

„Entwicklung eines Ultraschallgerätes zur Analyse anthropogener
Umweltschäden an Denkmälern aus Marmor“

Aktenzeichen 28644-45

Abschlussbericht

Oktober2013

Inhalt	Seite
Gegenstand und Zielsetzung des Projektes	3
Art und Umfang der Durchführung	5
AP1: Spezifikation	7
AP2: Herstellung von Ultraschallphantomen	8
AP3: Erste Messungen mit einkanaligen Systemen	11
AP4: Aufbau von Phased Array Messköpfen	17
AP5: Aufbau eines Phased Array Laborsystems	24
AP6: Optimierung des Phased Array Laborsystems	33
AP7: Tests	44
Zusammenfassung und Ausblick	56

Gegenstand und Zielsetzung des Projektes

Ziel des Projektes war die Überprüfung des Anwendungspotentials moderner Ultraschalltechnologie zur zerstörungsfreien Analyse von Denkmälern aus Marmor. Der Naturstein Marmor wird seit der Antike als Baumaterial für repräsentative Gebäude, zu deren Verzierung und für Skulpturen eingesetzt. Marmor ist ein metamorphes, poröses Gestein, das überwiegend aus den calciumhaltigen Mineralien Calcit, Dolomit und/oder Aragonit besteht. Die chemische Zusammensetzung und die Porosität des Materials machen es anfällig für Umwelteinflüsse. Marmor ist immer einer natürlichen Verwitterung ausgesetzt, diese wird jedoch seit Beginn der Industrialisierung durch zunehmende anthropogene Umweltschäden beschleunigt. Wegen der kunst- und kulturhistorischen Bedeutung des Marmors arbeiten heute die verschiedensten Wissenschaften an Verfahren zur Restaurierung und Konservierung von Objekten aus diesem Material. Eine besondere Bedeutung fällt dabei der Analyse des aktuellen Zustandes und vorangegangener Renovierungsarbeiten zu. Eine zuverlässige Prüfung des Zustandes ist die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Restaurierung und Konservierung. Idealerweise ist eine solche Prüfung zerstörungsfrei, leicht anzuwenden und schnell. Diese Anforderungen werden von Prüfverfahren mittels Ultraschall erfüllt. Ob in der Medizintechnik oder in der Materialprüfung, moderne Ultraschallverfahren sind dafür bekannt, zerstörungsfrei, zuverlässig und schnell zu sein. Wie im Kapitel „Stand des Wissens / der Technik“ des Projektantrages dargestellt wurde, wird Marmor bereits seit langem mit Ultraschall untersucht. Jedoch ist der Messaufwand groß, die Verfahren sind langsam und nicht bildgebend. Aus Schallgeschwindigkeit und Dämpfung werden Rückschlüsse auf den Zustand des Steins gezogen. Desweiteren müssen fast immer Ultraschallwandler allseitig angebracht werden. Moderne Ultraschalltechnik bietet die Möglichkeit verschiedenste Fehlstellen dreidimensional darzustellen und zu vermessen.

Im Rahmen des Projektes sollte überprüft werden, in wie weit moderne bildgebende Ultraschallverfahren aus der Medizintechnik zur Analyse von Kunstobjekten und Kulturdenkmälern aus Marmor eingesetzt werden können. Ultraschallsysteme, die mit Phased Array Technik ausgestattet sind und durch ein 3D Magnetic Field Tracking System ergänzt werden, entsprechen dem neuesten Stand der Technik in der Medizintechnik und können sehr erfolgsträchtig für die zerstörungsfreie Prüfung von kulturellem Erbe modifiziert werden.

Prinzipiell können in der Ultraschalltechnik zwei Verfahren zur Darstellung von Strukturen in einer Ebene unterschieden werden. Der Fokus der Schallkeule wird mechanisch in einer Ebene bewegt oder der Fokus wird elektronisch bewegt. Das elektronische Scannen einer Ebene wird als Phased Array Technik bezeichnet. Als Schwingungsgeber wird in beiden Techniken meist eine piezoelektrische Keramik eingesetzt. Während beim mechanischen Bewegen des Fokus meist

eine runde piezoelektrische Keramik als einelementiger Ultraschallwandler betrieben wird, wird für Phased Array Systeme eine meist rechteckige Keramik in mehrere Segmente unterteilt, wodurch eine Reihe (engl. array) von parallel zueinander angeordneten Keramikstäben entsteht. Diese können getrennt voneinander angesteuert werden. Der Fokus wird durch eine Ebene bewegt, indem von verschiedenen Elementen des Array zu unterschiedlichen Zeitpunkten Ultraschallpulse unterschiedlicher Intensität ausgesandt werden. Dazu wird die Ansteuerung der Elemente aufeinander abgestimmt (engl. to phase).

Ein Ultraschall-Scan stellt immer nur eine Ebene dar. Will man das untersuchte Objekt dreidimensional darstellen, so müssen die Koordinaten der Scans erfasst werden und die Einzelbilder zu einer dreidimensionalen Darstellung zusammengefügt werden. Zur Erfassung der Koordinaten eines Scans können optische und magnetische Systeme verwandt werden, die als Tracking Systeme bezeichnet werden. Optische Tracking Systeme haben den Nachteil, dass sie im Schatten, z.B. einer Skulptur, nicht funktionieren. Magnetische Systeme haben diesen Nachteil nicht. Neueste Systeme mit gepulstem Gleichstrom, können sogar in der Umgebung von Metallen arbeiten. In einem künstlich erzeugten Magnetfeld wird die Position mit Hilfe von Induktionsspulen bestimmt, die sich im Ultraschallkopf befinden.

Das Gerät kann für die Untersuchung von Fehlstellen wie Rissen, Dübeln, Armierungen und alten Reparaturen in Marmor genutzt werden. Antike Statuen können ebenso untersucht werden wie historische Fassaden. Dabei besteht die Möglichkeit das gesamte Equipment als ein tragbares Gerät zu gestalten. Bei Messungen mit Phased Array Technik entfällt auch das Problem der allseitigen Zugänglichkeit des zu untersuchenden Objekts, weil es nur einen Messkopf gibt und nicht, wie bisher, mehrere Sender und Empfänger an der Skulptur angebracht werden müssen.

In Zusammenhang mit dem Projekt sollten grundlegende Fragen in Bezug auf die Anwendbarkeit der Phased Array Technologie auf Objekte aus Marmor geklärt werden. Die aus der Medizintechnik bekannte Technologie sollte für die geplante Anwendung an Skulpturen und Fassaden aus Marmor modifiziert werden. Nach ersten Einschätzungen konnte davon ausgegangen werden, dass die Algorithmen der Signalverarbeitung, der Ultraschallmesskopf und dessen Ankopplung an den Marmor an die neue Messaufgabe angepasst werden mussten.

- Die Algorithmen der Medizintechnik setzen voraus, dass die akustischen Parameter des zu untersuchenden Objektes konstant sind. Dies ist in Bezug auf Marmor nicht der Fall. Diese Bedingung musste bei den Entwicklungen berücksichtigt werden.
- Die Phased Array Systeme der Medizintechnik arbeiten meist bei Frequenzen zwischen 5 MHz und 10 MHz. Erste Voruntersuchungen wiesen darauf hin, dass für Anwendungen an Marmor dieser Frequenzbereich stark gedämpft und deutlich niedrigere Frequenzen zur Anwendung kommen müssen. Ultraschall-Arrays dieser Frequenz müssen für die

geplanten Anwendungen erst entwickelt und die vorhandenen Phased Array Systeme angepasst werden.

- Eine ebenfalls noch ungelöste Frage war die Ankopplung an den Marmor. Für einkanalige Systeme ist fettfreier Modellerton als Koppelmittel bekannt. Ob dieser auch dann verwendet werden kann, wenn der Ultraschallwandler über das zu untersuchende Objekt bewegt wird, war zu untersuchen und gegebenenfalls musste ein alternatives Koppelmittel gesucht werden.

Nach erfolgreichem Projektabschluss sollte auf die Ergebnisse mit der Zielsetzung aufgebaut werden, Konservierungswissenschaftlern, Restauratoren und Bauingenieuren ein tragbares Ultraschallgerät zur Analyse von Umweltschäden an Marmor zur Verfügung zu stellen. Gegebenenfalls sollte diese Entwicklung im Rahmen einer Produktentwicklung erfolgen, die von dem Projekt nicht geleistet werden kann. Dieses sollte den Einstieg in eine neue Technologie zur schnellen und einfachen Untersuchung von Kulturgütern aus Marmor ermöglichen.

Art und Umfang der Durchführung

Das Projekt wurde in die folgenden Arbeitspunkte untergliedert:

AP1: Spezifikation

Gemeinsam werden mögliche Marmorarten, Geometrien und Fehlstellen, wie Verwitterung, Risse, Armierungen, Dübel und Füllmaterialien, der zu untersuchenden Objekte beschrieben.

Auf der Grundlage von Literaturrecherchen und den Erfahrungen des Rathgen-Forschungslabors werden die Spezifikationen eines zukünftigen Ultraschallgerätes mit Phased Array Technik definiert.

AP2: Herstellung von Ultraschallphantomen

Mit den Daten aus AP1 werden so genannte Ultraschallphantome, d.h. Dummies, aus Marmor hergestellt. Diese weisen genau definierte Fehlstellen und Restaurierungsmaßnahmen auf, die durch das zu entwickelnde Gerät exakt abgebildet werden sollen. Darüber hinaus sind Phantome für den Laborbetrieb besser geeignet und wertvolle Kunstobjekte werden geschützt.

AP3: Erste Messungen mit einkanaligen Systemen

Es werden erste Messungen an den Phantomen aus AP2 mit konventionellen einkanaligen Ultraschallsystemen durchgeführt und die dabei gewonnenen Daten mit Literaturwerten verglichen.

AP4: Aufbau von Phased Array Messköpfen

Auf Grundlage der Daten aus AP1 und AP3 werden Phased Array Messköpfe hergestellt, die an das Anforderungsprofil von Messungen an Marmor angepasst sind. Dies geschieht unter besonderer Berücksichtigung der Geometrie, der akustischen Anpassung und der akustischen Ankopplung.

AP5: Aufbau eines Phased Array Laborsystems

Ein erstes, möglichst tragbares, Phased Array Laborsystem wird auf Grundlage der Daten aus AP1 und AP3 aufgebaut.

AP6: Optimierung des Phased Array Laborsystems

Das auf Grundlage der Daten aus AP1 und AP3 entworfene und aufgebaute Laborsystem und die Messköpfe werden an Phantomen getestet und weiterentwickelt.

AP7: Tests

Nach Abschluss der Optimierung im Labor wird das System von den Staatlichen Museen zu Berlin an realen Objekten getestet.

Die zu den oben genannten Arbeitspunkten geleisteten Arbeiten werden im Folgenden wiedergegeben.

AP1 Spezifikation

Nach der Bewilligung des Projekts zum 13.12.2010 konnte das Kick Off Meeting der Projektpartner am 21.01.2011 in den Räumen des Fraunhofer-Instituts für Biomedizinische Technik, IBMT, stattfinden. In Bezug auf die geplante Herstellung von Ultraschallphantomen und die spätere Untersuchung an realen Objekten wurden bezüglich der Marmorsorten, der Geometrie der Phantome und der Verwitterungsgrade folgende erste Arbeitsgrundlagen beschlossen:

- nur Proben aus Carraramarmor werden in die Entwicklung einbezogen,
- die Ultraschallphantome sollen als Würfel von 5 cm und 10 cm Kantenlänge hergestellt werden,
- als Fehlstellen sollen der Verwitterungszustand, Hohlräume, gefüllte Hohlräume, Metalldübel, geklebte Risse und mit Polymer stabilisierter Marmor berücksichtigt werden.

Bezüglich der zukünftigen Spezifikation des Ultraschallgerätes wurde eine möglichst hohe Arbeitsfrequenz als wünschenswert erklärt.

AP2 Herstellung von Ultraschallphantomen

Wie in AP1 beschlossen wurden alle Ultraschallphantome aus Carraramarmor hergestellt. Ein Teil der Proben wurden thermisch gealtert, um unterschiedliche Verwitterungszustände zu simulieren. In die Proben mit jetzt ca. 4,5 cm Kantenlängen wurden typische Fehlstellen präpariert. Exemplarisch zeigen die Abbildungen 1 und 2 Fotos der Ultraschall-Phantome und ihre Eigenschaften werden in den Tabellen 1 und 2 wiedergegeben.

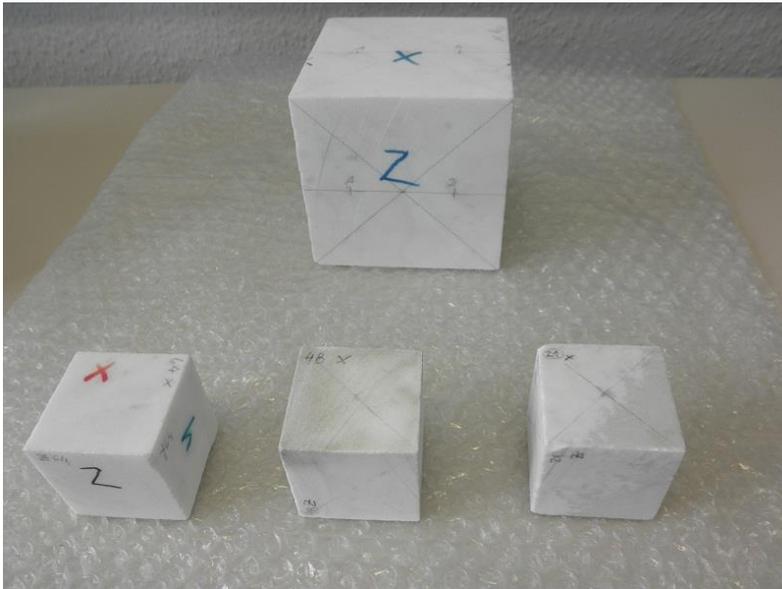


Abbildung 1: 1 Würfel ca. 10 cm Kantenlänge und 3 Würfel ca. 4,5 cm Kantenlänge verschiedener Verwitterungszustände.



Abbildung 2: 14 Würfel ca. 4,5 cm Kantenlänge mit definierten Fehlstellen.

Thermische Alterung	Präparation	Nr.
frischer Marmor	zerteilt, Hohlraum Ø=10 mm gebohrt, Gips gefüllt und geklebt	1
	zerteilt, Hohlraum Ø=10 mm gebohrt, nicht verfüllt, Kalloplast R geklebt	2
	zerteilt, Kalloplast R geklebt	3
	zerteilt, Hohlraum Ø=8 mm gebohrt, Edelstahldübel Ø=6 mm Kalloplast R geklebt	4
	frischer Marmor	64
180 °C, mittel verwittert	zerteilt, Hohlraum Ø=10 mm gebohrt, nicht verfüllt, Kalloplast R geklebt	6
	zerteilt, Kalloplast R geklebt	7
	zerteilt, Hohlraum Ø=8 mm gebohrt, Edelstahldübel Ø=6 mm Kalloplast R geklebt	8
	zerteilt, Hohlraum Ø=10 mm gebohrt, Gips gefüllt und geklebt	9
	gefestigt mit 10%-igem Paraloid B72, kapillares Aufsaugen maximale Eindringtiefen von ca. 7 mm	10
500 °C, verwittert	1 Stunde, gefestigt mittels Acrylharzvolltränkung	21
	1 Stunde	48
600 °C, stark verwittert	zerteilt, Hohlraum Ø=10 mm gebohrt, nicht verfüllt, Kalloplast R geklebt	11
	zerteilt, Hohlraum Ø=10 mm gebohrt, Gips gefüllt und geklebt	12
	zerteilt, Hohlraum Ø=8 mm gebohrt, Edelstahldübel Ø=6 mm Kalloplast R geklebt	13
	zerteilt, Kalloplast R geklebt	14
	gefestigt mit 10%-igem Paraloid B72, kapillares Aufsaugen maximale Eindringtiefen von ca. 35 mm	15

Tabelle 1: Zuordnung der präparierten Ultraschallphantome mit ca. 4,5 cm Kantenlänge.

Thermische Alterung	Nr.
Keine	10g
	11g
	12g
	13g
180 °C, mittel verwittert	G4
	G5
	G6
600 °C, stark verwittert	G7
	G8
	G9

Tabelle 2: Zuordnung der Ultraschallphantome mit ca. 10 cm Kantenlänge.

Die 17 Würfel mit definierten Störstellen können 3 Verwitterungszuständen zugeordnet werden. Jeweils 5 Würfel wurden bei 180 °C, bzw. 600 °C, nach der Methode des HERMES Projektes des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege verwittert. Der erste Erhitzungszyklus verursachte die stärksten Schädigungen im Marmor. Weiterhin zeigte das Projekt, dass eine thermische Behandlung von Marmor vergleichbar mit einer natürlichen Alterung ist. In diesen Proben können Schallgeschwindigkeiten von 3000 m/s und 1500 m/s erwartet werden. Die verbleibenden Proben wurden nicht thermisch verwittert, ihre Schallgeschwindigkeit sollte bei 5000 m/s liegen. Nach Rücksprache mit Herrn Wolfgang Maßmann, dem leitenden Restaurator der Antikensammlung der Staatlichen Museen zu Berlin, und Frau Dipl. Restauratorin Sophie Haake wurden die kleinen Würfel mit typischen Fehlstellen sowie Restaurierungsmaßnahmen präpariert.

AP3 Erste Messungen mit einkanaligen Systemen

Die Entwicklung des Phased Array Systems wurde mit einkanaligen Messungen begonnen, um so eine Datenbasis für die weitere Entwicklung zu schaffen. Dazu wurden die Schallgeschwindigkeit und die Dämpfung in Abhängigkeit von der Orientierung und dem Verwitterungsgrad an allen Marmorwürfeln gemessen, die keine weitere Präparation aufwiesen. Für die Messungen wurden konventionelle ½-Zoll Ultraschallwandler der Firma Panametrics verwendet, deren Mittenfrequenzen 1 MHz und 2,25 MHz betragen. Die Messungen wurden mit dem 2,25 MHz Ultraschallwandler begonnen, der auf Grund seiner Frequenzbandbreite auch Messungen bei 1,95 MHz erlaubte. Sollte es nicht möglich sein Würfel mit 10 cm Kantenlänge mit 2,25 MHz Wandlern zu durchschallen, so sollte mit 1 MHz Wandlern gemessen werden.

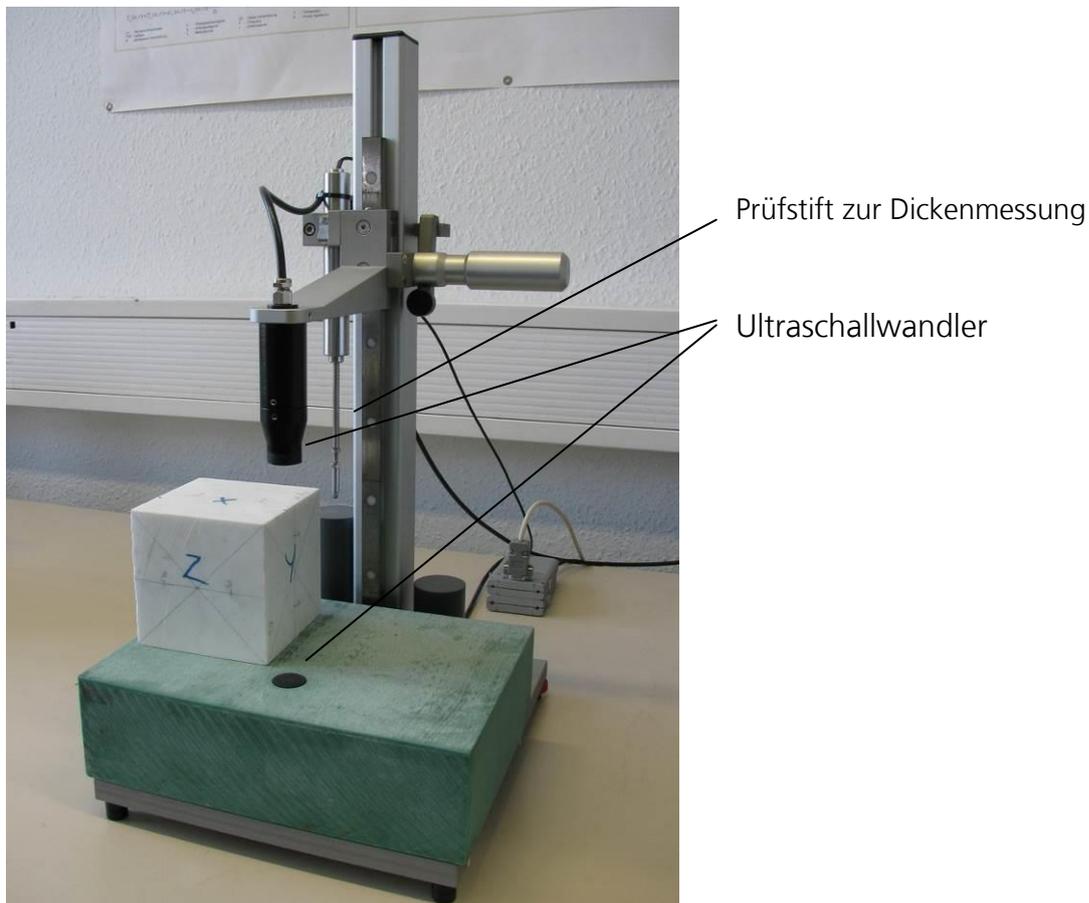


Abbildung 3: Messplatz zur Durchführung der Einkanalmessungen.

