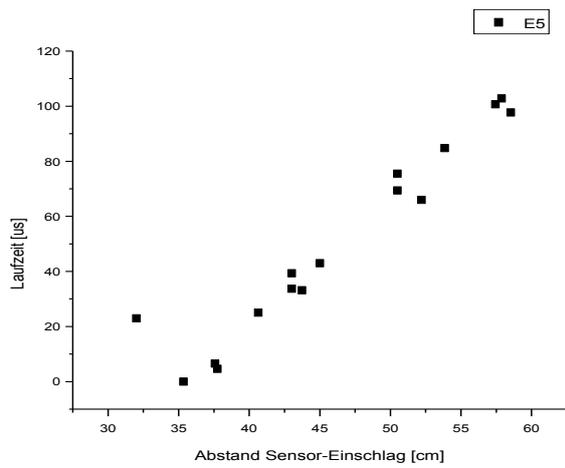
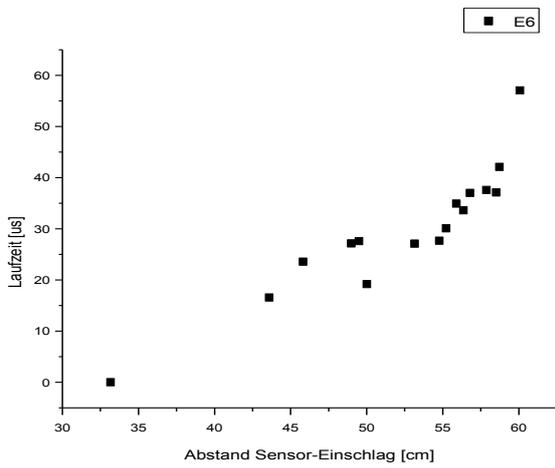


Tuff; 20 cm Kantenlänge



*Sandstein; 50 cm Kantenlänge und 50 cm x 80 cm x 80 cm Kantenlänge*



Tuff; 50 cm x 80 cm x 80 cm KantenlängeQuarzit; 40 cm x 80 cm x 80 cm Kantenlänge

## VII. Fast Fourier Analyse der Impaktsignale

Dieser Anhang soll einen kurzen Einblick in die Frequenzanalyse der Impaktsignale zeigen. Die vier Diagramme zeigen jeweils die Fast Fourier Transformationen (FFT) von vier Sensoren von dem gleichen Impaktexperiment. Auffällig ist die Frequenzspitze bei etwa 2,2 kHz, dieser ist bei allen Sensoren zu sehen. Die Experimente zeigen generell niedrige Frequenzen unterhalb von 0,006 MHz (= 6 kHz). Die FFT wird in dieser Arbeit nicht behandelt, sollte aber für fortführende Arbeiten in Betracht gezogen werden, um eventuelle Rissereignisse nach dem Impakt finden zu können.

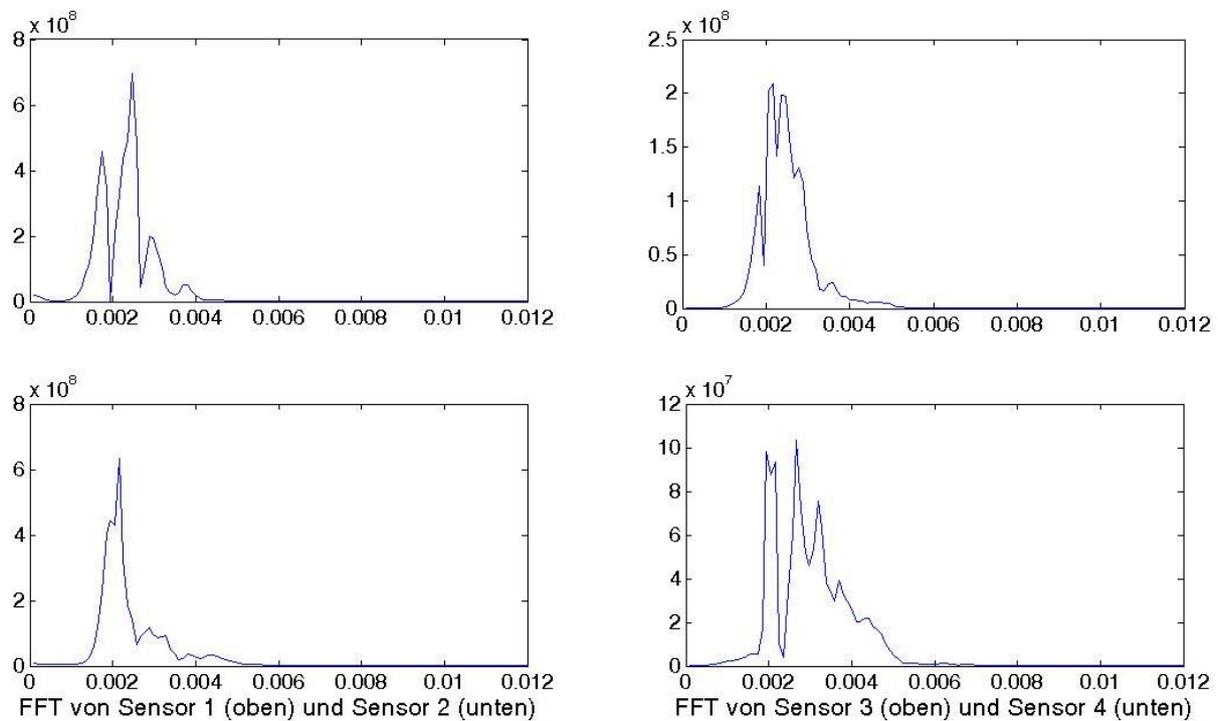


Abbildung 0-2: FFT der ersten drei Sensoren aus Abbildung 4-3. Die Abszisse wird in MHz dargestellt, für die Ordinate wurde die lineare Darstellung für den Energieanteil gewählt.

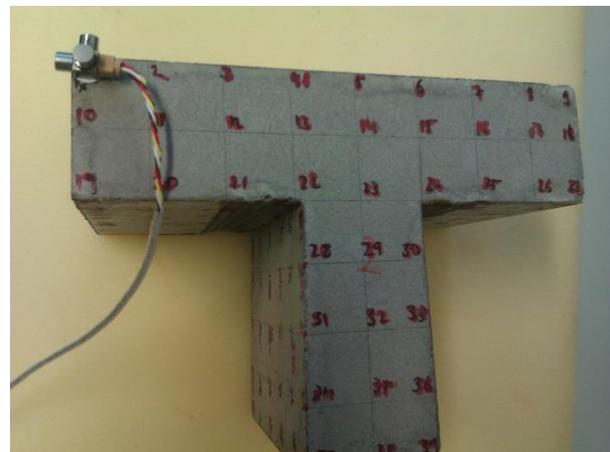
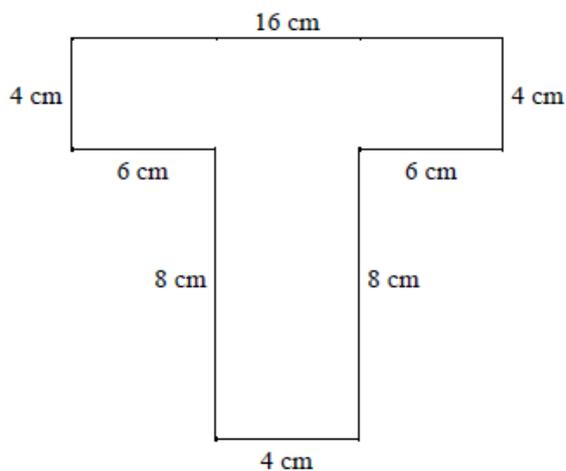
## VIII. Geometriebetrachtung für die Modalanalyse

Im Zuge der Bachelorarbeit von Herrn Tobias Deschauer (Deschauer [2013]) wurden Probekörper mit verschiedener Geometrie mit dem LMS-Modalanalysesystem untersucht. Dabei wurden komplette Modalanalysen durchgeführt, die das Abrastern eines Messgitters vorsehen. Im Folgenden wird gezeigt, dass komplexe Probekörper durchaus für die Modalanalyse geeignet sind. Auffällig dagegen ist, dass Probekörper, bei denen die Seitenlängen sehr ähnlich sind (kubische Formen), eher schlecht zu interpretierende Ergebnisse aufweisen, was auch die schwierige Auswertung der Impaktprobekörper unterstützt.

Es werden immer die Probekörper mit den entsprechenden Frequenzbildern und den dazugehörigen Schwingungsbildern dargestellt.

### T-Träger

Bei dieser Form wurden zwei verschiedene Probekörper mit unterschiedlicher Höhe hergestellt. Die Grundfläche war für beide Probekörper wie in Abbildung 0-3 (links) beschrieben. Die Flexural- und die Torsionalschwingung konnte besonders gut angeregt werden (Abbildung 0-4 und Abbildung 0-5).



**Abbildung 0-3:** T-Form für die Modalanalyse. Links: Abmessungen der Form ohne Höhenangabe. Rechts: Einer der Probekörper mit Messraster und Sensor oben links (Deschauer [2013]).