Abbildung 3 zeigt ein Foto des Messaufbaus für die Einkanalmessungen. Die Messungen wurden in Transmission durchgeführt, d.h. ein Ultraschallwandler arbeitet als Sender und ein gegenüberliegender als Empfänger. In Abbildung 3 wird der Sender auf den Würfel aufgesetzt

und der Empfänger ist in der Bodenplatte der Messanordnung erkennbar. Beide Ultraschallwandler sind mit einer Koppelschicht aus Silikonerguss mit Karbonteilchen versehen, die ein flächenschlüssiges Ankoppeln des Ultraschallwandlers ohne Beschädigung des Marmors erlauben. Der Messaufbau ist mit einer Tastspitze ausgestattet, mit der die Dicke der Proben während der Messung bestimmt werden kann.

Die Wandler werden mit einer am IBMT entwickelten Sende-Empfangskarte angesteuert und ausgelesen, mit der über eine in LabVIEW programmierten Benutzeroberfläche kommuniziert werden kann. Diese Benutzeroberfläche liefert auch gleichzeitig die Ergebnisse der Signalauswertungen. Abbildung 4 zeigt einen Screen Shot der Benutzeroberfläche. Die Schallgeschwindigkeit wird aus der mit der Tastspitze gemessenen Dicke des Marmors und der Laufzeit des Schalls vom Sende- zum Empfangswandler bestimmt. Die Dämpfung wird aus dem Verhältnis der Amplituden des Sendesignals und des Empfangssignals bestimmt. Dabei ist die Software in der Lage über eine Bandbreite von ca. 0,5 MHz zu extrapolieren, weshalb weiter unten immer 3 Dämpfungswerte zu einer Mittenfrequenz angegeben werden.

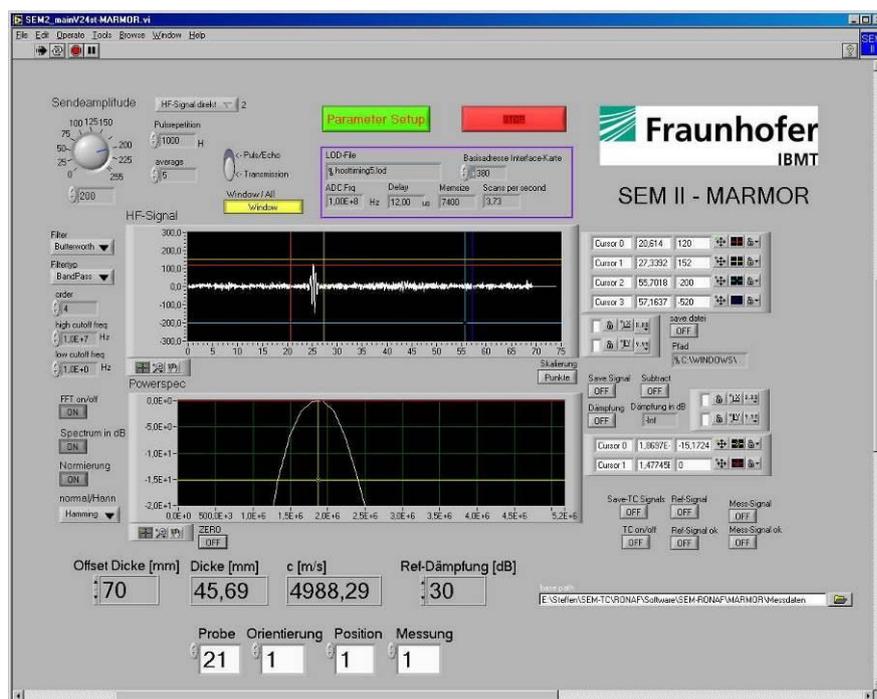


Abbildung 4: Screen Shot der Benutzeroberfläche des Messprogramms.

Zur Erstellung einer Statistik für die Schallgeschwindigkeiten und die Dämpfungswerte wurden die Würfel von ca. 4,5 cm Kantenlänge mit 5 Messpunkten pro Raumrichtung vermessen und Würfel von ca. 10 cm Kantenlänge mit 4 mal 5 Messpunkten pro Raumrichtung. Abbildung 5 zeigt die Lage der Messpunkte auf der Seitenfläche eines kleinen Würfels und in den Abbildungen 6, 7 und 8 sind exemplarisch die Messergebnisse für den Würfel mit der Nummer

10g wiedergegeben. Die Tabellen 3 und 4 geben die Mittelwerte der Schallgeschwindigkeiten und der Dämpfungswerte in Abhängigkeit von der Frequenz und der Raumrichtung an.

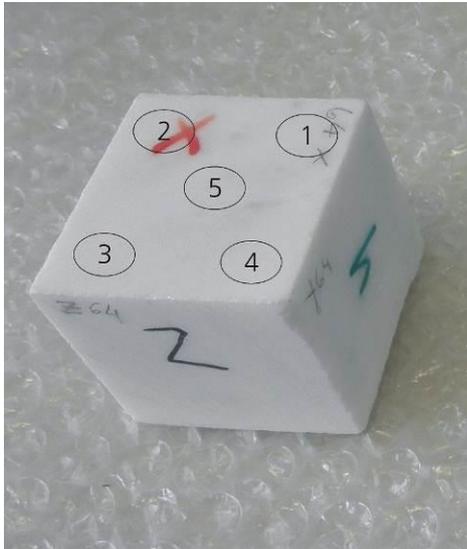


Abbildung 5: Lage der Messpunkte auf der Seitenfläche eines Würfels mit ca. 4,5 cm Kantenlänge.

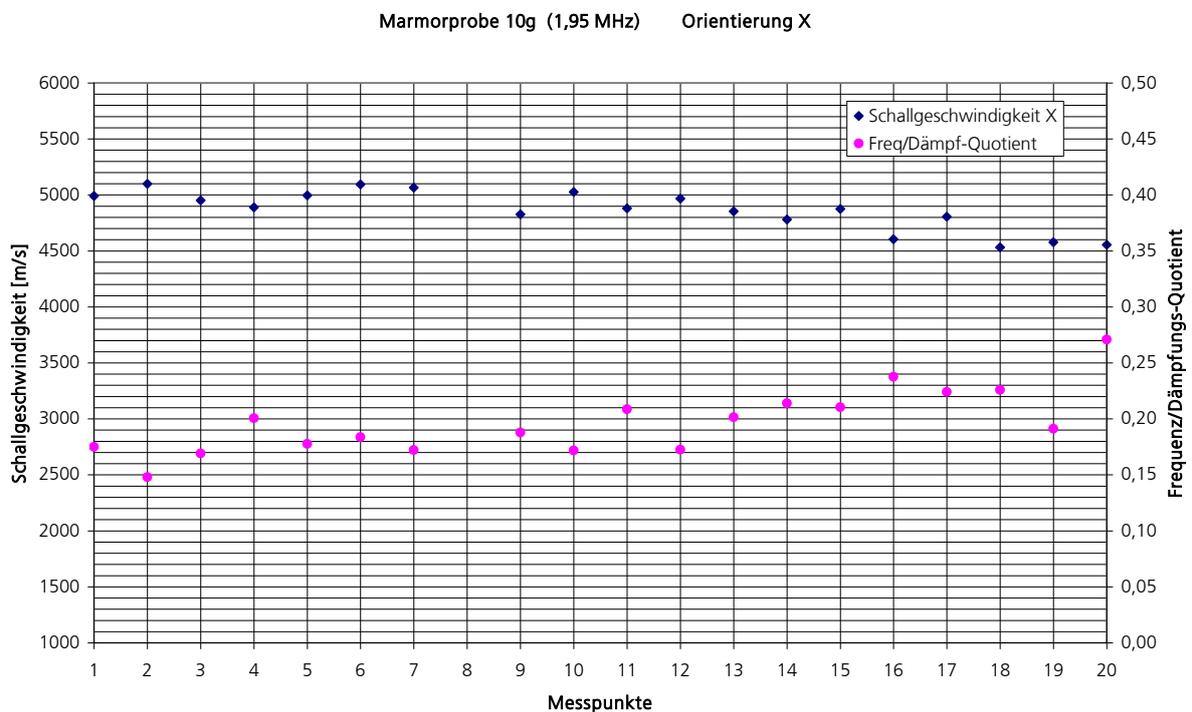


Abbildung 6: Schallgeschwindigkeiten und Dämpfungswerte bei 1,95 MHz der Probe 10g in x-Richtung.

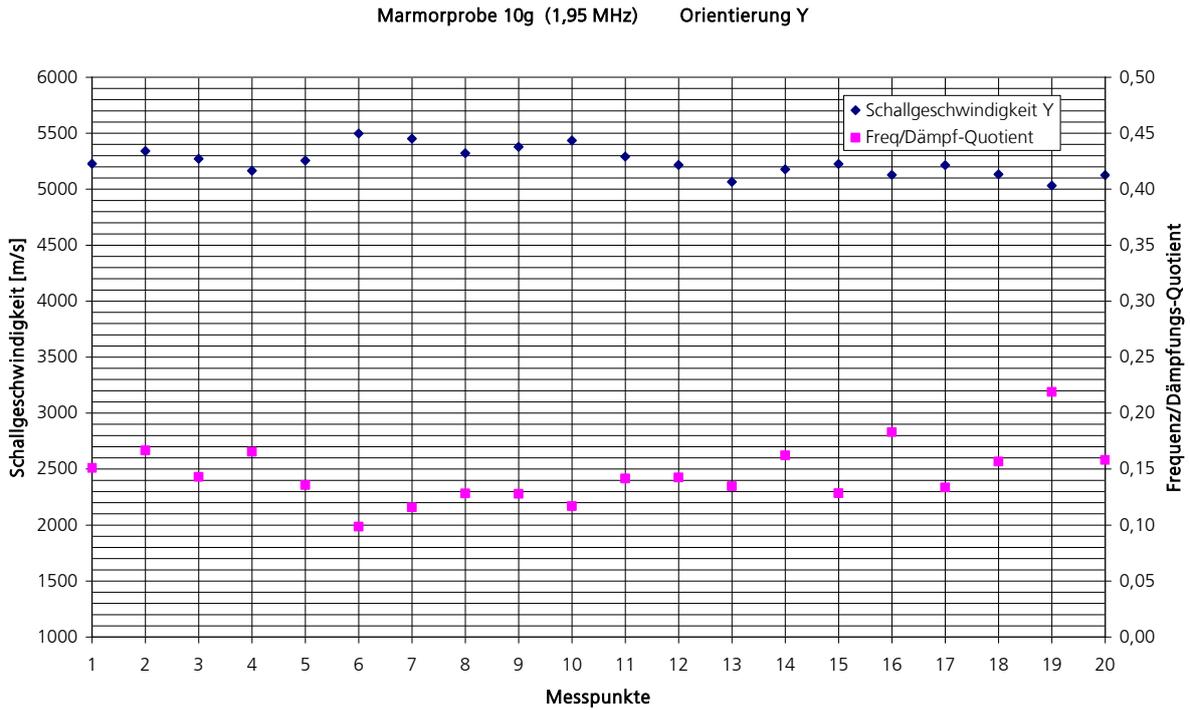


Abbildung 7: Schallgeschwindigkeiten und Dämpfungswerte bei 1,95 MHz der Probe 10g in y-Richtung.

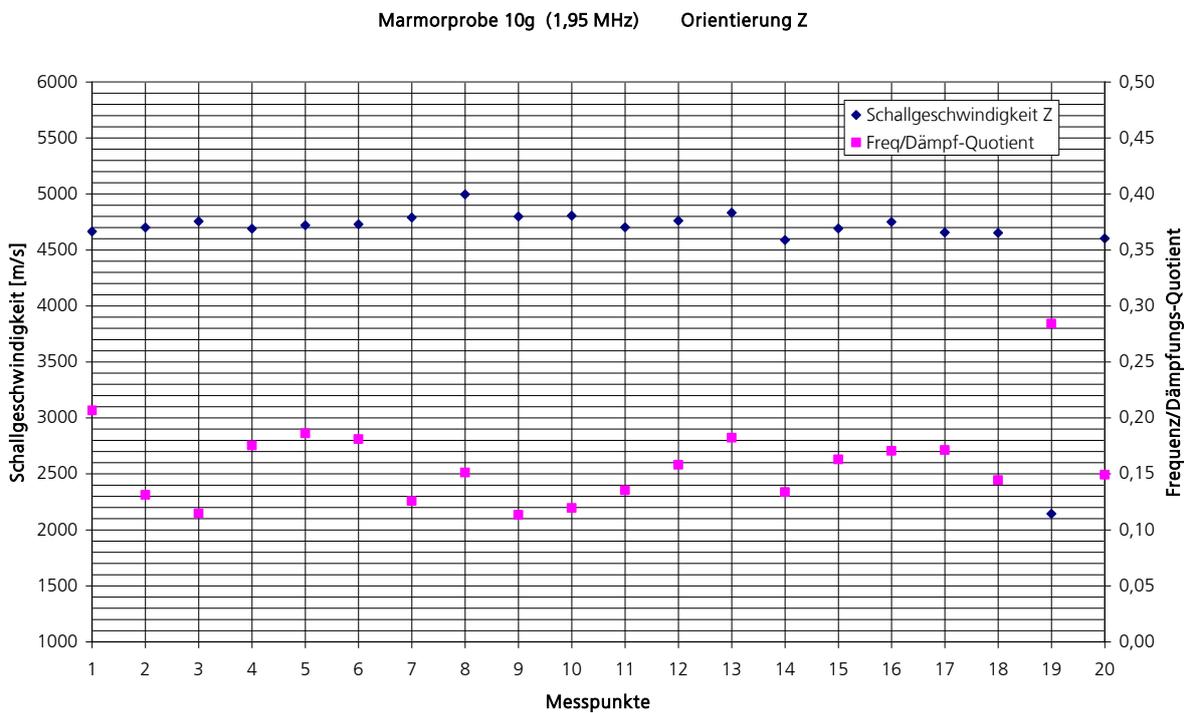


Abbildung 8: Schallgeschwindigkeiten und Dämpfungswerte bei 1,95 MHz der Probe 10g in z-Richtung.

Probe	Zustand	Schallgeschwindigkeit [m/s]		
		X	Y	Z
21	Gefestigt	5802	5834	5721
48	Mittel Verwittert	1564	1950	1623
64	Keine Verwitterung	5073	5386	4995
10g	Keine Verwitterung	4861	5250	4600
11g	Keine Verwitterung	4757	5170	4673
12g	Keine Verwitterung	5154	5442	4987
13g	Keine Verwitterung	4151	4618	4214
G4	Mittel Verwittert	3314	3371	3834
G5	Mittel Verwittert	3497	2922	3053
G6	Mittel Verwittert	3486	3228	3854
G7	Stark Verwittert	1613	1432	1352
G8	Stark Verwittert	1631	1330	1385
G9	Stark Verwittert	1771	1479	1423

Tabelle 3: Mittelwerte der Schallgeschwindigkeiten bei 1,95 MHz in Abhängigkeit von der Raumrichtung.

Probe	Zustand	Freq. [Hz]	Dämpfung [dB/mm]			
			X	Y	Z	Mittelw.
21	Mittel Verwittert	1,27E+06	0,298	0,345	0,336	0,326
		1,95E+06	0,389	0,421	0,406	0,406
		2,40E+06	0,504	0,515	0,534	0,518
48	Mittel Verwittert	1,37E+06	0,871	0,721	0,930	0,840
		1,95E+06	0,983	0,881	0,951	0,938
		2,64E+06	0,750	0,900	0,699	0,783
64	Keine Verwitterung	1,37E+06	0,280	0,305	0,439	0,341
		1,95E+06	0,338	0,350	0,487	0,392
		2,44E+06	0,427	0,437	0,569	0,478
10g	Keine Verwitterung	1,46E+06	0,439	0,450	0,483	0,457
		1,95E+06	0,512	0,497	0,533	0,514
		2,54E+06	0,649	0,605	0,653	0,636
11g	Keine Verwitterung	1,56E+06	0,162	0,160	0,192	0,171
		2,05E+06	0,219	0,204	0,244	0,222

		2,54E+06	0,322	0,288	0,321	0,310
12g	Keine Verwitterung	1,56E+06	0,147	0,157	0,187	0,164
		2,05E+06	0,205	0,211	0,223	0,213
		2,54E+06	0,294	0,297	0,294	0,295
13g	Keine Verwitterung	1,56E+06	0,435	0,415	0,442	0,431
		2,05E+06	0,563	0,500	0,588	0,550
		2,54E+06	0,665	0,562	0,686	0,638
G4	Mittel Verwittert	1,37E+06	0,446	0,479	0,390	0,438
		1,95E+06	0,658	0,718	0,551	0,642
		2,54E+06	0,833	0,781	0,779	0,798
G5	Mittel Verwittert	1,37E+06	0,494	0,578	0,495	0,522
		1,95E+06	0,675	0,828	0,819	0,774
		2,54E+06	0,805	0,810	0,768	0,794
G6	Mittel Verwittert	1,37E+06	0,459	0,483	0,427	0,455
		1,95E+06	0,676	0,682	0,569	0,626
		2,54E+06	0,836	0,826	0,761	0,793
G7	Stark Verwittert	1,46E+06	0,671	0,683	0,741	0,712
		2,05E+06	0,749	0,792	0,791	0,791
		2,64E+06	0,671	0,663	0,655	0,659
G8	Stark Verwittert	1,46E+06	0,587	0,703	0,660	0,650
		2,05E+06	0,732	0,777	0,755	0,755
		2,64E+06	0,667	0,683	0,669	0,673
G9	Stark Verwittert	1,46E+06	0,603	0,665	0,669	0,645
		2,05E+06	0,778	0,822	0,797	0,799
		2,64E+06	0,644	0,670	0,709	0,674

Tabelle 4: Mittelwerte der Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz und der Raumrichtung.

Wie zu erwarten war, wiesen die Proben aus bruchfrischem Marmor Schallgeschwindigkeiten im Bereich von ca. 5000 m/s auf und die verwitterten Proben Schallgeschwindigkeiten im Bereich von ca. 1600 m/s. Die verwitterte und anschließend mit Acrylharz behandelte Probe 21 wies wieder Schallgeschwindigkeiten von bruchfrischem Marmor auf. Die gemessene Dämpfung kann als eher niedrig bezeichnet werden, auch ca. 10 cm dicke Würfel konnten mit 1,95 MHz durchschallt werden.

AP4: Aufbau von Phased Array Messköpfen

Auf Basis der Ergebnisse des Arbeitspunktes AP 3 wurde beschlossen ein Ultraschall-Array mit folgenden Spezifikationen aufzubauen:

- Frequenz: 1 MHz,
- Anzahl der Elemente 64,
- Gesamtlänge 64 mm,
- Periodizität (engl. Pitch): 1 mm,
- Abstand der Elemente (engl. Gap): 0,1 mm,
- Breite: 10 mm.

Wie oben dargestellt, konnten Probewürfel bis zu 10 cm Kantenlänge von einelementigen Wandlern einer Mittenfrequenz von ca. 2,25 MHz durchschallt werden. Trotzdem mit einer höheren Frequenz immer eine bessere Auflösung erreicht werden kann, wurde das Layout der Laborprototypen der Messköpfe für eine Mittenfrequenz von 1 MHz statt 2,25 MHz berechnet.

Die Dimensionen eines Arrays verhalten sich umgekehrt proportional zu seiner Mittenfrequenz, je höher die Frequenz desto kleiner die Abmessungen. Ein 2,25 MHz Array hätte einen um den Faktor 2,25 geringeren Pitch als ein 1 MHz Array. Weil der Gewinn an räumlicher Auflösung mit einer höheren Dämpfung in Marmor, einer kleineren abstrahlenden Fläche und einer geringeren Fertigungssicherheit erkauft werden musste, wurde bei der Fertigung der ersten Labormuster auf eine Optimierung der räumlichen Auflösung verzichtet.

Die Spezifikationen des Array wurden mit Simulationsrechnungen auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in den Abbildungen 9 bis 16 wiedergegeben. Die Längeneinheiten sind immer Meter. Ein Ultraschall-Array ermöglicht durch zeitlich versetztes An- und Abschalten einzelner Elemente und Variation der Signalstärke der verschiedenen Elemente, ein Schallfeld zu fokussieren und den Fokus in einer Ebene zu bewegen. Abbildung 9 zeigt die Schalldruckverteilung für das oben spezifizierte Array im nicht elektronisch fokussierten Fall, d.h. alle 64 Elemente werden gleichzeitig mit der gleichen Signalstärke angeregt. Unter Berücksichtigung der gemessenen Dämpfungswerte kann theoretisch eine Strecke von 50 cm problemlos durchschallt werden. Unter Zuhilfenahme der Darstellung des Schalldrucks in z-Richtung in Abbildung 10 ist zu erkennen dass in diesem Fall der natürliche Fokusbereich in einem Abstand von ca. 30 cm vor dem Array liegt.

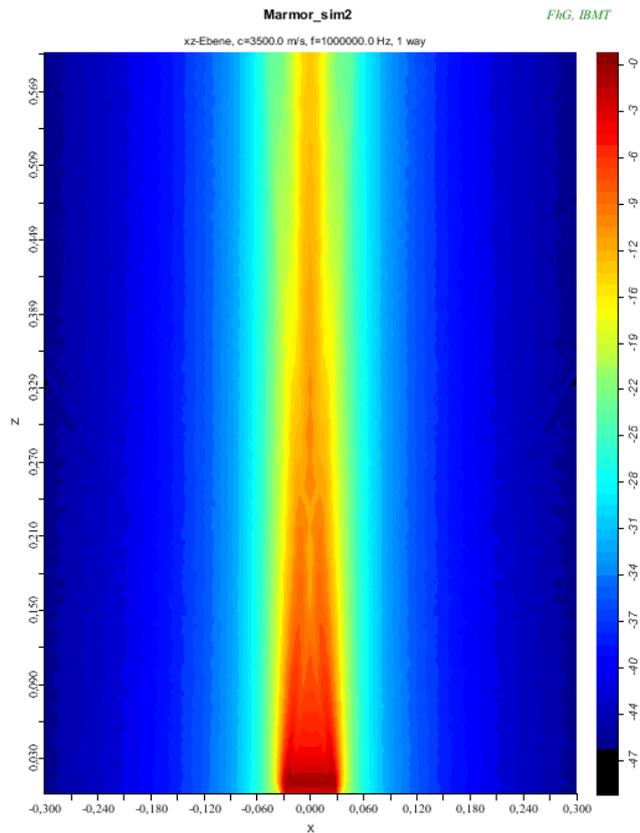


Abbildung 9: Schallfeld eines Array, 1 MHz, 64 Elemente, Pitch 1 mm, Gap 0,1 mm, Breite 10 mm, x- und z-Achse [m].

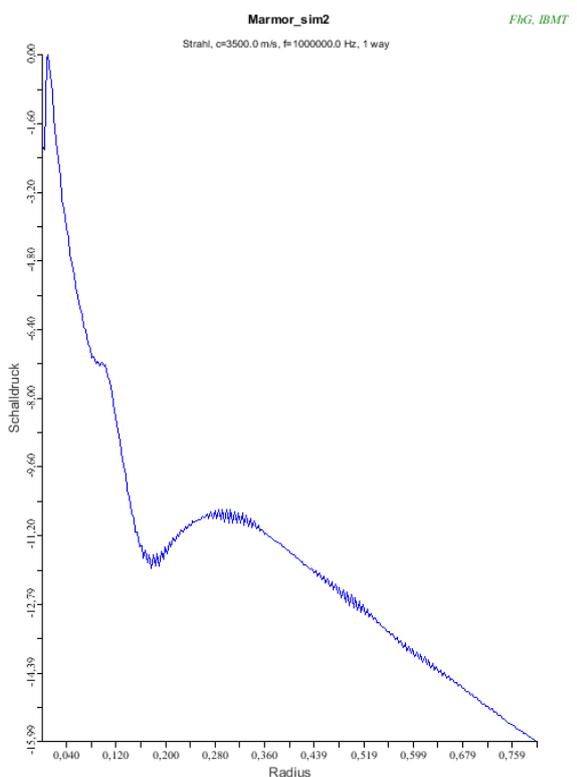


Abbildung 10: Schalldruck entlang der z-Achse eines Array, 1 MHz, 64 Elemente, Pitch 1 mm, Gap 0,1 mm, Breite 10 mm.

Die Schallgeschwindigkeit in Marmor kann zwischen ca. 5500 m/s bei bruchfrischem Marmor und ca. 1400 m/s bei stark verwittertem Marmor schwanken. Für das Design des Array wurde mit einer mittleren Schallgeschwindigkeit von 3500 m/s gerechnet. In den Abbildungen 11, 12 und 13 ist die Simulation der Schallfelder für eine 45° Schwenkung der nicht elektronisch fokussierten Schallkeule bei 5500 m/s, 3500 m/s und 1500 m/s wiedergegeben. In allen Fällen entsteht eine ausgeprägte Schallkeule mit einem natürlichen Fokusbereich. Mit abnehmender Schallgeschwindigkeit im Marmor entfernt sich der Fokus von der Oberfläche des Array und der Fokusbereich wird kleiner. Die Simulationen lassen vermuten, dass selbst bei grenzwertigen Bedingungen für die Schallgeschwindigkeit und die Schwenkung der Schallkeule die Ausbildung eines Fokus und damit eine Bildgebung möglich ist. Eine Bestätigung dieser Ergebnisse lieferten die Simulationen von elektronisch fokussierten Schalldruckverteilungen. Die Abbildungen 14, 15 und 16 zeigen exemplarisch Schallfelder mit 0°, 30° und 45° Schwenkung mit einer Fokussierung in 10 cm Entfernung.

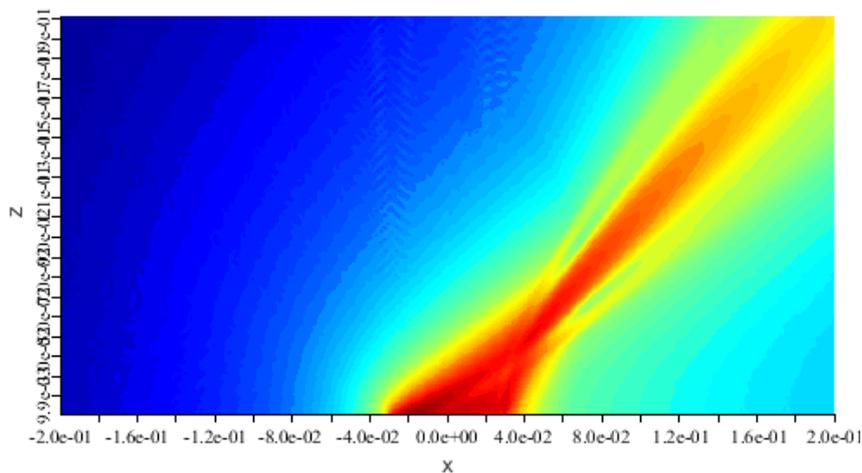


Abbildung 11: Schallfeld eines Array für 5500 m/s und 45° Schwenkung, Spezifikationen des Array wie Abb.9.

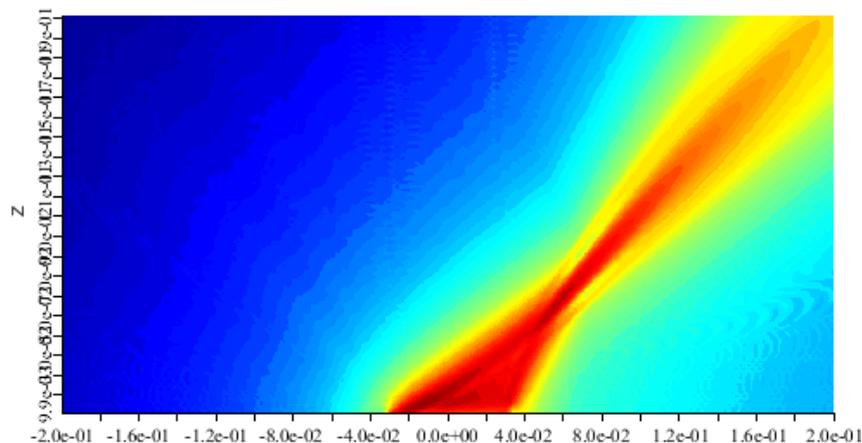


Abbildung 12: Schallfeld eines Array für 3500 m/s und 45° Schwenkung, Spezifikationen des Array wie Abb.9.

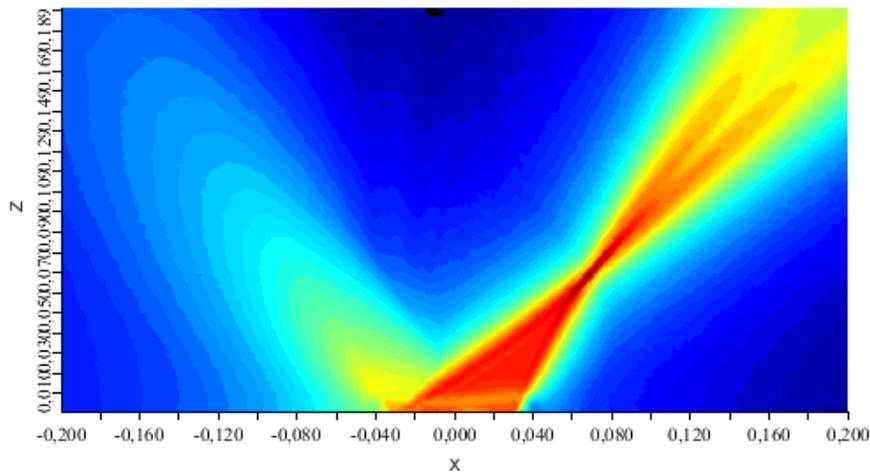


Abbildung 13: Schallfeld eines Array für 1500 m/s und 45° Schwenkung, Spezifikationen des Array wie Abb.9.

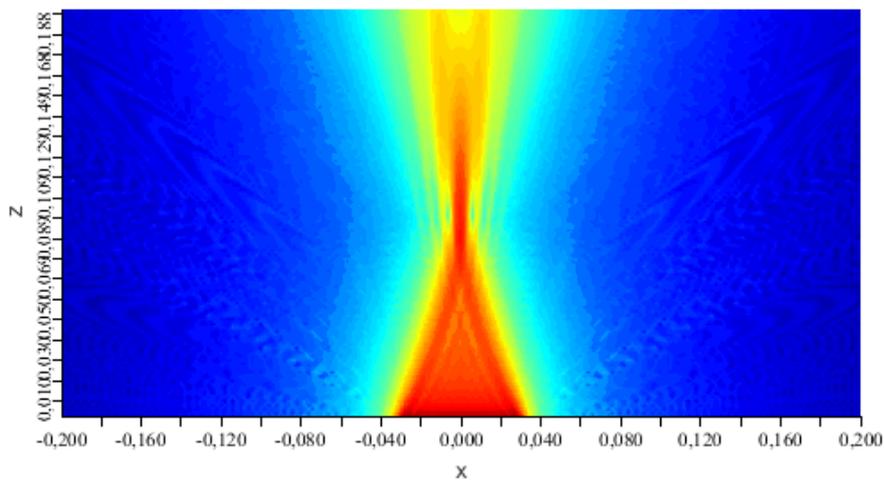


Abbildung 14: Schallfeld eines Array, 3500 m/s, keine Schwenkung, elektr. Fokussierung in 10 cm, Spezifikationen des Array wie Abb.9.

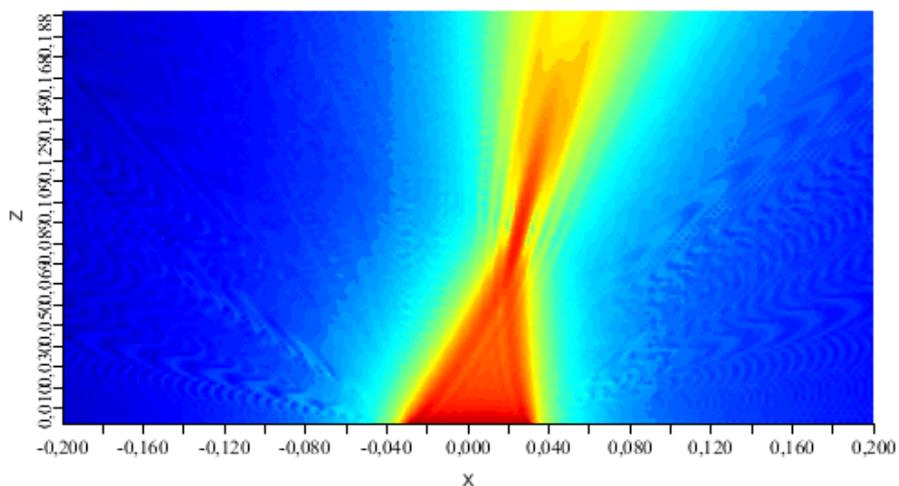


Abbildung 15: Schallfeld eines Array, 3500 m/s, 30° Schwenkung, elektr. Fokussierung in 10 cm, Spezifikationen des Array wie Abb.9.

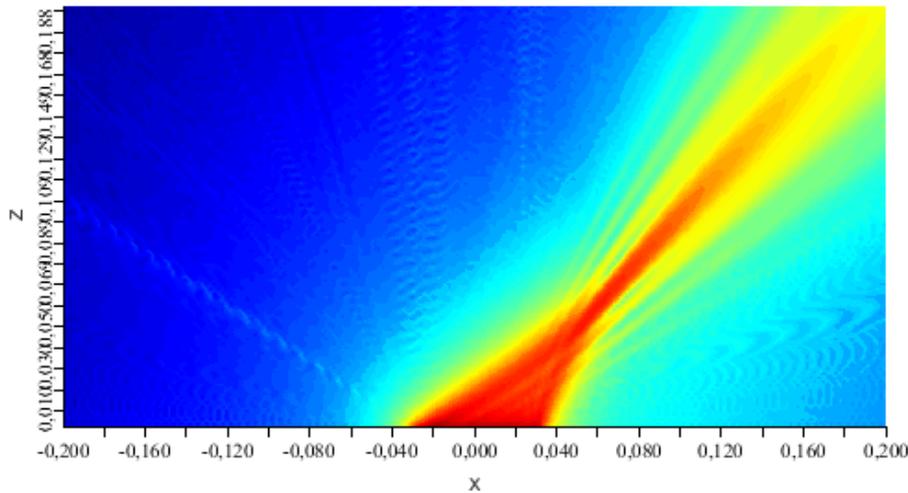


Abbildung 16: Schallfeld eines Array, 3500 m/s, 45° Schwenkung, elektr. Fokussierung in 10 cm, Spezifikationen des Array wie Abb.9.

Mit den rechnerisch überprüften Parametern wurden zwei Laborprototypen der Phased Array Messköpfe aufgebaut. Sie unterscheiden sich lediglich in ihren akustischen Anpassungsschichten. Ein Array wurde mit einer Anpassungsschicht aus PEEK und ein Array wurde mit einer Anpassungsschicht aus Rexolite ausgestattet.

Akustische Anpassungsschichten sind $\lambda/4$ Schichten deren akustische Impedanz dem geometrischen Mittel der akustischen Impedanzen vor und hinter der Anpassungsschicht entspricht. Eine derart ausgelegte Anpassungsschicht ermöglicht eine maximale Transmission der Schallenergie von dem Medium hinter der Anpassungsschicht in das Medium vor derselben. Anpassungsschichten sind von Koppelschichten zu unterscheiden. Während Anpassungsschichten die Transmission durch Anpassung der akustischen Impedanzen optimieren, dienen Koppelschichten dem formschlüssigen blasenfreien Anschluss an das zu untersuchende Objekt. Als Koppelschicht wurde wie bei den einkanaligen Messungen für die ersten Versuche ein mit Karbon gefülltes Silikon verwendet.

Die beiden Messköpfe wurden mit unterschiedlich langen Kabeln versehen. Abbildung 17 zeigt ein 64-elementiges Array mit einer akustischen Anpassungsschicht aus Rexolite und einem 2 m langen Kabel. Abbildung 18 zeigt ein 64-elementiges Array mit einer Anpassungsschicht aus PEEK und einem 5 m langen Kabel. Abbildung 19 zeigt ein Array mit einer nachträglich aufgetragenen Koppelschicht aus karbongefülltem Silikon.



Abbildung 17: 64-elementiges Array mit einer Rexolite Anpassungsschicht.



Abbildung 18: 64-elementiges Array mit einer PEEK Anpassungsschicht.



Abbildung 19: 64-elementiges Array mit einer Koppelschicht aus karbongefülltem Silikon.

Die beiden Ultraschallwandler wurden zunächst an einem Reflektor im Wasser auf ihre Funktionalität getestet. Dabei wurden alle 64 Elemente einzeln angesteuert und die Kabel gegeneinander ausgetauscht. Die Wandler waren funktionstüchtig und die Kabel konnten als gleichwertig eingestuft werden.

Erste Messungen an präparierten und nicht präparierten Marmorblöcken zeigten, dass die in der Elektronik vorgesehene maximale zeitliche Verzögerung (engl. Delay) zwischen der Ansteuerung einzelner Array-Elemente für die Geometrie des entwickelten 1 MHz Array zu gering war.

Wie oben dargestellt, werden bei einem Ultraschall-Array eine elektronische Fokussierung und ein Schwenken der Schallkeule durch getrenntes anregen der einzelnen Elemente und zeitlich versetztes Aussenden von Ultraschallpulsen unterschiedlicher Intensität möglich. Dabei nimmt die Größe des maximal möglichen zeitlichen Delays zwischen den äußeren Elementen eines Array mit der Länge des Array zu.

Der Pitch eines Array ist umgekehrt proportional zu seiner Frequenz, d.h. ein 64-elementiges 5 MHz Array ist kürzer als ein 1 MHz Array gleicher Elementzahl. Das für die Messungen an Marmor bereitgestellte Phased Array Laborsystem ist aus einem System für medizinische Anwendungen entwickelt worden. Diese liegen typischerweise oberhalb 5 MHz. Der maximal mögliche zeitliche Versatz des Laborsystems ließ zwar Frequenzen unterhalb 5 MHz zu, er war jedoch für eine Mittenfrequenz von 1 MHz zu gering. Um den maximal möglichen zeitlichen Versatz zu erhöhen, wurden die Hardware und die Software des Laborsystems überarbeitet.

Nach dieser Überarbeitung waren Elektronik und die 1 MHz Messköpfe gut aufeinander abgestimmt. Mit diesem System wurden erneut Marmorblöcke untersucht. Dabei zeigte sich schnell, dass mit der gewählten Kombination aus akustischer Anpassungs- und Koppelschicht zu wenig Schallenergie in den Marmor übertragen werden konnte. Ultraschallbilder konnten zwar dargestellt werden, auf Grund der geringen Schallenergie war der Kontrast jedoch sehr gering.

Der mit Karbonteilchen gefüllte Silikonverguss zeigte in den Vorversuchen gute Eigenschaften als Koppelmaterial. Diese guten Eigenschaften konnten leider nicht auf das Array übertragen werden. Während bei den Vorversuchen an diskreten Punkten gemessen wurde, wird bei der Messung mit dem Array dieses über die Probe bewegt. Bei dieser Bewegung wurde die Koppelschicht ab geschert.

Nach den ersten Messungen wurde eine Überarbeitung des Array in Bezug auf die akustische Anpassung und die Ankoppeltechnik beschlossen. Die Anpassung sollte weiter verbessert werden, um den Energieübertrag und damit den Kontrast zu erhöhen und die Ankoppeltechnik sollte überarbeitet werden, um ein störungsfreies Arbeiten zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Entwicklung sind unter AP 6 dargestellt.