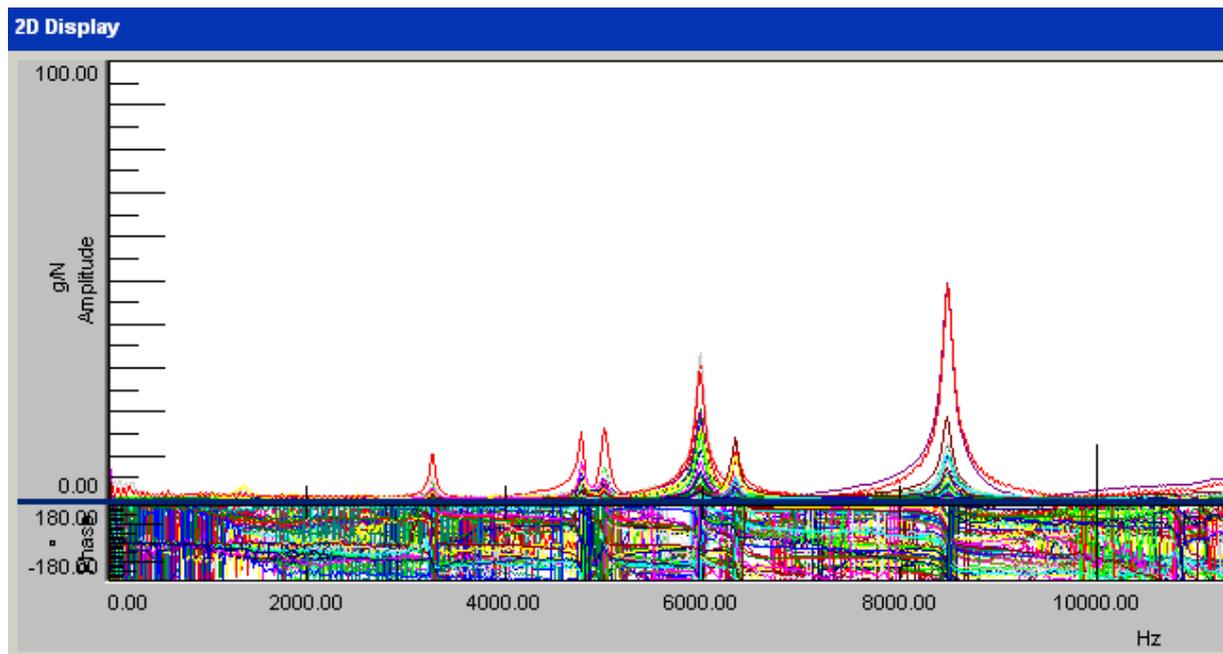


Abbildung 0-4: Frequenzdarstellung der gemessenen Schwingungen des T-Trägers. Es sind eindeutige Spitzen zu erkennen. Im unteren Bereich wird der Phasenverlauf gezeigt, hier durch sehr viele Messungen nur schwer erkennbar (Deschauer [2013]).

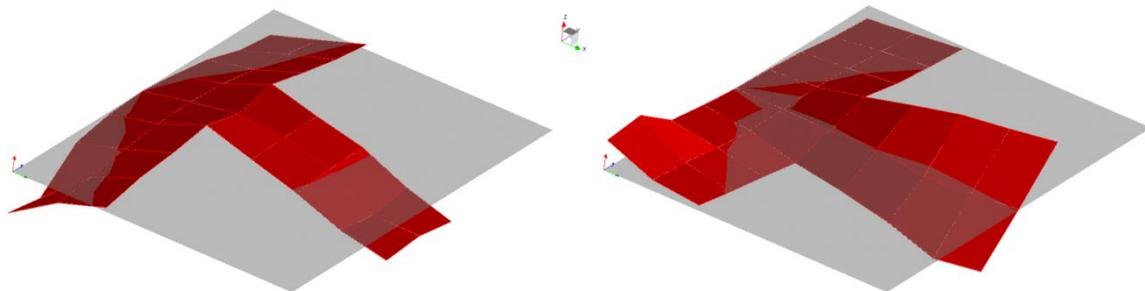


Abbildung 0-5: Schwingungsbilder für die Flexuralschwingung (links) und die Torsionalschwingung (rechts) (Deschauer [2013]).

### U-Form

Wie bei dem T-Träger wurden hier zwei verschiedene Probekörper mit unterschiedlicher Höhe hergestellt. Die Flexural- und die Torsionalschwingung konnte besonders gut angeregt werden (Abbildung 0-4 und Abbildung 0-5).