AP5: Aufbau eines »Phased Array«-Laborsystems

Die Ultraschall-Entwicklungsplattform DiPhAS (kurz für Digital Phased Array System) des Fraunhofer IBMT wurde an das Anforderungsprofil des Projekts angepasst. Die neu aufgebaute Elektronik sollte neben der Möglichkeit die Schallstrahlformung (engl. Beamforming) sendeseitig direkt zu beeinflussen, die Möglichkeit die Lage der gemessenen Ebenen im Raum zu erfassen und eine 3D Darstellung zu berechnen bieten. Für die Untersuchungen an Marmor wurde ein Laborsystem mit folgenden Spezifikationen aufgebaut:

Sendehardware:

- Anzahl Sendekanäle 64,
- max. Ausgabespannung 150 Vpp (50 Ohm),
- max. Ausgangsstrom (Peak-Peak) 0.4 A,
- Sendepulsformen rectangular bipolar Burst1, Burst3 und Burst8,
- Digitalisierungsaufösung 8.3 ns,
- Stufen der Ausgabespannung 5,
- min. Δt zweier Elemente 8.3 ns,
- max Mittenfrequenz 10 MHz,
- Anzahl der Sendefoki 4.

Empfangshardware:

- Anzahl Empfangskanäle 64,
- 6 dB Eingangsbandbreite 10 MHz,
- analoge Verstärkung 42 dB,
- fixe Verstärkung 12 dB,
- dynamischer TGC 30 dB,
- digitale Verstärkung 40 dB,
- A/D Wandlung 12 Bit, 40 MHz pro Kanal,
- max. Aufnahmetiefe 20 cm.

Unterstützung der Ultraschallwandler:

- Typen IBMT Phased und Linear Arrays,
- Anzahl der Stecker 3,
- Anzahl der Kanäle pro Stecker 64,

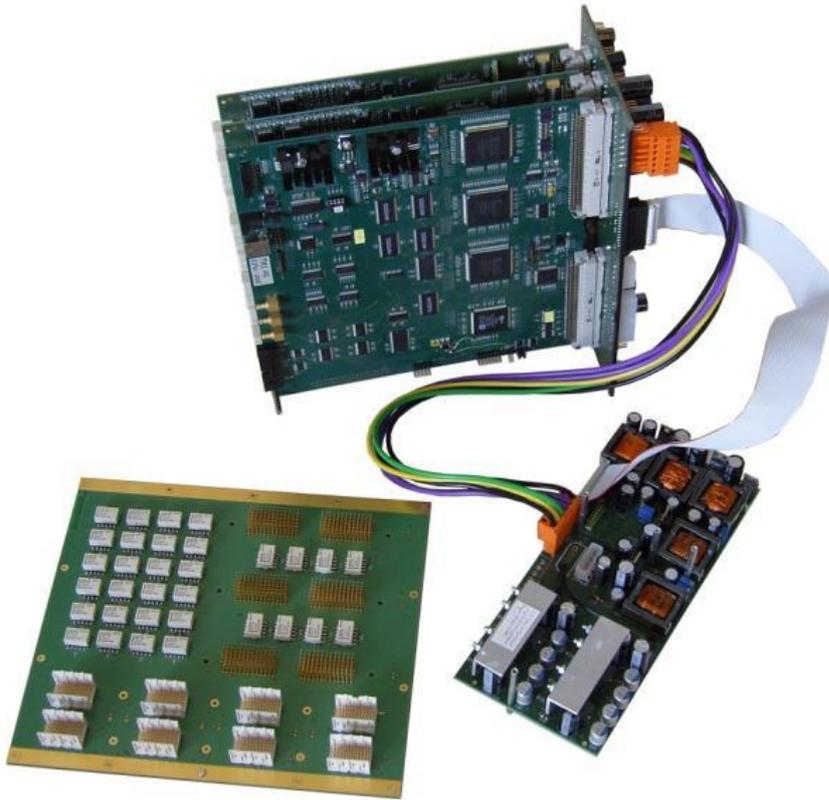


Abbildung 21: Beamformer Boards (oben), Ultraschallnetzteil (unten rechts) und Wandleranschlussplatine (unten links) der Phased Array Elektronik.



Abbildung 22: PC-Komponenten des DiPhAS Systems.

Zur Datenaufnahme in Echtzeit wird der Beamformer von einer Software gesteuert, die auf dem PC des DiPhAS installiert ist. Diese Software erlaubt die Einstellung der allgemeinen Betriebsparameter und die Speicherung von Daten. Für die Datenspeicherung ist ein Datensatzmanagement implementiert, das unterschiedliche Untersuchungsobjekte und mehrere

Studien pro Objekt unterstützt. Ein Screenshot der Nutzeroberfläche der Software zur Datenerfassung wird in Abbildung 23 gezeigt.



Abbildung 23: Screenshot der Nutzeroberfläche der Software zur Datenerfassung mit dem DiPhAS.

Die Messsoftware des Laborsystems verfügt über die folgenden Funktionen:

- automatische Detektion von Ultraschallwandlern am System anhand der XML Definitionsdatei,
- Auswahlmöglichkeit des Anregungssignals (Burst1, Burst3, Burst8 und deren Variation durch Anpassung der einzelnen Spannungen),
- Auswahl der angenommenen Schallgeschwindigkeit je nach Objektmaterial von 1400 bis 5000 Meter / Sekunde,
- Start / Stopp / Pausieren der Messung,
- Cineloop Funktion zur Aufnahme und Abspielen von Videosequenzen,
- Parametrisierung des TGC mittels (8) Slider,
- Nutzung vordefinierter TGC-Einstellungen,
- Änderung der Aufnahmetiefe,
- Änderung der Fokuseinstellungen (Anzahl der Foki: 1,2,4, Tiefe und Abstand zwischen mehreren Fokuspunkten),
- Auswahl der unterschiedlichen Betriebsmodi: Normal Mode, High Speed Mode, Small Mode, High Resolution Modus,

- Darstellung des scankonvertierten 2D Bildes,
- Darstellung des A-Scans (16bit oder 8bit) einer Messlinie (mit Maus auswählbar),
- Auswahl eines Pictogrammes, um die Messregion zu dokumentieren,
- 2B Darstellung des Live Bildes mit einem bereits aufgenommen Bild für Vergleiche,
- Export einzelner Bilder (JPG und HF Einzelframes *.grb) und von Videosequenzen (HF multi frame Daten *.grb) eines Cineloops,
- Druck der aktuellen Darstellung am Standarddrucker des Systems,
- Parallel Visualisierung gefilterter Daten und Live Daten im 2B Betrieb,
- Lokales Messdatenmanagementsystem auf Dateibasis,
 - Auswahl eines Untersuchungsobjektes aus einer Liste,
 - Hinzufügen neuer Objekte,
 - Definieren von Studien,
 - Thumbnail Darstellung gespeicherter Messungen,
 - Direkter Export in Analyseprogramm.

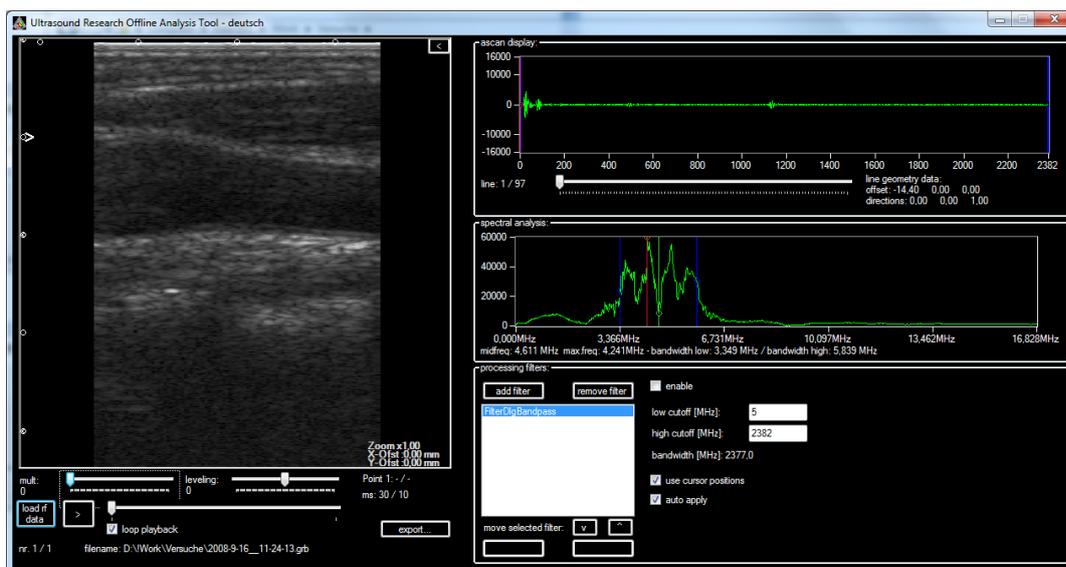


Abbildung 24: Screenshot der Benutzeroberfläche der Auswertesoftware.

Die gemessenen Datensätze haben das grb Dateiformat. Eine ebenfalls auf den PC des DiPhAS installierte Software zur Auswertung wird zur Offlineanalyse der gemessenen Datensätze genutzt. Die Abbildung 24 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche der Software zur Auswertung der Datensätze. Die Software verfügt über die folgenden Funktionen:

- Laden von HF Daten (*.grb) von der Festplatte (HF Einzelbilder und HF Videos),
- Auswahl von einzelnen Schichten innerhalb eines HF Videos,
- Abspielen eines HF Datenvideos,

- Darstellung der Geräteparameter der Messung (Wandlergeometrie, Beamforming Parameter, 3D Tracking Position) in Textform,
- Darstellung des scankonvertierten Bildes,
- Messung von Abständen im scankonvertierten Bild,
- Darstellung einzelner A-Scans (16 bit HF, 15 bit Envelope Daten oder 8 bit Amplitudendaten auswählbar),
- Zoom und Verschiebung der B-Bilddarstellung,
- Auswahl einer „Region of Interest“ in der A-Scan Darstellung mittels 4 Cursor,
- Benutzerdefinierte Filterung (DLL Import) der Messdaten anhand der ROI,
- Darstellung gefilterter A-Scans (16bit oder 8bit) der ausgewählten Linie,
- Zoomfunktion in der A-Scan Darstellung,
- Darstellung des Signalspektrums der ausgewählten Linie und Anzeige der Mittenfrequenz und Bandbreite,
- Darstellung der gewählten A-Scan Linie im scankonvertierten B-Bild,
- Export der Liniendaten als Textdaten zur Weiterverarbeitung in anderen Programmen,
- Export der Bildsequenzen als Videodatei.

Wie oben erwähnt, sollte der Einsatz eines 3D Positionserfassungssystems erlauben die Daten einer gemessenen Ebene mit der Position der Ebene zu verknüpfen. Mit Hilfe der Auswertesoftware sollten die Messdaten der Ebenen anhand ihrer Positionen in ein Volumengitter eingefügt und so ein Volumendatensatz generiert werden. Fehlstellen im Volumendatensatz können aus vorhandenen, benachbarten Daten durch Interpolation berechnet werden.

Diese Art der Bildgebung ist nicht echtzeitfähig, da zuerst die Einzelschichten erfasst werden, die dann erst zu einem Volumen rekonstruiert werden können. Die Aufnahme der Schichten erfolgt in der Regel durch die Bewegung des Phased Array Messkopfes über der Zielregion, wobei typischerweise zwischen 30 und 250 Schichten je nach aktueller Bildgebungseinstellung mit ihren Positionen in ca. 5 Sekunden erfasst werden. Eine einfache Volumenrekonstruktion kann nach der Aufnahme innerhalb von wenigen Sekunden errechnet werden.

Um in einem Volumen eine ausreichende Dichte von Daten zu erreichen, muss bei Phased Array Systemen eine Interpolation der gemessenen Volumendaten vorgenommen werden. Unregelmäßige Dichteverteilungen der Messdaten entstehen wegen der nicht statischen Scankonvertierung, der Geometrie der gescannten Fläche und mehrfach vermessener Bereiche. Diese entstehen durch un stetig dynamische und vorher unbekannte Bewegung des Ultraschallwandlers über der Zielregion. Im Gegensatz zu mechanisch geschwenkten Linearwandlern oder Matrix-Ultraschallwandlern mit ihrer bekannten Geometrie und

Scangeometrie und somit bekannten Dichteverteilungen, die in der Software durch eine Interpolation mit Daten aus deren Nachbarschaft ausgeglichen werden können, sind diese Fehlstellen bei frei Hand geführten Systemen nicht vorherzusehen, und eine Interpolation muss dynamisch für jedes neue Volumen individuell berechnet werden.

Die Rekonstruktionsgeschwindigkeit ist essentiell für die Nutzbarkeit der 3D Bildgebung. Aus diesem Grund ist eine optimierte und parallelisierte Verarbeitung der Messdaten erstrebenswert. Für eine solche massive Parallelisierung der Algorithmen werden Grafikkarten als parallele Rechenwerke genutzt.

Die Parallelisierung der Algorithmen auf den einzelnen Hauptprozessoren des Computers zeigt einen Geschwindigkeitsgewinn von annähernd der Kernzahl. Die theoretische Rechenleistung des hier genutzten schnellsten Prozessors Core2Quad Q9000 ist durch seine 4 Fließkommaoperationen pro Zyklus und Prozessorkern definiert, so dass man eine theoretische maximale Rechenleistung von 32 GFLOPS erhält. Betrachtet man jedoch eine massive Parallelisierung durch Nutzung der Grafikkartenhardware, so verspricht dies einen enormen Geschwindigkeitsgewinn, da die nominelle Fließkommarechenleistung durch den Hersteller mit mehreren Hundert GFLOPS angegeben wird, was hier eine direkte Beschleunigung um ein Vielfaches impliziert. Hierbei kann die hohe Parallelisierung durch die ca. 200 Streaming Prozessoren von der schnellen Anbindung an den internen Speicher profitieren. Durch die hohe Zahl an Speicherzugriffen erzielt man gegenüber einem aktuellen Vielkernprozessor der Firma Intel eine 100-fach höhere Rekonstruktionsgeschwindigkeit.

Die elektromagnetischen Trackingsysteme, die zur 3D Datenerfassung genutzt werden sollten, nutzen einen stationären, aber portablen Feldgenerator und Magnetfeldsensoren in kleiner Bauweise an den Werkzeugen, deren Position bestimmt werden soll, und erreicht bei sechs Freiheitsgraden eine typische Genauigkeit von $0; 5 \text{ mm } 3 \text{ RMS}$ mit 200 Hz Wiederholrate.

Ältere magnetische Systeme (z. B. "Flock of Birds") waren fehleranfällig bei Nutzung in der Nähe von Metallen, jedoch nutzen neuere Systeme (z. B. "trakSTAR") gepulste Gleichstromfelder statt kontinuierlicher Wechselstromfelder, um Induktionseffekte durch Metallgegenstände zu vermeiden.

Es war vorgesehen den Positionssensor des Positionserfassungssystems in oder an den Griff des Ultraschallwandlers zu montieren. Dabei ist es technisch nicht möglich, dass der Ursprung und die Orientierung des Koordinatensystems des Sensors mit denjenigen des Ultraschallwandlers, bzw. des mit ihm erzeugten Bildes, genau übereinstimmen. Da diese Abweichung zu Fehlern in der 3D Darstellung führt, muss sie durch eine Kalibrierung korrigiert werden. Dazu werden die Positionen von Markern im Ultraschallbild mit ihren tatsächlichen Positionen verglichen. Dadurch wird die Berechnung einer homogenen 4×4 Transformationsmatrix ermöglicht, die ein

Koordinatensystem auf das andere abbildet und somit den Positionsfehler korrigiert. Da für die Berechnung dieser Korrekturmatrix viele Eingangsbilder notwendig sind, ist eine automatische Detektion der Marker wünschenswert und wird algorithmisch umgesetzt. Die homogene Korrekturmatrix kann daraufhin durch Minimierung eines Fehlermaßes über alle gemessenen Ebenen hinweg abgeschätzt werden.

Die Korrekturmatrix muss für jede Kombination von Ultraschallwandler und Positionssensor einmalig bestimmt werden, da jede Sensor-Ultraschallwandler Kombination als unterschiedlich angenommen werden muss.

Nach der Bestimmung der Korrekturmatrix ist die globale Position jedes Messpunktes bei gegebener Systemkonfiguration bekannt und kann mit den Messdaten gespeichert und für die 3D Positionierung und Rekonstruktion genutzt werden.

Diese Arbeiten für eine 3D Datenerfassung und Visualisierung wurden im Rahmen dieses Projektes vollständig realisiert.

Allerdings musste für die Nutzung der Ultraschall-Forschungsplattform an Marmor oder vergleichbaren Materialien die Gerätesteuerung sowie die Verarbeitung der Messdaten an die sehr geringen Arbeitsfrequenzen unterhalb des bisher üblichen medizinischen Ultraschalls (1 MHz) und die sehr hohen Schallgeschwindigkeiten (5000 m/s), die weit oberhalb der Schallgeschwindigkeit von Gewebe und Wasser (1500 m/s) liegen, angepasst werden. Die für das Beamforming notwendigen Zeitverzögerungen (Delays) der einzelnen Kanäle überschritten, auf Grund dieser extremen Randbedingungen die bisher angenommenen maximalen Zeitverzögerungswerte. Es mussten grundlegende Änderungen in der hardwarenahen Software zur Gerätesteuerung vorgenommen werden.

Diese Änderungen für das angepasste Beamforming wurden in zwei unterschiedlichen Softwareebenen integriert. Die erste Softwareebene bietet einen sehr tiefen, manuellen Eingriff in die Ansteuerung der Hardware (low level). Dies erfolgt über eine Textkonsole und rudimentäre Ausgabe von Messdaten als Bild und ist nicht für Endanwender des Systems gedacht.

Die zweite Softwareebene bietet neben der Gerätesteuerung zusätzlich die Anbindung zahlreicher Zusatzkomponenten und integriert eine endanwendertaugliche Oberfläche mit einer Datenbank für die erfassten Messdaten und die 3D Erweiterung des Gesamtsystems zu einem volumenverarbeitenden Gerät, wie oben beschrieben. Hierfür wird bis auf einen gemeinsamen Hardwaretreiber eine sehr unterschiedliche Softwarearchitektur genutzt, die die zahlreichen Erweiterungen erst erlaubt.

Die Anpassungen an die im Rahmen dieses Projektes ermittelten marmorspezifischen Parameter erfolgten zunächst in der ersten hardwarenahen Ebene. Nach erfolgreicher Entwicklung kam es jedoch zu Problemen in der Überführung dieser Adaptionen in die endnutzertaugliche Software.

Trotz Nutzung der gleichen Bibliothek zur Ansteuerung der Ultraschallelektronik, konnte die Hardware nicht in einen Messzustand versetzt werden, der die Marmormessungen unter Nutzung der zweiten anwendungsnahen Ebene korrekt ermöglichte. Im Ergebnis bedeutete dies, dass die Signalamplituden in der Endanwendersoftware weit unter den Amplituden des Labortests lagen und somit keine sinnvollen Messungen mit dieser Software ermöglicht werden konnten. Zudem bedeutete dies auch, dass die Einbindung der 3D Positionserfassung und damit einer 3D Datenerfassung von Messobjekten nicht möglich war. Die Messdatenerfassung hierfür ist nur in der zweiten Softwareebene realisierbar. Der Unterschied der Ansteuerungen liegt nach derzeitiger intensiver Analyse, an den Hardwarelimits der eingesetzten Beamformer-Technologie und dem Kommunikationsinterface zwischen den beiden Softwareebenen, sowie an den extremen Randbedingungen für diesen Anwendungsbereich (sehr niedrige Arbeitsfrequenz [1 MHz] und in der sehr hohen Schallgeschwindigkeit der Untersuchungsobjekte [5000 m/s]).

Das Problem konnte trotz intensiver Analyse bis heute nicht gelöst werden. Es wäre eine in diesem Projekt nicht geplante größere Revision des Ultraschall-Beamformers notwendig. In einer weiteren neuen Ausbaustufe des Ultraschallsystems können diese Limitationen von Beginn an berücksichtigt werden und ermöglichen dann auch eine Erfassung von 3D Ultraschalldaten in derartigen Messobjekten.

Da grundsätzlich aber mit dem Ultraschallsystem Messungen möglich waren, erfolgte die Auslieferung des Messsystems mit einer überarbeiteten Version der Hardwareentwicklungs- und Charakterisierungs-Software. Durch Erweiterungen wurde diese anwenderfreundlicher gestaltet und ließ die Speicherung von einzelnen Messungen durch die Endnutzer zu. Die Nutzung des Trackingsystems zur dreidimensionalen Aufnahme war in dieser Software jedoch nicht möglich.

AP6 Optimierung des Phased Array Laborsystems

Wie im Kapitel AP 4 beschrieben, zeigten Messungen an Marmorproben mit den ersten Laborprototypen Ergebnisse, die bezüglich der akustischen Anpassung und der Einkoppeltechnik verbessert werden sollten. Die Phased Array Messköpfe der oben genannten Messungen hatten eine Mittenfrequenz vom 1 MHz und die Schallsignale wurden mittels Anpassungsschichten aus den Polymeren Rexolite und PEEK über eine Koppelschicht aus karbongefüllten Silikon übertragen.

Um das mit der Materialauswahl für die Kombination Anpassungs- und Koppelschicht verbundene Verbesserungspotential auszuloten wurden weitere Simulationen durchgeführt und eine Reihe von einelementigen Ultraschallwandlern aufgebaut. Einelementige Ultraschallwandler unterscheiden sich gegenüber Ultraschall-Arrays nur in der Anzahl der Elemente, weshalb von den Messungen mit einelementigen Wandlern auf die Leistungsfähigkeit von Arrays gleicher Materialkombination geschlossen werden kann. Da einelementige Wandler wesentlich schneller und kostengünstiger als Arrays aufgebaut werden können, wurden für die Versuchsreihe einelementige Wandler bevorzugt.

Anpassungsschichten werden in der Ultraschalltechnik verwendet, um die durch unterschiedliche akustische Impedanzen der beteiligten Materialien bedingten Reflexionsverluste zu minimieren und so eine optimale Transmission von Schallenergie in das zu untersuchende Objekt zu gewährleisten. Die akustische Impedanz eines Materials entspricht dem Produkt aus seiner Dichte und der Schallgeschwindigkeit in dem Material bei einer bestimmten Frequenz und Temperatur.

$$Z = \rho * v \quad (1)$$

mit Z [MRayl], ρ [g/cm³] und v [m/s].

Sei Z_1 die akustische Impedanz eines Ultraschallschwingers und Z_2 diejenige des zu untersuchenden Objektes, dann beträgt der Reflexionskoeffizient ρ an der Grenzfläche zwischen Schwinger und Objekt:

$$\rho = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2)$$

Wie aus der Literatur bekannt und durch eigene Messungen belegt, kann die longitudinale Schallgeschwindigkeit in Marmor in Abhängigkeit vom Verwitterungszustand zwischen ca. 1400 m/s und 5000 m/s variieren, wobei die Dichte ca. 2,7 g/cm³ beträgt. Daraus folgen mit Gleichung (1) akustische Impedanzen zwischen 4 MRayl und 14 MRayl.

Zur Erzeugung des Ultraschalls werden meist piezoelektrische Keramiken oder Composites, bestehend aus piezoelektrischer Keramik und Polymer, eingesetzt. Die akustischen Impedanzen der piezoelektrischen Keramiken liegen typischerweise bei 30 MRayl und Composites haben dem Mischungsverhältnis Keramik zu Polymer entsprechend akustische Impedanzen zwischen 10 MRayl und 15 MRayl. Für die Reflexion von Schallwellen an der Grenzfläche zwischen Piezokeramik und Marmor folgen mit Gleichung (2) je nach Verwitterungszustand Reflexionsfaktoren bis 0,58. Je nach Verwitterungszustand können also ca. 60 % der Schallenergie an der Grenzfläche reflektiert werden. Um diesen Effekt zu minimieren wurde nach einer geeigneten Kombination bestehend aus einem piezoelektrischen Schwinger und einer akustischen Anpassungsschicht gesucht.

Zur maximalen Transmission von Schallenergie muss die Impedanz Z_A der Anpassungsschicht gleich dem geometrischen Mittel der Impedanzen Z_1 und Z_2 vor und hinter der Anpassungsschicht sein und ihre Dicke $\lambda/4$ betragen.

$$Z_A = \sqrt{Z_1 * Z_2} \quad (3)$$

Weil die akustische Impedanz vom Marmor stark vom Verwitterungszustand abhängt und deshalb nicht konstant ist und zwischen ca. 4 MRayl und 14 MRayl schwankt, kann die Berechnung der akustischen Impedanz Z_A einer Anpassungsschicht immer nur ein Kompromiss sein. Sei die Impedanz des Schallgebers Z_1 gleich 30 MRayl und diejenige des Marmors Z_2 gleich 14 MRayl, so folgt für Z_A ein Wert von 20,50 MRayl und für Z_2 gleich 4 MRayl folgt für Z_A ein Wert von 11 MRayl.

Für ein piezoelektrisches Composite mit einer akustischen Impedanz von ca. 12 MRayl folgen für die Impedanzen der Anpassungsschicht Z_A Werte zwischen 13 MRayl und 7 MRayl.

Da die akustische Impedanz der Anpassungsschicht immer nur einen Wert haben kann, mussten für die geplanten Simulationen und Reihenuntersuchungen Materialien ausgewählt werden, deren Impedanz sich zwischen den oben berechneten Eckwerten befindet und geprüft werden in wie weit sie gute Ergebnisse für die verschiedenen Verwitterungszustände des Marmors liefern. Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen wurden folgende Materialien zur Generierung des Ultraschalls und für Anpassungsschichten ausgewählt:

- piezoelektrische Keramik PCM55 31,8 MRayl,
- piezoelektrische Keramik PCM51, 31,4 MRayl,
- poröse piezoelektrische Keramik PZ 37, 14,5 MRayl,
- piezoelektrisches Composite, 11,8 MRayl,

• Rexolite,	2,43 MRayl,
• Peek,	3,42 MRayl,
• Harz 1 ungefüllt,	3 MRayl,
• Harz 2 gefüllt,	6,6 MRayl,
• Harz 3 gefüllt,	9,5 MRayl,
• Macor,	14 MRayl,
• Magnesium,	10 MRayl,
• Polymer,	3 MRayl,
• Polymer gefüllt,	6,3 MRayl,
• PZ37 unpolarisiert	18 MRayl.

Mit den oben genannten Materialien wurden die zu erwartende Signalstärke und Bandbreite für verschiedene Kombinationen in Abhängigkeit von der akustischen Impedanz des Marmors mit der Software PiezoCad nach dem KLM Modell berechnet. In den Abbildungen 25 und 26 sind die Ergebnisse dieser Simulationen wiedergegeben.

In Abbildung 25 ist deutlich zu erkennen, dass Kombinationen mit der Piezokeramik PCM 55 allen Kombinationen mit anderen piezoelektrischen Materialien überlegen sind. Abbildung 26 zeigt, dass dieses Verhältnis bezüglich der Bandbreiten umgekehrt ist. Die für die Kombinationen mit PCM 55 Keramiken berechneten Bandbreiten von ca. 80 % sind jedoch für die geplanten Anwendungen noch akzeptabel.

Simulation Aufbauvarianten ohne Koppelkissen, Sensitivität

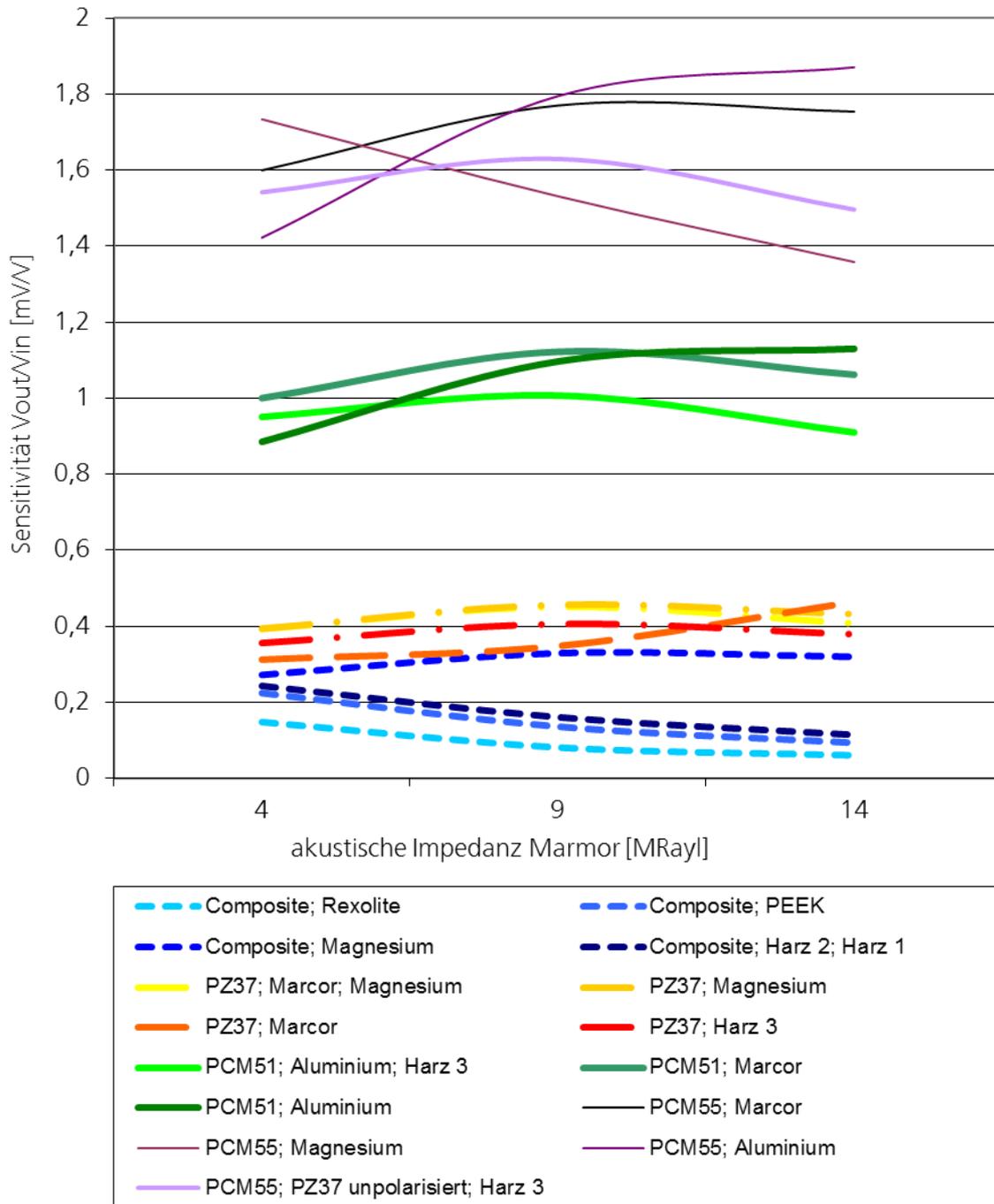


Abbildung 25: Simulationsergebnisse der Sensitivität verschiedener Kombinationen von piezoelektrischen Keramiken mit Anpassungsschichten.

Simulation Aufbauvarianten ohne Koppelkissen, Bandbreiten

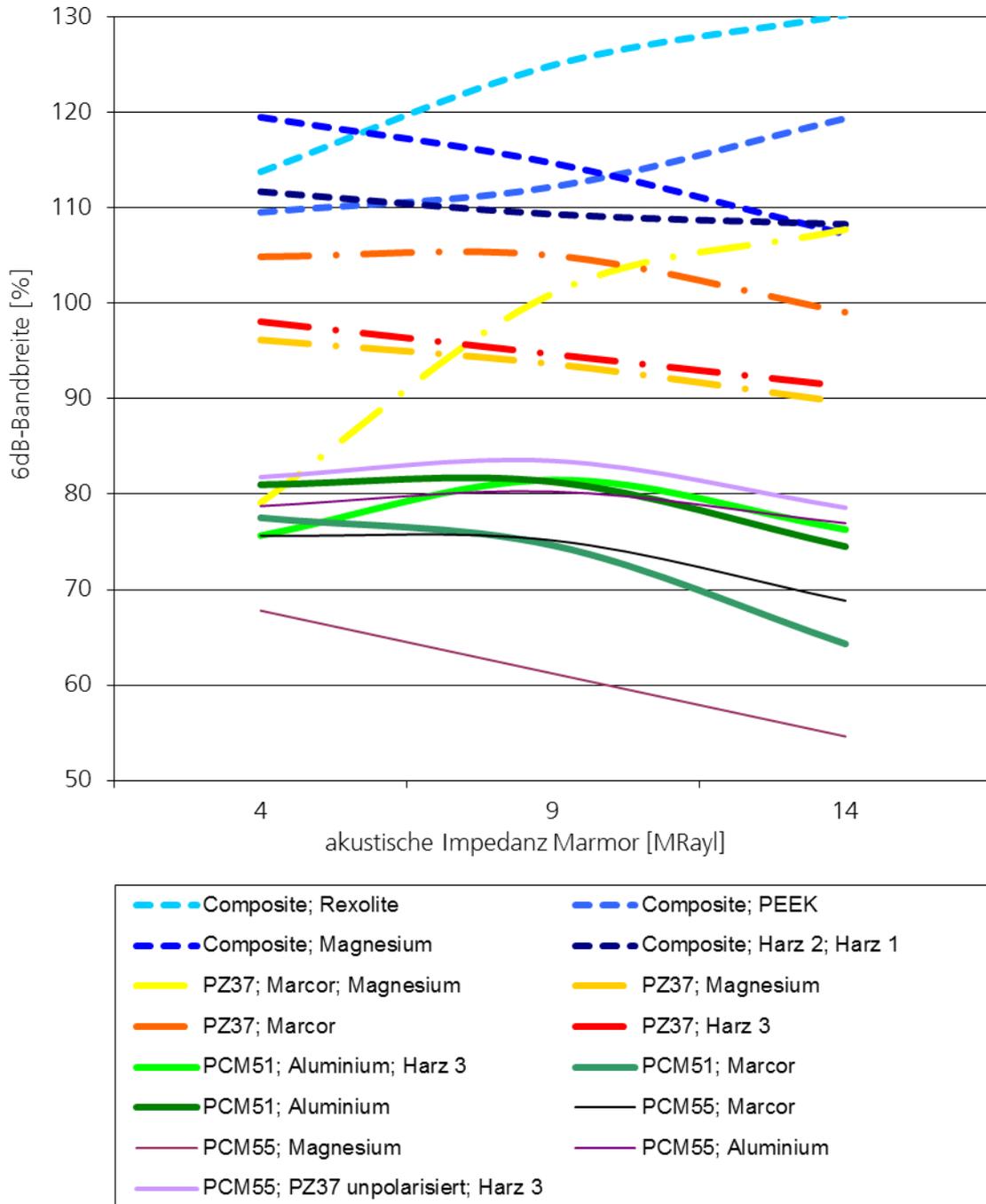


Abbildung 26: Simulationsergebnisse der 6 dB Bandbreite verschiedener Kombinationen von piezoelektrischen Keramiken mit Anpassungsschichten.

Die Abbildungen 27 und 28 zeigen die Simulationsergebnisse für einen Ultraschallwandler, der aus der piezoelektrischen Keramik PCM 55 mit einer Anpassungsschicht aus Macor und einem Koppelkissen aus mit Karbonteilchen gefüllten Silikonverguss besteht.

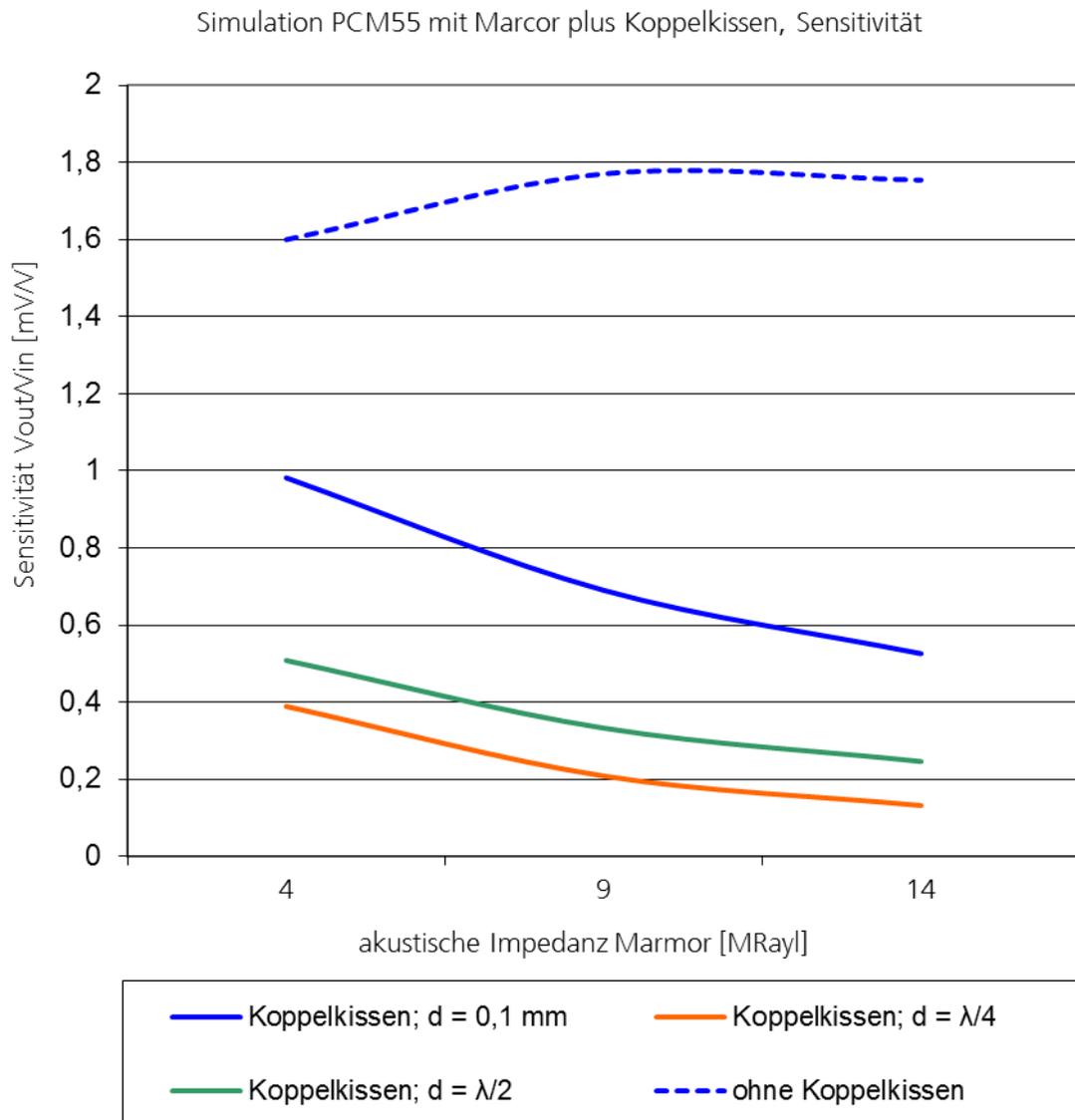


Abbildung 27: Simulationsergebnisse der Sensitivität für einen Ultraschallwandler mit der Piezokeramik PCM 55 mit einer Anpassungsschicht aus Marcor und Koppelkissen verschiedener Dicke aus mit Karbonteilchen gefülltem Silikonverguss.

Die Simulationsergebnisse bestätigen die intuitive Annahme, dass durch die Anwesenheit einer Koppelschicht ein Teil der Schallenergie absorbiert und die Sensitivität des Ultraschallwandlers verringert wird. Dabei nimmt die Absorption mit der Dicke der Anpassungsschicht zu, durch die Verwendung von $\lambda/4$ oder $\lambda/2$ Schichten ist keine Verstärkung auf Grund von Interferenzen möglich. Die später verwendete Anpassungsschicht sollte also so dünn wie möglich sein. Der berechnete Einfluß einer Koppelschicht auf die Bandbreite ist nur gering.