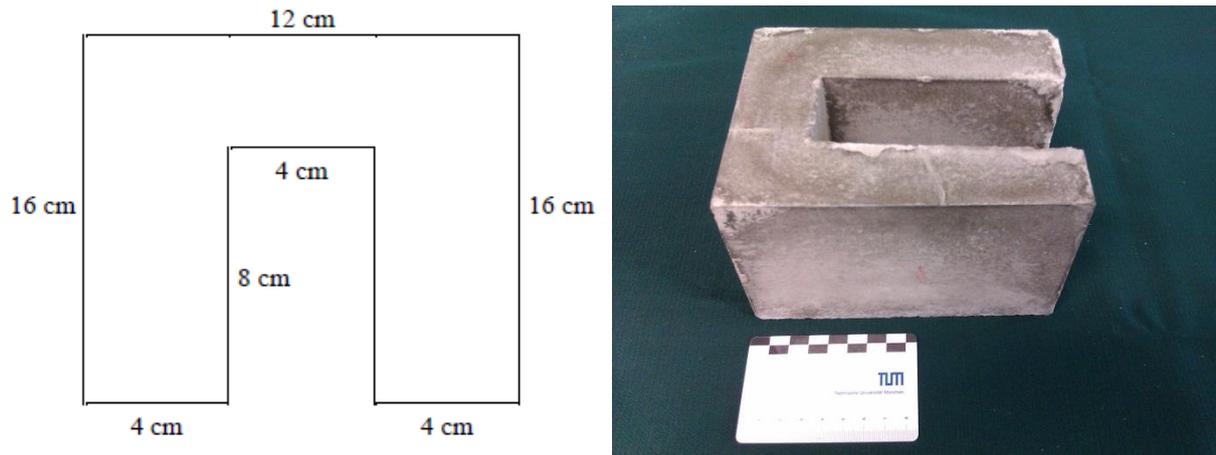


Abbildung 0-6: U-Form für die Modalanalyse. Links: Abmessungen der Form ohne Höhenangabe. Rechts: Einer der Probekörper mit Maßstab (Deschauer [2013]).

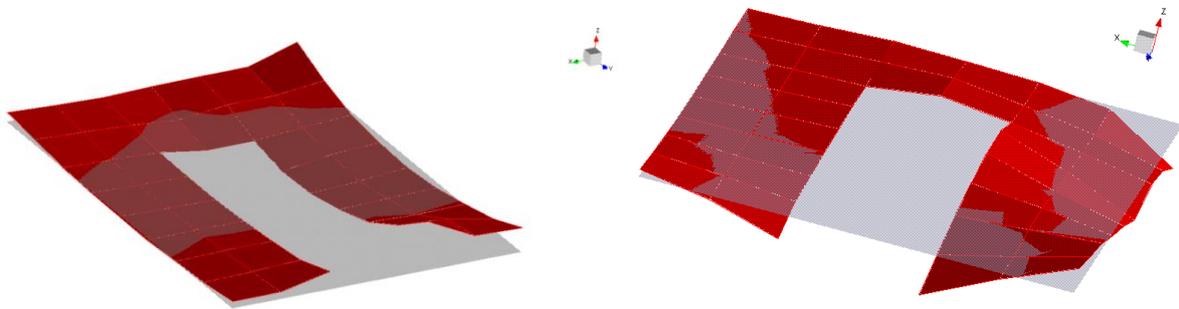


Abbildung 0-7: Schwingungsbilder für die Flexurschwingung (oben) und die Torsionalschwingung (unten).

### Würfel mit 4 cm Kantenlänge

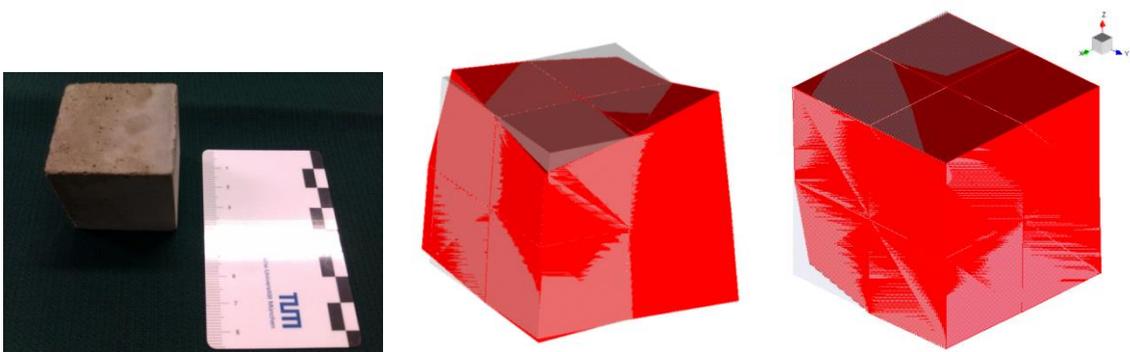


Abbildung 0-8: Würfel mit 4 cm Kantenlänge. Von links nach rechts: Probekörper, Schwingungsbild der Torsionalschwingung, Schwingungsbild der eventuellen Longitudinalschwingung.