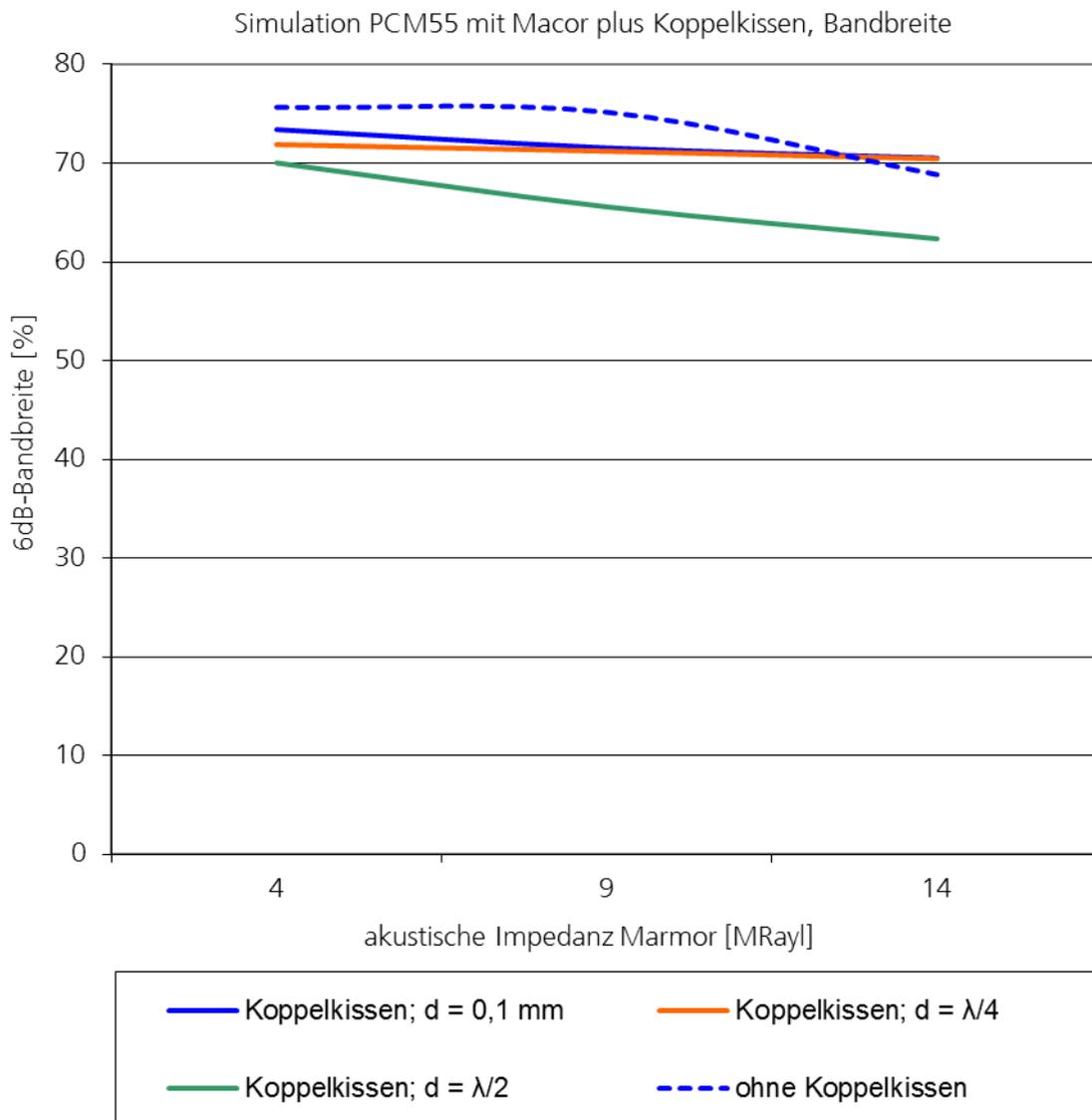


Abbildung 28: Simulationsergebnisse der 6 dB Bandbreite für einen Ultraschallwandlern mit der Piezokeramik PCM55 mit einer Anpassungsschicht aus Macor und Koppelkissen verschiedener Dicke aus karbongefülltem Silikonverguss.

Nach der theoretischen Untersuchung der möglichen Materialkombinationen wurde das frequenzabhängige Absorptionsverhalten des Marmors untersucht, um für den geplanten Aufbau von Versuchswandlern solche Frequenzen ausschließen zu können, die auf Grund hoher Materialdämpfung in Marmor nicht geeignet sind. Für diese Messungen wurden vier kommerziell erhältliche Ultraschallwandler aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung benutzt. Die Wandler sendeten Ultraschallsignale bei 500 kHz, 1 MHz, 2,25 MHz und 5 MHz aus. Die Messungen wurden an einem Marmorwürfel aus nicht verwittertem Marmor mit 10 cm Kantenlänge, Marmorwürfel 11, durchgeführt. Die Messungen wurden im Puls/Echo Betrieb durchgeführt, d.h. das Signal wird an einer Seite des Würfels eingekoppelt, an der

gegenüberliegenden Fläche reflektiert und dann wieder vom gleichen Wandler empfangen. Von dem gesendeten und dem empfangenen Ultraschallsignal wird das Frequenzspektrum mit einer Fourieranalyse berechnet. In Abbildung 29 werden die gemessenen Mittenfrequenzen der reflektierten Signale in Abhängigkeit von den Mittenfrequenzen der gesendeten Signale wiedergegeben.

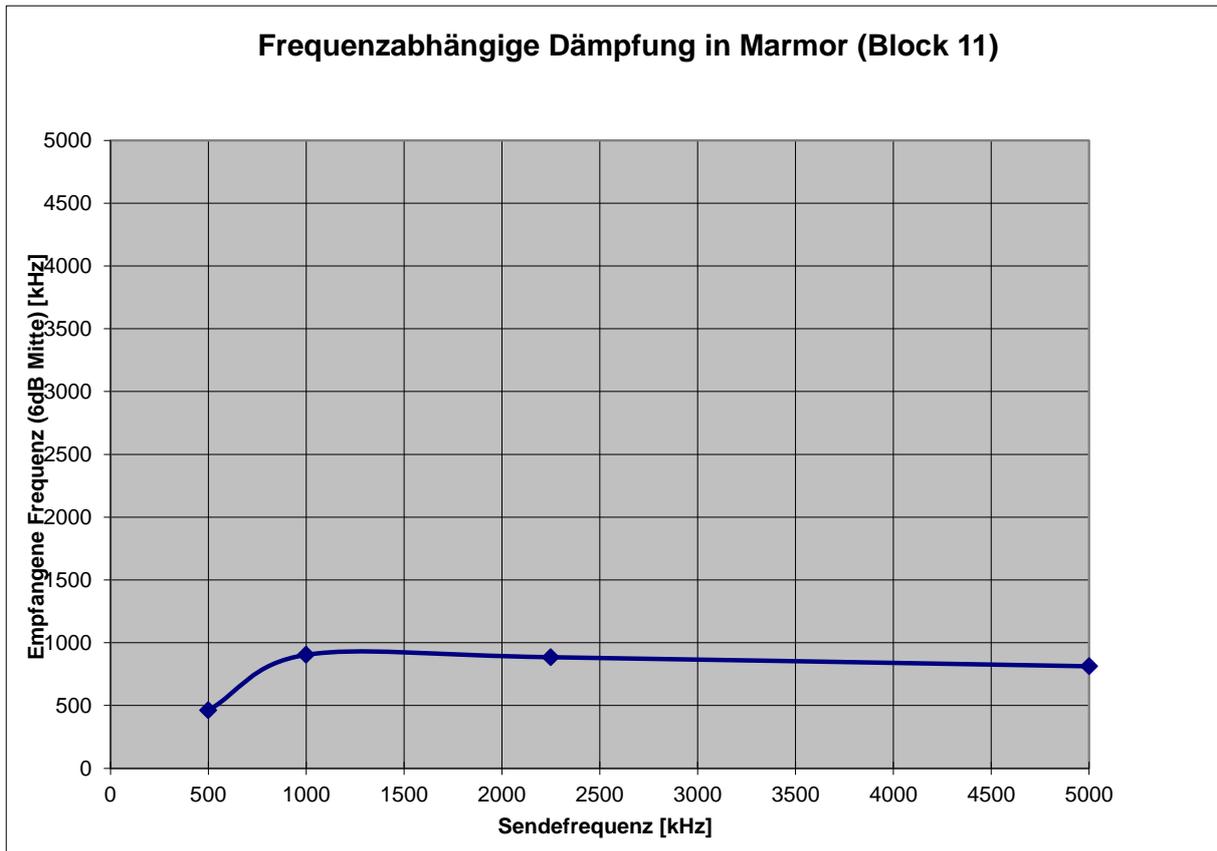


Abbildung 29: Frequenzabhängige Dämpfung an Marmorwürfel 11, Empfangsfrequenz als Funktion der Sendefrequenz.

Oberhalb 1 MHz hat die Kurve einen fast konstanten Verlauf, mit andern Worten, egal welche Frequenz das gesendete Signal hat, es wird immer nur ca. 1 MHz empfangen. Der Marmor wirkt wie ein Frequenzfilter und es ist sinnlos mit Frequenzen oberhalb 1 MHz messen zu wollen, weil immer nur Signale von 1 MHz empfangen werden können. Mit diesem Ergebnis wurde für die Testwandler nur die Mittenfrequenz von 1 MHz ausgewählt. Dieses Ergebnis bedeutet auch, dass eine Verbesserung der räumlichen Auflösung über eine Erhöhung der Frequenz nicht möglich ist.

Im Folgenden wurden Testwandler mit folgender Geometrie aufgebaut:

- piezoelektrische Keramik PCM 55, $\varnothing = 12,7 \text{ mm}$,
- piezoelektrische Keramik PCM 51, $\varnothing = 10,0 \text{ mm}$,
- poröse piezoelektrische Keramik PZ 37, $\varnothing = 12,7 \text{ mm}$,
- piezoelektrisches Composite, $\varnothing = 12,0 \text{ mm}$.

Abbildung 30 zeigt die einelementigen Testwandler. Die Anpassungsschichten sind weiß zu erkennen und die rückwärtige Dämpfung ist grau. Piezokeramik oder Composite befinden sich zwischen Dämpfung und Anpassungsschicht. Der Aufbau der Testwandler bezüglich der akustischen Anpassung ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

Die Sensitivität und Bandbreite der Testwandler wurde am Marmorwürfel 11 im Puls/Echo Betrieb mit einem Panametrics Pulser/Receiver, Model 5800, gemessen. Dabei wurde die Pulsenergie auf 100 μJ und das Gain auf 20 dB eingestellt. Die Ankopplung erfolgte mit einem kommerziellen Ultraschall-Koppelgel. Tabelle 5 gibt die Ergebnisse der Messungen wieder.

Wandleraufbau	Sensitivität [mV]	Bandbreite -6dB [%]
PCM55, 1 MHz, Macor	4047,70	48,62
PCM51, 1 MHz, Macor	23,64	29,87
PCM51, 1 MHz, Aluminium	66,30	66,78
PCM51, 1 MHz, Aluminium, Macor	113,35	54,68
PZ37, 1 MHz, Macor	83,86	62,69
Composite, 1 MHz, Macor	21,48	74,25
Composite, 1 MHz, Peek	44,72	62,72
Composite, 1 MHz, Rexolite	36,14	22,51
Composite, 1 MHz, Wolfram 770 nm in Polymer, Polymer	738,19	38,50

Tabelle 5: Messergebnisse der Testwandler, Marmorwürfel Nr.11, Puls/Echo, Pulsenergie 100 μJ , Gain 20 dB.

Die Ergebnisse der Tabelle 5 bestätigten die Berechnungen der Simulation. Der Wandler mit der Keramik PCM 55 und einer Anpassungsschicht aus Macor zeigte die besten Ergebnisse.

Bei der späteren Anwendung ist die Verwendung von Koppelgel nicht möglich, weil Spuren des Gels auf der Oberfläche des Marmors zurückbleiben. Um den Marmor zu schützen wurde eine Adhäsionsfolie auf eine Fläche des Würfels aufgebracht. Die Resultate der Messung durch eine Adhäsionsfolie sind in Tabelle 6 angegeben.

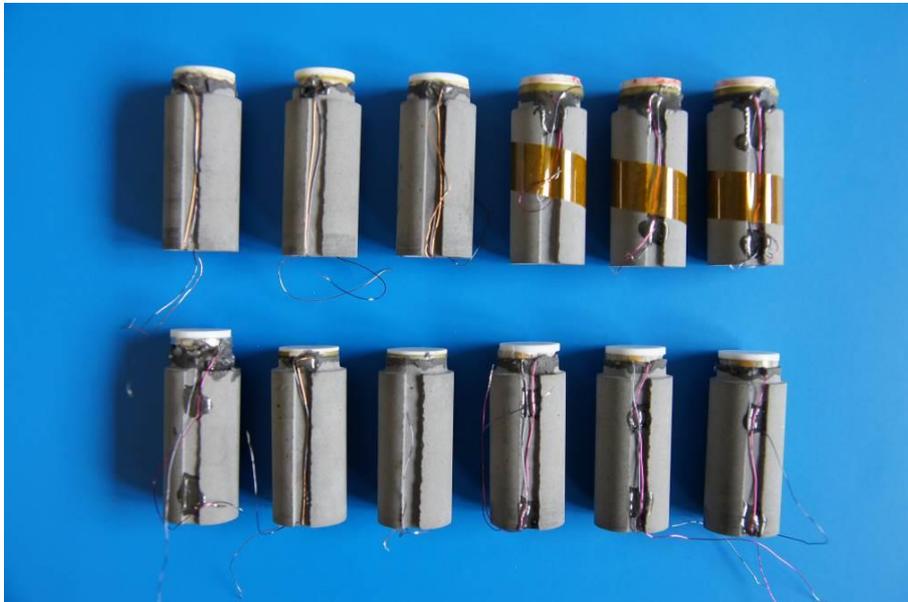


Abbildung 30: einelementige Testwandler.

Wanderaufbau	Sensitivität [mV]	Bandbreite -6dB [%]
PCM55, 1 MHz, Macor	2640,00	56,50
PCM51, 1 MHz, Macor	6,12	14,91
PCM51, 1 MHz, Aluminium	19,41	28,81
PCM51, 1 MHz, Aluminium, Macor	28,98	18,67
PZ37, 1 MHz, Macor	21,44	85,37
Composite, 1 MHz, Macor	3,48	9,16
Composite, 1 MHz, Peek	33,00	49,28
Composite, 1 MHz, Rexolite	22,60	47,53
Composite, 1 MHz, Polymer Wolfram, Polymer	717,60	61,40

Tabelle 6: Messergebnisse der Testwandler, Marmorwürfel 11, Adhäsionsfolie, Puls/Echo, Pulsenergie 100 μ J, Gain 20 dB.

Die Werte der Sensitivität der Tabelle 6 sind meist wesentlich niedriger als die Werte der Tabelle 5, weil ein Teil der Schallenergie durch die Adhäsionsfolie absorbiert wird. Wie in der Simulation berechnet, werden die Bandbreiten durch die Folie deutlich geringer beeinflusst. Eine Ausnahme stellt die in der jeweils letzten Zeile der beiden Tabellen angegebene Materialkombination dar. Hier wird das Signal nicht durch die Folie beeinflusst, was dadurch zu erklären ist, dass sie akustisch gut an die Folie angepasst ist. Auch in Tabelle 6 zeigt sich die Kombination aus PCM 55 und Macor allen anderen überlegen.

Zusammenfassend kann für die Ergebnisse der Simulation und der Reihenversuche festgestellt werden, dass ein Ultraschallwandler bestehend aus einer piezoelektrischen Keramik PCM 55 mit einer Anpassungsschicht aus der Glaskeramik Macor allen anderen untersuchten Materialkombinationen bezüglich der Signalstärke überlegen war. Aus diesem Grund wurde für das Redesign der Phased Array Messköpfe PCM 55 und Macor gewählt. Die in Abbildung 29 dargestellten Ergebnisse weisen darauf hin, dass 1 MHz die obere Grenzfrequenz ist. Eine Erhöhung der räumlichen Auflösung durch Erhöhung der Frequenz des Phased Array ist also nicht möglich. Vor diesem Hintergrund wurde beschlossen, mit Ausnahme der Materialkombination und der Anzahl der Elemente nicht von den Spezifikationen des ersten Phased Array abzuweichen. Die Anzahl der Elemente wurde von 64 auf 32 verringert, um durch den so kleiner werdenden Sensorkopf die Möglichkeit zu haben auch kleinere Flächen und Kurven zu vermessen. Abbildung 31 zeigt die beiden neu aufgebauten 32-elementigen Messköpfe zusammen mit den bereits vorhandenen 64-elementigen Messköpfen.



Abbildung 31: 64- und 32- elementige Phased Array-Messköpfe.

AP7: Tests

Zunächst wurde ein Mitarbeiter des Rathgen-Forschungslabors am Fraunhofer IBMT in den Grundlagen des Messens mit Ultraschall und an dem System geschult. Die Schulung hatte folgende Agenda:

- theoretische Einführung in die Ultraschallmesstechnik,
- praktische Übungen mit einkanaligen Systemen in Reflexion und Transmission an Proben aus verschiedenen Materialien und Marmor,
- Einweisung in die Nutzung eines Phased Array Systems,
- selbständiges Arbeiten mit dem Phased Array System, Tests mit verschiedenen Koppelmitteln,
- Untersuchung der Kontaminierung von Marmor durch die Koppelmittel.

Anschließend wurde das gesamte System an das Rathgen-Forschungslabor transferiert. Abbildung 32 zeigt eine baugleiche Elektronik, wie diejenige, die dem Rathgen-Forschungslabor zur Verfügung gestellt wurde.



Abbildung 32: Elektronik für Testmessungen.

Am Rathgen-Forschungslabor wurde die Testphase mit der Untersuchung der Ultraschallphantome begonnen und die am IBMT begonnenen Untersuchungen zu den Koppelmitteln fortgeführt. Die Identifizierung von Reflektionen innerhalb des Marmors ist nicht einfach zu bewerkstelligen. Durch viele kleine Echos, aufgrund von Unregelmäßigkeiten im Marmorgefüge, ist eine bildhafte statische Darstellung nicht geeignet, da diese die Reflektionen an Störstellen an Intensität meist übertreffen. Eine eindeutige Zuordnung ist nur durch leichtes Hin- und Herbewegen des Sensors möglich. Echos hervorgerufen durch Unregelmäßigkeiten im Marmor verhalten sich scheinbar Punktuell und verändern ihre Reflektionseigenschaften relativ zum Einschallwinkel, während die großflächigeren Störstellen, z.B. Risse, Metallarmierungen oder Hohlräume, auch bei einem veränderten Einschallwinkel sichtbar bleiben. Alle Aufnahmen müssen als Momentaufnahmen betrachtet werden, in denen die Möglichkeit besteht, dass die gekennzeichneten Reflektionen schwächer erscheinen als die Unregelmäßigkeiten im Marmorgefüge. Dieser Umstand kann zu Fehlinterpretationen in den vorliegenden Aufnahmen führen.

In Zusammenhang mit der Messung an Ultraschallphantomen wurden auch Marmorwürfel mit geklebten Bruchflächen und verfüllten Hohlräumen untersucht. Diese Störstellen konnten mit der bestehenden Konfiguration des bisher entwickelten Ultraschallsystems nicht immer detektiert werden. Ob hier eine weitere Verbesserung möglich ist, oder ob es sich um ein prinzipielles Problem handelt, bedingt durch die hohe akustische Dämpfung des Marmors, die auf 1 MHz begrenzte Maximalfrequenz oder die akustischen Eigenschaften der eingebrachten Materialien, konnte im weiteren Projektverlauf nicht geklärt werden.

In Zusammenhang mit den Tests an Ultraschallphantomen wurden verschiedene Techniken zum Ankoppeln des Ultraschalls untersucht. Als Koppelmittel und als Schutz vor dem Eindringen des Koppelmittels wurden folgende Materialien getestet:

- destilliertes Wasser,
- medizinisches Ultraschallgel Sonogel der Firma Sonogel Vertriebsgesellschaft GmbH,
- medizinische Vorlaufstrecken aus Proxon, ein extrem weich gemachtes Polyvinylchlorid, der Firma Sonogel Vertriebs GmbH,
- Hydrogel Neoheal der Firma Kikgel,
- Plastik-Fermit der Firma Fermit GmbH,
- Spindellagerfett Isoflex NBU 15 der Firma Küber Lubrication,
- Handelsübliche Frischhaltefolie,
- Semiconductor Wafer Tape SWT 10+ der Firma Nitto Denko,
- Cyclododecan der Firma Kremer Pigmente GmbH & Co. KG.

Frischhaltefolie und die Folie SWT 10+ wurden zum Schutz vor flüssigen Koppelmitteln glatt auf die Marmoroberfläche aufgestrichen. Dabei hat sich die in der Halbleiterindustrie verwendete Folie SWT 10+ als die bessere Lösung erwiesen. Sie lässt sich ohne Blasenbildung auftragen und rückstandsfrei entfernen. Proxon und Hydrogele sind sehr flexibel aber nicht flüssig und können ohne weiteren Schutz auf Marmor aufgelegt werden, haben aber den Nachteil den Schall an den Übergangsflächen zu reflektieren was zu Nachechos führt die eine Interpretation erschweren. Abbildung 33 zeigt diese Problematik nicht. In Abbildung 34 sind Echos der Koppelmittel erkennbar.

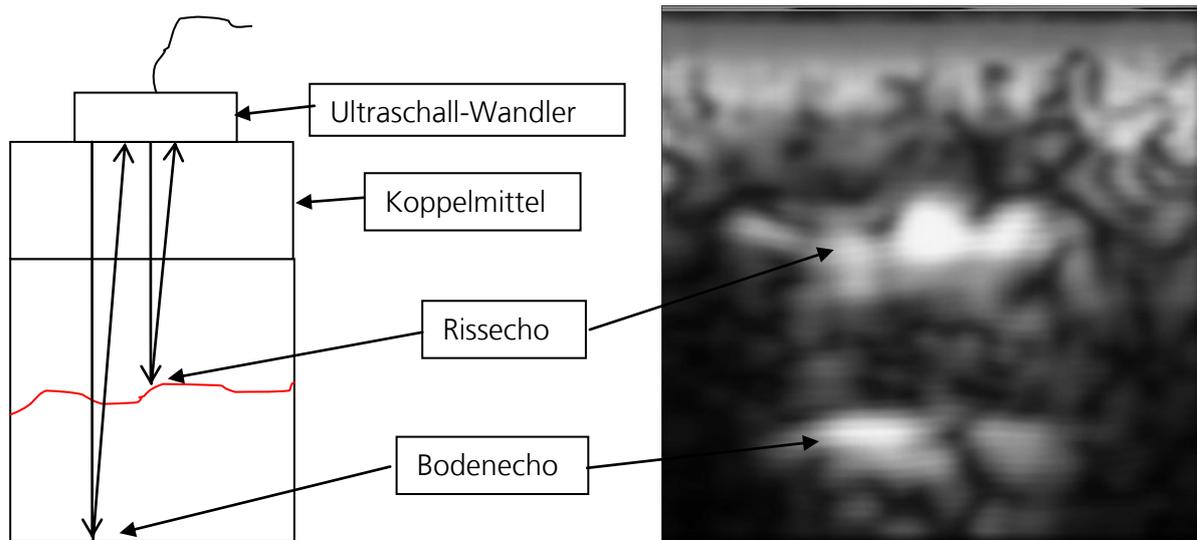


Abbildung 33: Phantom K1, nicht gealtert, Kantenlänge ca. 4,5 cm, Riss bei ca. 2 cm, Riss und Hohlraum mit Gips verklebt. Koppelmittel SWT10+ und Wasser ist im Bild nicht sichtbar.

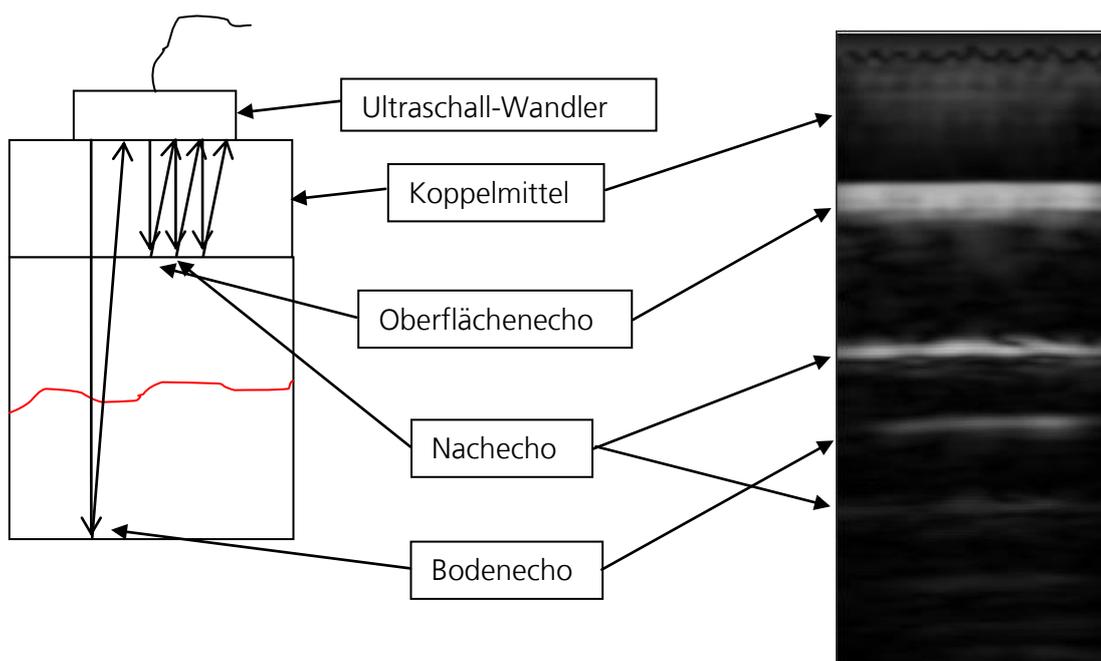


Abbildung 34: Phantom 11g, nicht gealtert, Kantenlänge ca. 10 cm, Koppelmittel Proxon und Sonogel ist im Bild sichtbar und erschwert die Interpretation durch Nachechos.

Cyclododecan ist durch seine Eigenschaft bei Raumtemperatur zu sublimieren, d.h. direkt vom festen in den gasförmigen Zustand überzugehen und sich so rückstandsfrei aufzulösen, besonders gut für die Verwendung im Bereich der Restaurierung und Konservierung geeignet. Zunächst wird das weiße Pulver geschmolzen, indem es auf 60°C erwärmt wird. Nachdem die Flüssigkeit auf die zu untersuchende Stelle aufgetragen wurde, erstarrt sie beim Abkühlen auf Raumtemperatur zu einer geschlossenen Oberfläche.

Ein maximaler Eintrag von Schallenergie konnte durch eine Kombination von Cyclododecan, der Folie SWT 10+ und Ultraschallgel erreicht werden. Zunächst wurde das Cyclododecan aufgetragen und dann die Folie aufgestrichen. In dieser Kombination wurde mit Ultraschallgel eingekoppelt. In Tabelle 7 werden weitere Ergebnisse an den Phantomen wiedergegeben.

Phantom	Störstelle	Ankopplung	Ergebnis
K1	Zerteilt, Hohlraum, Gips gefüllt und geklebt	SWT10+ und Wasser	Riss und Boden detektiert, Hohlraum nicht eindeutig
K3	Zerteilt, Kalloplast R geklebt	Frischhaltefolie und Wasser	Boden detektiert, Riss nicht
K4	Zerteilt, Hohlraum, Edelstahldübel, mit Kalloplast R geklebt	SWT10+ und Wasser	Dübel, Riss und Boden detektiert
K6	Zerteilt, Hohlraum, nicht gefüllt, Kalloplast R geklebt	SWT10+ und Wasser sowie Frischhaltefolie und Wasser, Einkopplung war bedingt möglich	Hohlraum und Boden detektiert, Riss nicht
K8	Zerteilt, Hohlraum, Edelstahldübel, mit Kalloplast R geklebt	Frischhaltefolie und Wasser	Riss und Boden detektiert, Dübel nur durch Schallschatten in Bodensignal sichtbar
K9	Zerteilt, Hohlraum, Gips gefüllt und geklebt	Frischhaltefolie und Wasser, Einkopplung bedingt möglich	Boden detektiert, Hohlraum und Riss nicht
K10	Gefestigt mit 10%-igem Paraloid B72 durch kapillares Aufsaugen	SWT10+ und Sonogel	Boden in gefestigten und ungefestigten Bereichen detektiert
K11	Zerteilt, Hohlraum, nicht	SWT10+ und Wasser	Boden, Riss und Hohlraum

	gefüllt, Kalloplast R geklebt		detektiert, sehr schwache Signale
K12	Zerteilt, Hohlraum, Gips gefüllt und geklebt	SWT10+ und Wasser	Schwache Signale erkennbar, Zuordnung nicht möglich
K14	Zerteilt, Kalloplast R geklebt	SWT10+ und Wasser	Riss und Boden detektiert, Signale sehr schwach
K15	Gefestigt mit 10%-igem Paraloid B72 durch kapillares Aufsaugen	SWT10+ und Wasser	Boden in gefestigten und ungefestigten Bereichen detektiert

Tabelle 7: Phased Array untersuchung der Phantome K1 bis K15 mit eingebrachten Störstellen.

Abbildung 35 zeigt ein Ergebnis von Messungen an dem Würfel K4. Dieses Ultraschallphantom enthält einen mit dem Klebemittel Kalloplast R verklebten Riss und einen Hohlraum mit einer eingeklebten Metallarmierung. Das Array befindet sich in der Position „0“ auf der Zentimeterskala.

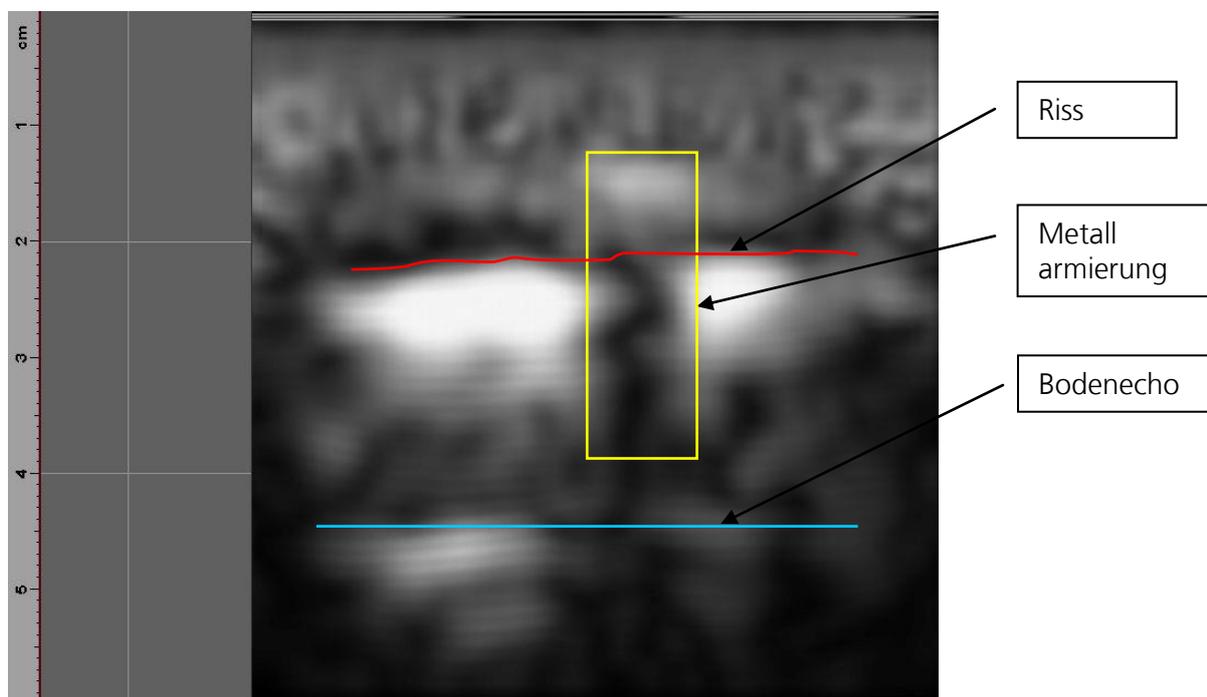


Abbildung 35: Probenwürfel K4, nicht gealtert, Kantenlänge ca. 4,5 cm, Riss bei ca. 2 cm und Hohlraum mit Metallarmierung beginnt bei ca. 1,5 cm Tiefe mit Kalloplast R verklebt, Ankopplung mit SWT10+ und Wasser.

In einer Tiefe von ca. 2 cm sind deutlich der Riss und die ihn durchdringende Metallarmierung zu erkennen. Bei ca. 1,5 cm tiefe befindet sich ein Echo, das vermutlich ein Ende der Metallarmierung darstellt. Die hellen Bereiche in ca. 4,5 cm Tiefe, der Kantenlänge des Würfels, entstehen durch Schallwellen, die an der gegenüberliegenden Außenseite des Würfels reflektiert werden.

Abbildung 36 zeigt ein Ergebnis einer Messung an einem ca. 20 cm dicken Marmorblock. In ca. 3 cm und 7 cm Tiefe sind Bohrungen zu erkennen. Die Echos von der Außenseite sind in ca. 20 cm Tiefe zu erkennen.

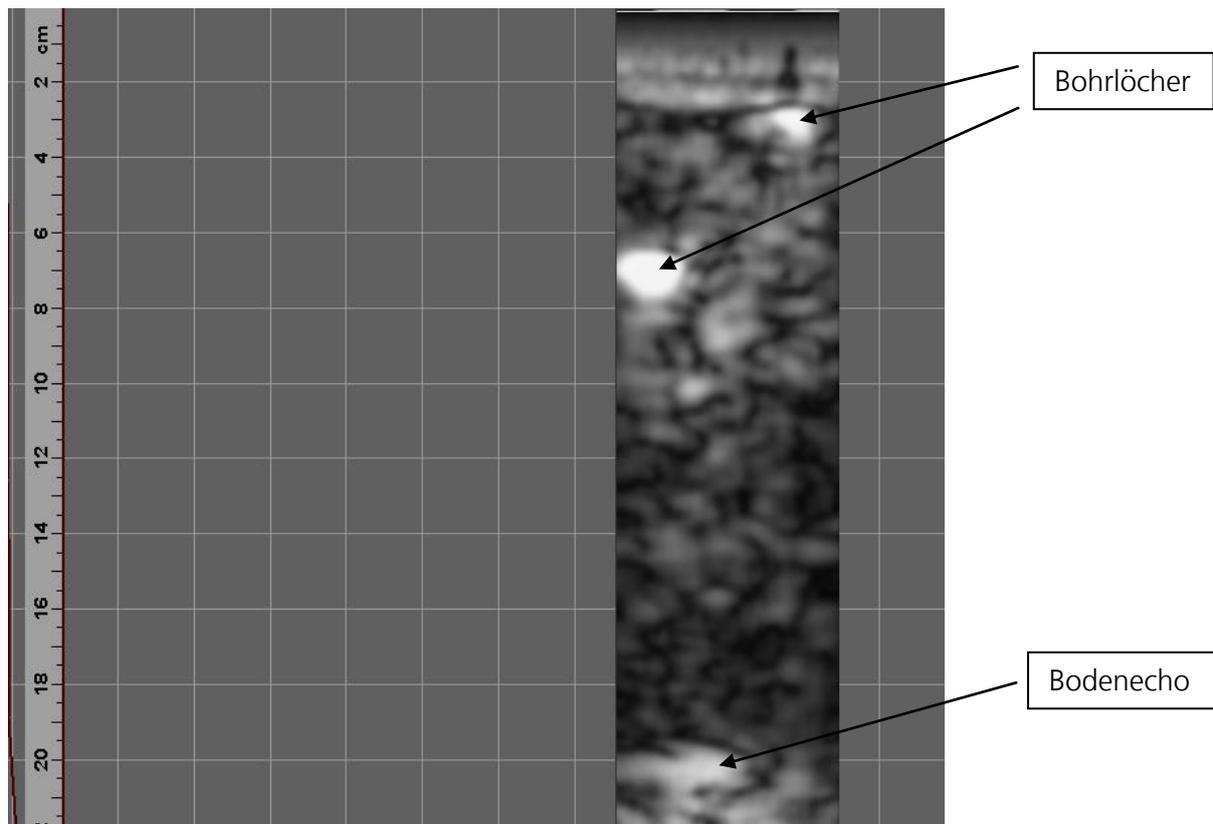


Abbildung 36: Marmorblock, $v=4000$ m/s, Dicke ca. 20 cm, Bohrungen in ca. 3 cm und 7 cm Tiefe, Ankopplung mit SWT10+ und Wasser.

Nach den Tests an Ultraschallphantomen und der damit verbundenen Entwicklung einer geeigneten Technik des Einkoppelns wurden für weitere Tests folgende Objekte aus Marmor ausgesucht:

- eine Statue, die Friedrich II darstellt, auf der Spandauer Zitadelle,
- die Statue „Mercur und Psyche“ von Reinhold Begas in der Kutscheneinfahrt der Alten Nationalgalerie, Staatliche Museen zu Berlin,
- eine Säule des Markttors von Milet im Pergamon Museum, Staatliche Museen zu Berlin.

Abbildung 37 zeigt eine Teilansicht der Statue Friedrich II., Zitadelle Spandau in Berlin. Im Bereich des rechten Knies befindet sich ein deutlich erkennbarer Riss quer zum Bein. Unterhalb dieses Risses wurde ein Bereich auf der Vorderseite des Beines nach der oben beschriebenen Ankopplungstechnik mit Cyclododecan, der Folie SWT10+ und Sonogel präpariert. Eine Großaufnahme des präparierten Bereiches ist in Abbildung 38 wiedergegeben. Der Riss ist im oberen Bildbereich zu erkennen. Die Messungen mit dem Phased Array System wurden für verschiedene Positionen des Messkopfes durchgeführt. In fast allen Fällen konnte die in der Abbildung 39 gezeigte Fehlstelle in ca. 7 cm Tiefe detektiert werden. Ob es sich bei der Fehlstelle um eine Armierung oder eine andere unbekannte Fehlstelle im Innern der Statue handelt konnte mit den Messungen nicht geklärt werden.



Abbildung 37: Teilansicht der Statue Friedrich II., Zitadelle Spandau in Berlin. Das schwarze Kästchen umrandet den untersuchten Bereich.

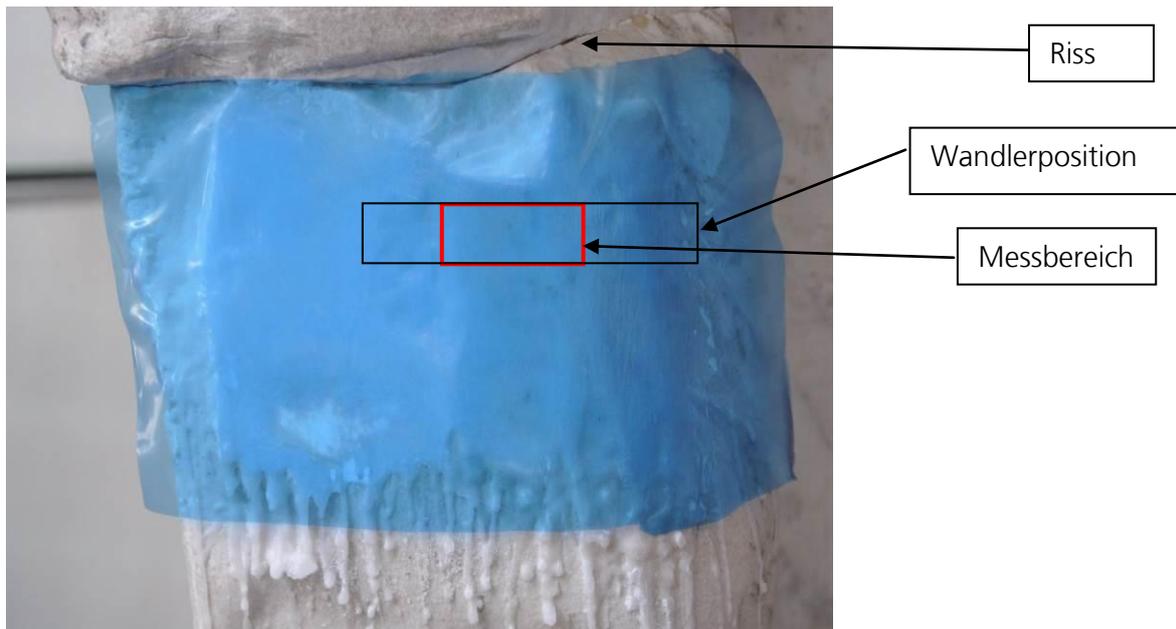


Abbildung 38: Präparation mit Cyclododecan und der Folie SWT 10+.

Das schwarze Kästchen bezeichnet die Position des Wandlers, das rote Kästchen den tatsächlich eingekoppelten Bereich. Aufgrund der Rundung des zu untersuchenden Gegenstandes konnte nicht mit der gesamten Wandleroberfläche eingekoppelt werden.