Rechteck: 4 cm x 4 cm x 1 cm

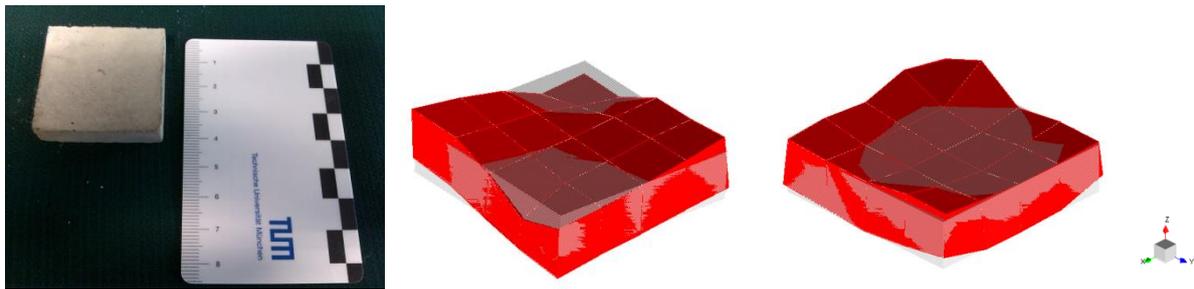


Abbildung 0-9: Würfel mit Kantenlänge 4 cm x 4 cm x 1 cm. Von links nach rechts: Probekörper, Schwingungsbild der Torsionalschwingung, Schwingungsbild der Flexuralschwingung.

Prisma: 4 cm x 4 cm x 16 cm

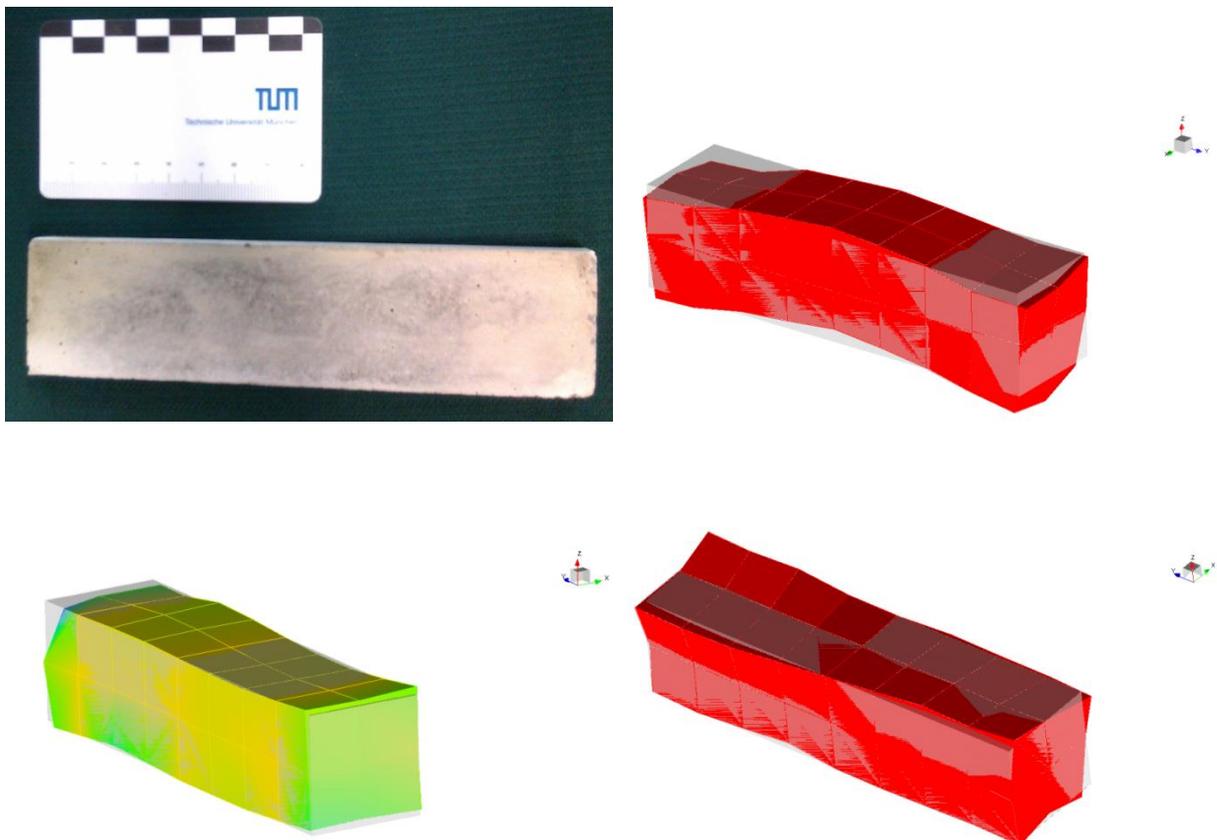


Abbildung 0-10: Oben: Probekörper (links) und Schwingungsbild der Flexuralschwingung (rechts). Unten: Schwingungsbild der Longitudinalschwingung (links) und der Torsionalschwingung (rechts).