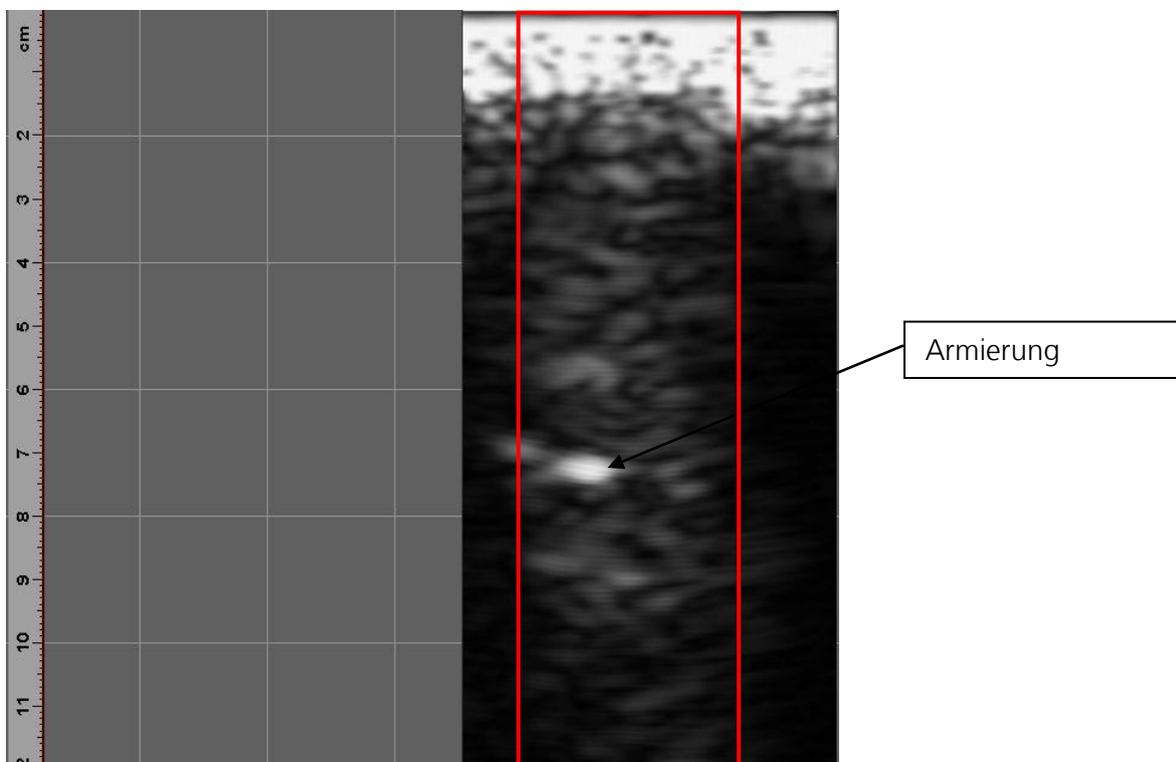


Abbildung 39: Messung am Bein der Statue Friedrich II., Fehlstelle in ca. 7 cm Tiefe, erkennbar durch den hellen Bereich. Das rote Kästchen zeigt den tatsächlich eingekoppelten Bereich.

Abbildung 40 zeigt eine Teilansicht der Statue „Merkur entführt Psyche“ von Reinhold Begas. Der untersuchte Bereich ist durch ein schwarzes Kästchen gekennzeichnet. Der Arm des Merkurs wurde im Jahre 2009 aufgrund von statischen Problemen gebrochen und neu angefügt. Im Zuge dieser Maßnahme wurde eine Eisenarmierung in den Arm eingebracht. Die Präparation, ein Schichtaufbau mit Cyclododekan, SWT10+ und Sonogel zur Ankopplung, fand auf der Rückseite des Armes statt und wird in Abbildung 41 gezeigt. Abbildung 42 gibt eine Messung in diesem Bereich wieder. In einer Tiefe von ca. 3,7 cm ist eine Fehlstelle als helle Linie zu erkennen. Hier wurde senkrecht zum verklebten Riss gemessen. Die helle Linie wird links durch den Schallschatten des Risses begrenzt. Bei der Fehlstelle handelt es sich wahrscheinlich um eine Armierung, die bei der Restaurierung verwendet wurde.

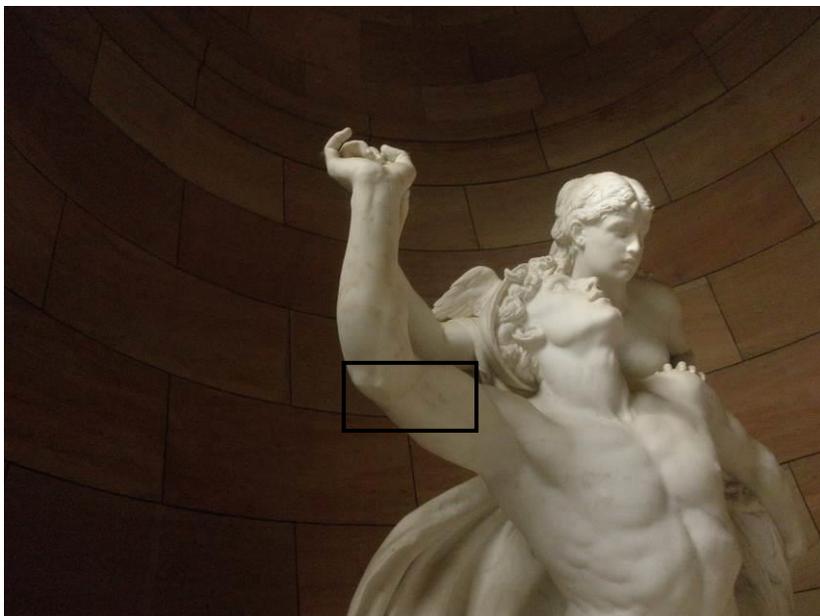


Abbildung 40: Teilansicht der Statue „Merkur und Psyche“, Alte Nationalgalerie, Staatliche Museen zu Berlin, das Kästchen kennzeichnet den untersuchten Bereich.

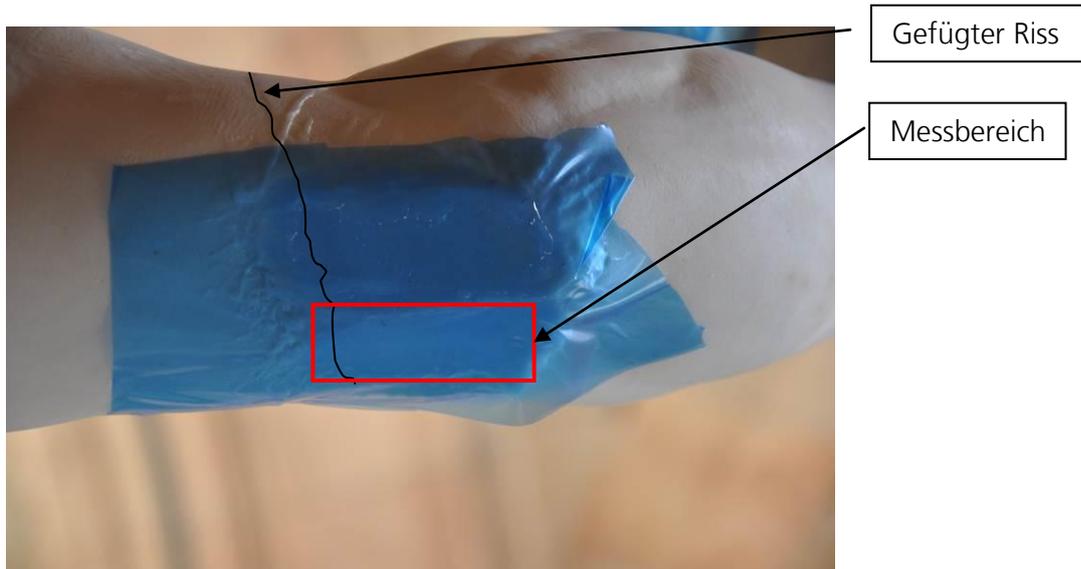


Abbildung 41: präparierter Bereich auf der Rückseite des Arms von Merkur. Der Riss wird schwarz dargestellt, das rote Kästchen beschreibt den Messbereich.

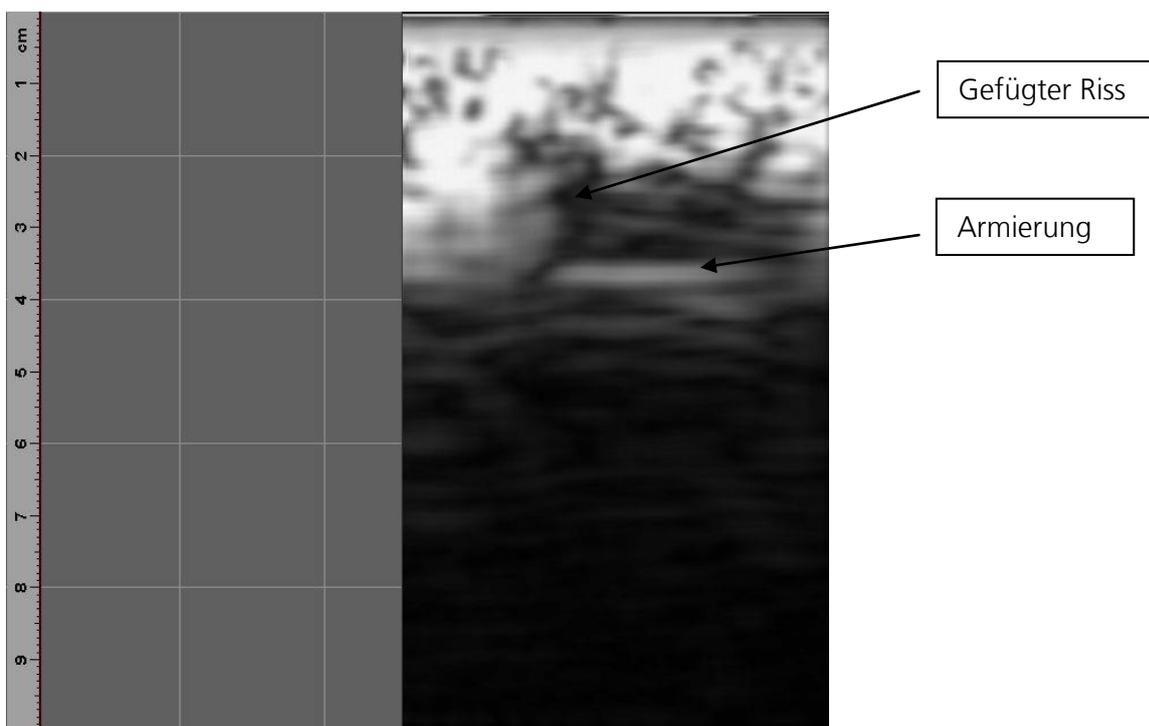


Abbildung 42: Messung am Arm von Merkur, Armierung in ca. 3,7 cm Tiefe wird links begrenzt durch einen Schallschatten, der durch den gefügten Riss hervorgerufen wird.

Abbildung 43 zeigt eine Teilansicht des Markttors von Milet im Pergamon Museum. Der untersuchte Bereich ist durch ein schwarzes Kästchen gekennzeichnet. An der dem Besucher abgewandten Rückseite der Säule wurden 4 Bereiche für Messungen Präpariert, die in Abbildung 44 gezeigt werden.



Abbildung 43: Teilansicht des Markttors von Milet, der untersuchte Bereich befindet sich auf der Rückseite des durch ein Kästchen gekennzeichneten Bereiches.



Abbildung 44: präparierte Bereiche auf der Rückseite einer Säule. Die Messung wurde im rot markierten Bereich durchgeführt.

Als Anfang des 20. Jahrhunderts das Tor nach Berlin transportiert wurde, wurden bei der Rekonstruktion des Tores die Säulen aus statischen Gründen entkernt und nach Untersuchungen

von Siegesmund et al.¹ ist folgender Schichtaufbau, von außen nach innen, zu erwarten: Marmor, Kalkmörtel, Ziegelstein, Zementmörtel und Armierungsstahl. Abbildung 45 zeigt ein Echo in ca. 8,5 cm Tiefe, das in verschiedenen Messpositionen zu erkennen war. Da die Messpositionen bei diesem Messobjekt relativ weit auseinander lagen, stammen die Echos vermutlich nicht von Fehlstellen, sondern von der Innenfläche der Marmorschalung.

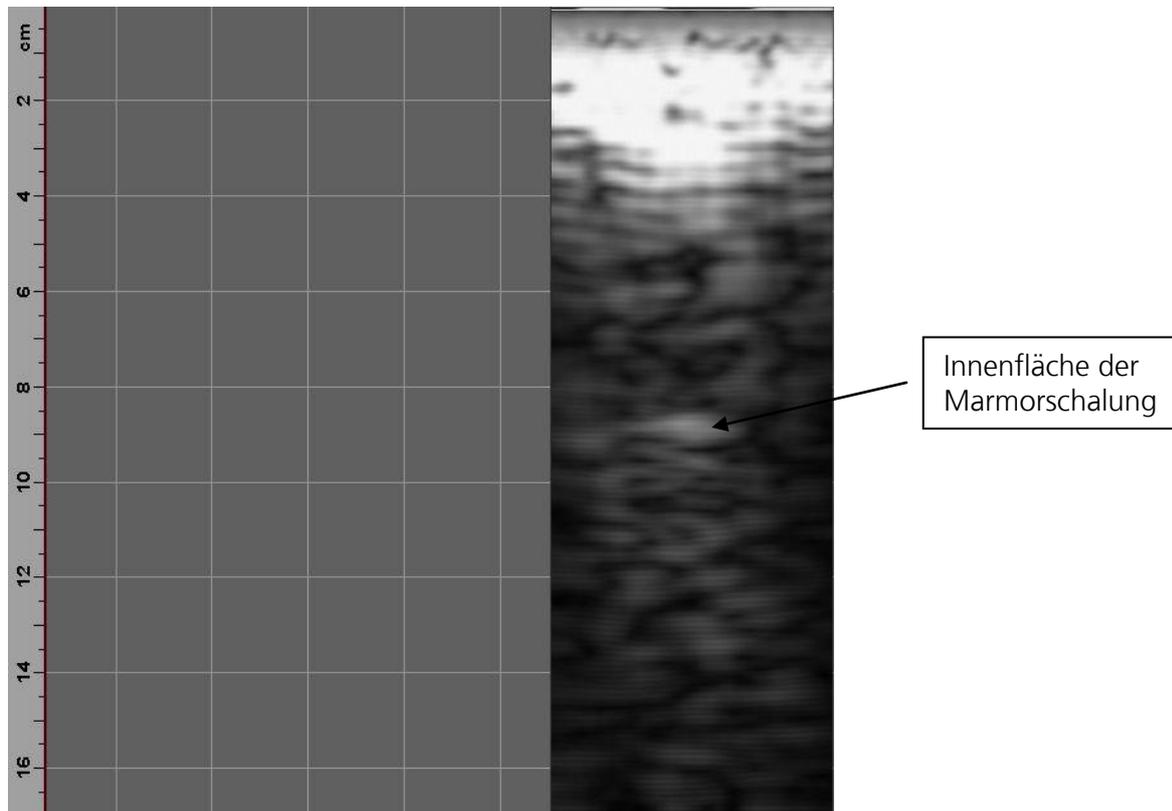


Abbildung 45: Messung an einer Säule, ein Echo in ca. 8,5 cm Tiefe ist erkennbar.

¹ Siegesmund, S., Middendorf, B. ,The Market Gate of Miletus: damages, material characteristics and the development of a compatible mortar for restoration' in Environ. Geol., 2008, 56:753-766; DOI 10.1007/s00254-008-1475-x

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projekts war es das Anwendungspotential moderner Ultraschallsysteme aus der Medizintechnik für die zerstörungsfreie Analyse von Kunstobjekten und Kulturdenkmälern aus Marmor zu evaluieren. Hierzu sollte für die neue Anwendung ein Phased Array Ultraschallsystem bestehend aus einer Mehrkanalelektronik und Messköpfen entwickelt werden. Diese Projektziele konnten erfolgreich erreicht werden. Wie im vorliegenden Abschlussbericht gezeigt, ist es mit den entwickelten Laborprototypen möglich Fehlstellen in Ultraschallphantomen und Kunstobjekten darzustellen. Dabei konnte bei einer Frequenz von 1 MHz Marmor von 20 cm Dicke im Puls/Echo-Mode durchschallt werden, d.h. Fehlstellen bis in eine Tiefe von 20 cm können detektiert werden.

In Zusammenhang mit der Entwicklung der Elektronik wurden die Algorithmen der Signalverarbeitung an die neue Messsituation angepasst. Konventionelle Ultraschallsysteme der Medizintechnik arbeiten bei Frequenzen größer oder gleich 5 MHz und nehmen für ihre Algorithmen diesen Frequenzen entsprechende Aperturen der Ultraschallwandler und eine konstante Schallgeschwindigkeit von ungefähr 1500 m/s an. Wie viele Literaturstellen und eigene Voruntersuchungen zeigen, schwankt in Abhängigkeit vom Verwitterungszustand die Schallgeschwindigkeit in Marmor zwischen 1400 m/s und 5500 m/s und auf Grund der Materialdämpfung sind Frequenzen oberhalb 1 MHz nicht sinnvoll. Die Algorithmen wurden dahingehend geändert, dass die Schallgeschwindigkeit frei gewählt werden kann und Wandler mit größeren Aperturen verwendet werden können.

Nach Simulationen und Vorversuchen mit 1-elementigen Ultraschallwandlern wurden zwei 64-elementige und zwei 32-elementige Phased Array Messköpfe aufgebaut. Die Vorversuche dienten dem Herausfinden einer geeigneten Kombination aus Piezokeramik und akustischer Anpassungsschicht, die eine maximale Transmission der Schallenergie ermöglicht. In diesem Zusammenhang wurde mit Wandlern unterschiedlicher Frequenzen gemessen und die Frequenzspektren der Sende- und Empfangssignale verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass Signale oberhalb 1 MHz in Marmor sehr stark gedämpft und nur Anteile des Spektrums unterhalb 1 MHz empfangen werden. Sendefrequenzen oberhalb 1 MHz sind deshalb nicht sinnvoll und das räumliche Auflösungsvermögen kann nicht über den so gegebenen Grenzwert gesteigert werden.

Neben der Entwicklung der Messköpfe war die Entwicklung einer geeigneten Technik zum Einkoppeln des Ultraschalls in das zu untersuchende Objekt von großer Bedeutung. Die Koppelmedien sollen eine möglichst hohe Transmission von Schallenergie in das zu untersuchende Objekt gewährleisten und dürfen gleichzeitig dieses nicht beschädigen. Nach zahlreichen Versuchen hat sich eine Kombination aus dem Polymer Cyclododecan, der Folie SWT

10+ und Ultraschallgel als am geeignetsten erwiesen. Nach der Messung werden Folie und Ultraschallgel entfernt und das Cyclododecan sublimiert rückstandsfrei.

Die Anwendbarkeit moderner bildgebender Ultraschallverfahren konnte mit dem Projekt bewiesen werden. Neue Algorithmen der Signalverarbeitung und an Marmor angepasste Phased Array Messköpfe wurden entwickelt und eine geeignete Technik zum Einkoppeln des Ultraschalls gefunden. Eine Verbesserung der Bildgebung und ein anwendungsfreundliches System erfordern weitere Entwicklungen.

Auf Grund der inhomogenen Materialstruktur und der damit verbundenen Dämpfung müssen zukünftige Ultraschall-Systeme für Messungen an Marmor gegenüber konventionellen medizinischen Systemen eine höhere Sendeleistung und eine größere Empfangsverstärkung aufweisen. Diese Maßnahme wird auch das empfangene Hintergrundrauschen verstärken. Um dieses zu unterdrücken und die Bildqualität zu steigern, können die Signal- und Bildverarbeitung weiter optimiert werden. Weiterhin könnte die Nutzoberfläche komfortabler gestaltet werden, indem die Schalllaufzeiten angezeigt werden und eine Zoomfunktion integriert wird. Wie in AP5 diskutiert wird durch eine grundlegende Neukonstruktion der Elektronik auch eine 3D Bildgebung möglich. Eine exakte Bildgebung ist nur möglich, wenn die Schallgeschwindigkeit im zu untersuchenden Objekt bekannt ist. Diese kann mit einer Messung in Transmission mit zwei 1-elementigen Ultraschallwandlern bestimmt werden. Die entsprechende einkanalige Elektronik könnte in das Ultraschallsystem integriert werden und die gemessene Schallgeschwindigkeit automatisch an die Algorithmen der Phased Array Elektronik weiterleiten. Die Mobilität des Systems könnte verbessert werden, indem die Elektronik tragbar gestaltet und mit Laptop ausgestattet wird. Wesentliche Fortschritte können sicher noch bei den Phased Array Messköpfen gemacht werden. Bisher wurden lediglich vier Messköpfe realisiert deren akustische Anpassung auf die akustische Impedanz von mittel verwittertem Marmor abgestimmt war. Diese Wandler sind an neuen Marmor und stark verwittertem Marmor fehlangepasst. Ein gesteigerter Energieübertrag und eine erhöhte Sensitivität sind möglich, wenn entweder spezifische Wandler für verschiedene Marmorsorten oder austauschbare Anpassungsschichten entwickelt werden.