## IX. Phasenspektroskopie

Im Zuge des Forschungspraktikums von Frau Susanne Wiesnet wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen Probekörpern mittels Phasenspektroskopie durchgeführt. Die Phasenspektroskopie war für Messungen vor und nach den Impaktexperimenten gedacht. Testversuche und Literaturrecherchen haben gezeigt, dass der Messaufbau, welcher an dem Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung vorhanden ist, für die Größe der Probekörper nicht den beabsichtigten Zweck erfüllen konnte. Daher werden eine kurze Einführung zum Messprinzip, Messsystem und ein Einblick in die Ergebnisse gezeigt.

Die (Ultraschall) Phasenspektroskopie zählt zu den aktiven Prüfmethode der zerstörungsfreien Verfahren und ist seit den 70er Jahren durch Lynnworth et al. [1973] beschrieben. Ebenso wie die US-Durchschallung und das Impakt-Echo-Verfahren gehört diese Methode zu den Ultraschall-Verfahren. Diese Messmethode wird herangezogen, um die geometrische Ausdehnung der Schädigungszone des untersuchten Objektes zu charakterisieren. Die Phasenspektroskopie ist je nach Konfiguration in der Lage, die Ausdehnung und den Grad der Schädigung zu erfassen. Die Vorgehensweise bei der Phasenspektroskopie ist ähnlich wie bei der US-Durchschallung und ist in der Messtechnik allgemein als  $\pi$ -Phasen Vergleichsverfahren bekannt. Für die Aufzeichnung wird ein Netzwerkanalysator verwendet, der bereits alle Messgeräte vereint. Dazu gehören ein Frequenzanalysator, ein Frequenzzähler und für die Datendarstellung ein Oszilloskop. Zu Beginn der Messung wird die Sensorkennlinie kalibriert, um Fehlinformationen zu vermeiden. Weiterhin werden zwei Ultraschallsensoren benötigt. Die Messgröße bei der Phasenspektroskopie ist der Phasenverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz (Finck et al. [2002]). Gemessen wird die Phase des Ausgangssignals. Das aufgezeichnete Signal wird dann mit dem bekannten Eingangssignal verglichen und über die Frequenz aufgetragen (Ruck [2003]). Bei gelungener Messung erhält man eine Kurve mit einer linearen Abhängigkeit. Die Steigung der Kurve gibt Auskunft über die Gruppengeschwindigkeit (Finck et al. [2002], Ruck [2003]). Werden Flächenscans an den Prüfobjekten durchgeführt, können schließlich Intensitätsdiagramme auf die innere Struktur des Körpers schließen. Dabei sind die Wahl des Scanrasters und die Sensorgröße ausschlaggebend für die Genauigkeit und Auflösung der Messung (Finck et al. [2002]).

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau kurz in Bildern gezeigt und drei Messergebnisse dargestellt und erläutert.

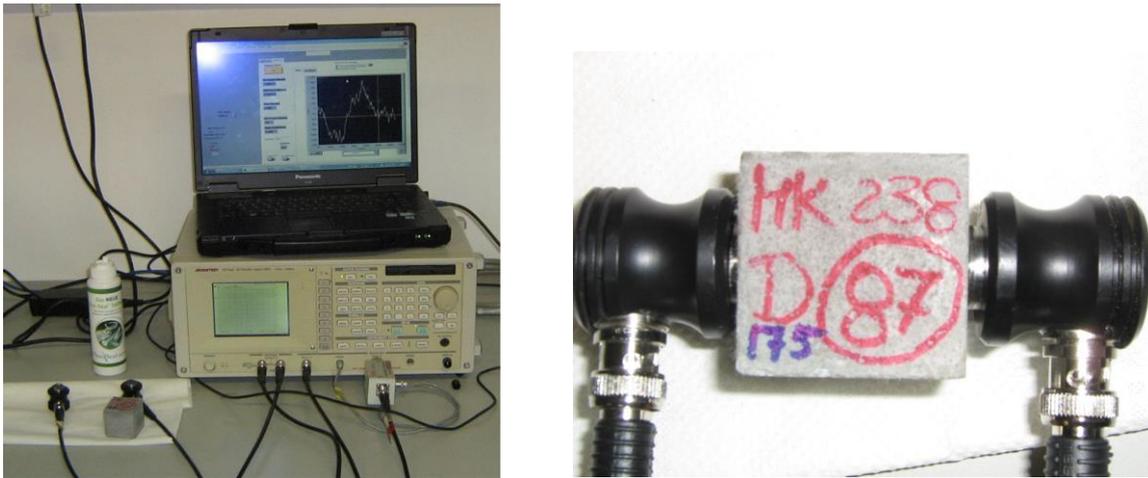


Abbildung 0-11: Aufbau der Phasenspektroskopie mit Messrechner, Netzwerkanalysator und Sensoren (links) und den Sensoren und einem Probekörper (rechts).

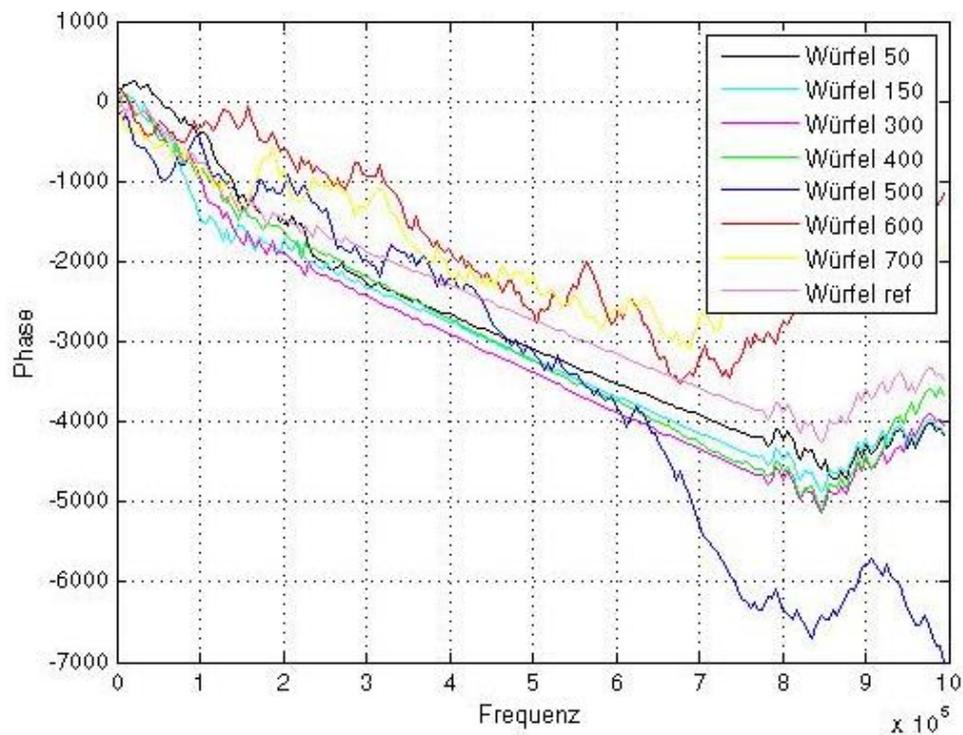


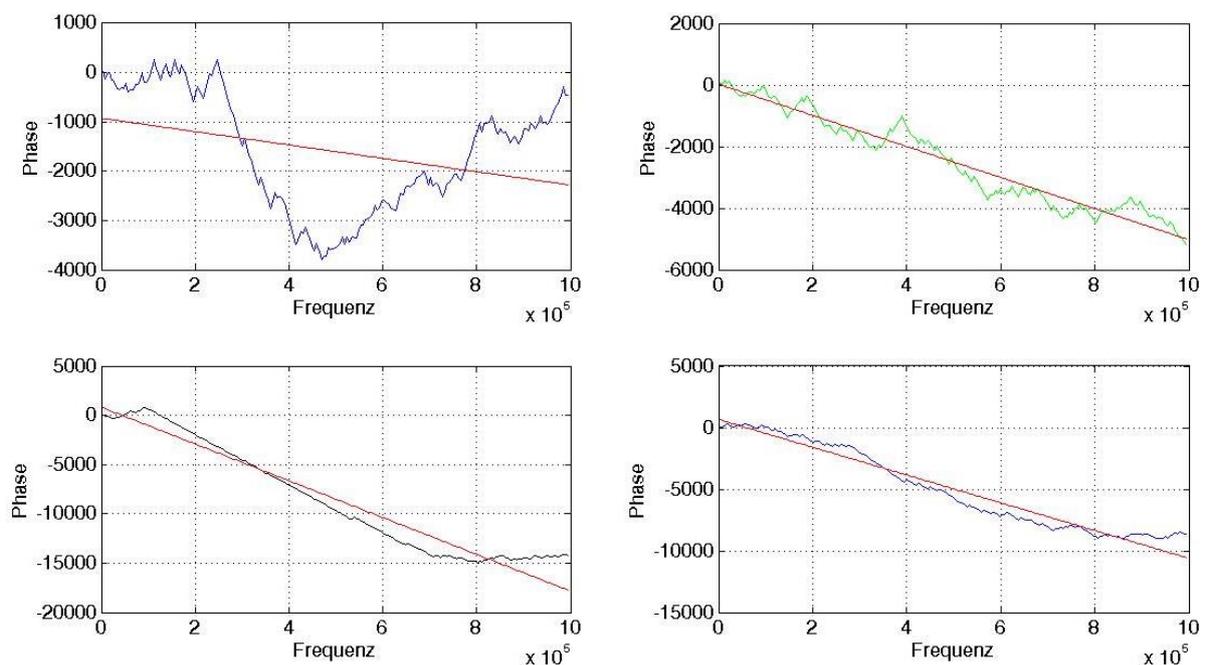
Abbildung 0-12: Phasenspektroskopie Messung an acht verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlicher Temperaturbehandlung. Die Temperaturen sind in der Legende abzulesen.

In Abbildung 0-11 wird der Messaufbau für die Phasenspektroskopie gezeigt. Es wurden Testmessungen an Probekörpern mit 4 cm Kantenlänge durchgeführt. Die Probekörper waren unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt und haben dadurch unterschiedlich starke Schädigungen erhalten. Abbildung 0-12 zeigt die Messergebnisse. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Schädigung die Messkurve

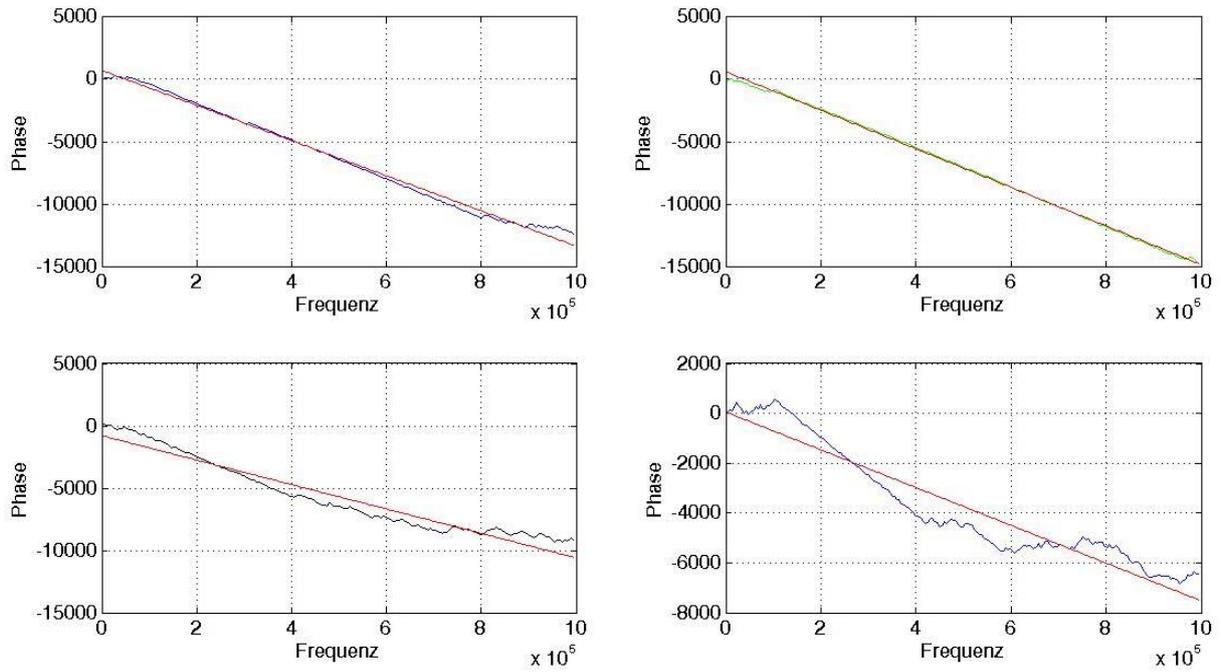
schlechter wird. Das Rauschen nimmt zu und der für die Phasenspektroskopie charakteristische negative Gradient ist nicht mehr eindeutig erkennbar.

Abbildung 0-13 zeigt Messergebnisse an einem Sandstein-Probekörper mit 20 cm Kantenlänge. Das Diagramm oben links hat keinen nachvollziehbaren Verlauf aufzuweisen. Die Diagramme auf der rechten Seite zeigen zwar den typischen negativen Gradienten, jedoch sind die Signale stark verrauscht. Lediglich das untere linke Diagramm weist einen typischen Verlauf auf, aus dem die Steigung abgelesen werden kann. In Abbildung 0-14 werden ebenfalls vier Messergebnisse an einem Sandstein gezeigt. Hier war die Kantenlänge 10 cm. Durch die kürzere Strecke erfährt das Signal eine geringere Dämpfung und kann somit den charakteristischen Verlauf für das Frequenz-Phasen-Diagramm zeigen. Auch hier zeigen die beiden unteren Diagramme einen großen Rauschanteil, jedoch kann hier die Steigung noch abgeschätzt werden.

Für weitere Untersuchungen sollten Sensoren verwendet werden, die bei der Größe der Probekörper ein besseres Signal zu Rausch (S/N)-Verhältnis erzeugen. Die Probekörper müssen entsprechend klein gewählt werden.



**Abbildung 0-13: Messergebnisse der Phasenspektroskopie für einen Sandstein mit 20 cm Kantenlänge ohne Schädigung.**



**Abbildung 0-14: Messergebnisse der Phasenspektroskopie für einen Sandstein mit 10 cm Kantenlänge mit Schädigung.**