

**Zerstörungsfreie Ortung von Anomalien in historischem
Mauerwerk mit Radar und Ultraschall**
- Möglichkeiten und Grenzen -

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Architektur

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Astrid Wendrich

geb. 25.07.1974

Weimar, 2008

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl

Prof. Dr.-Ing. Werner Leschnik

Prof. Dr. rer. nat. Jens Tronicke

Tag der Disputation: 12.12.2008

Für Alexander und meine beiden Töchter, Helene und Charlotte.

“Sich seiner Vergangenheit bewusst sein, heißt Zukunft haben“
(Hans Lohberger, Schriftsteller)

Zerstörungsfreie Ortung von Anomalien in historischem Mauerwerk mit Radar und Ultraschall

- ASTRID WENDRICH -

Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Architektur, 2008

Stichworte: Laufzeit, Tomografie, Radar, Ultraschall, zerstörungsfrei, Mauerwerk, Ortung von Anomalien

Kurzfassung

Für die Sanierung von Bauwerken werden meist Informationen über die innere Struktur und den Aufbau, Belastungszustände, Feuchte- und Salzgehalte benötigt. Die Untersuchung mit zerstörungsarmen und -freien Methoden minimieren die dazu nötigen Eingriffe. Ebenfalls bieten die ZfP-Verfahren die Möglichkeit, den Erfolg einer Maßnahme zu kontrollieren sowie Prozesse über einen langen Zeitraum zu beobachten (Monitoring).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der zerstörungsfreien Untersuchung von inneren Strukturen und des Aufbaus von Mauerwerk mittels Ultraschall und Radar. Der untersuchte Querschnitt wird tomografisch rekonstruiert. Diese Darstellungsart bietet den Vorteil der Tiefenbestimmung von Objekten und der besseren Visualisierung für Auftraggeber und/oder Laien.

Es wurden die Laufzeiten der Longitudinalwellen rekonstruiert. Die Frequenzen der Ultraschalluntersuchungen lagen bei 25 kHz sowie 85 kHz und der Radaruntersuchungen bei 900 MHz sowie 1,5 GHz. Die Rekonstruktion erfolgte mit dem Tomografieprogramm "GeoTom", welches auf der Grundlage des SIRT-Algorithmus arbeitet. Die untersuchten Querschnitte beinhalteten Anomalien bestehend aus Luft, Granit, Holz und Mörtel. Die Abmaße der Anomalien lagen zwischen 10-27 cm bezogen auf einen Querschnitt von 0,76 x 1,0 m.

Eine Ortung der Anomalien war möglich, wenn diese eine Laufzeitveränderung von mindestens der Größe des Messfehlers bewirken. Die Größe dieser Laufzeitdifferenz ist abhängig von den Abmaßen der Anomalie und dem Kontrast der elektromagnetischen bzw. akustischen Eigenschaften zwischen Anomalie und umgebenden Material. Eine Aussage über die Größe der Anomalie ist möglich, jedoch kann auf die Form nur bedingt geschlussfolgert werden. Des Weiteren kann durch den Vergleich der beiden Verfahren ein Rückschluss auf die möglichen Materialien der Anomalie gezogen werden.

Non-destructive investigations of anomalies at historic masonry with radar and ultrasonic

- ASTRID WENDRICH -

Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Faculty Architecture, 2008

keywords: travel time, tomography, radar, ultrasonic, non-destructive, masonry, location of anomalies

Abstract

For the reconstruction of historic buildings often information about the inner structure, load cases, moisture and salt contents is needed. The application of minor and non-destructive techniques can reduce the number of necessary investigations. Moreover those techniques allow controlling the success of repair interventions and enable long term observation of processes (monitoring).

This thesis focusses on non-destructive investigations of the inner structure of masonry using radar and ultrasonic. The investigated cross section will be reconstructed with travel time tomography. This reconstruction technique provides the opportunity of detection of objects in the depth of the investigated structure and offers a better visualization of results.

The frequencies of the ultrasonic waves were 25 kHz and 85 kHz. For the radar measurements frequencies of 900 MHz and 1.5 GHz had been used. The reconstruction had been performed with the tomographic program "GeoTom" which is based on the "SIRT" inversion algorithm. The investigated objects include anomalies like voids or wood, stone and mortar inclusions. The sizes vary from 10 cm up to 27 cm related to a total size of the investigated cross section of 0.76 x 1.0 m.

The detection of those anomalies was possible, if the travel time differences with or without anomaly were greater as the measuring error. The travel time depends on the size of the anomaly itself and on the contrast of properties between anomaly and surrounding material. It is possible to gain general information about the material properties and the size of the anomaly, but not about its shape.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Stand der Technik	5
3. Auswahl der Untersuchungsmethoden	9
4. Mechanische Wellen	11
4.1. Wellentheorie	11
4.2. Wellenarten	11
4.3. Wichtige Welleneffekte	13
4.4. Mathematische Beschreibung der Welle	14
4.5. Ultraschall - Beschreibung des Verfahrens	16
4.5.1. Erzeugen und Empfangen von Ultraschall	16
4.5.2. Piezoelektrischer Effekt	17
4.6. Ultraschall-Apparatur	18
4.6.1. Wahl der Prüfköpfe	19
4.6.2. Wahl der Pulsform	20
4.6.3. Wahl des Koppelmittels	21
4.6.4. Ultraschallapparatur	21
5. Elektromagnetische Wellen	23
5.1. Wellentheorie	23
5.2. Prinzip des Radarverfahrens	24
5.3. Radarapparatur	26
6. Messanordnung der Sender und Empfänger	29
7. Datenauswertung	31
7.1. Tomografie	31
7.1.1. Transformationstechnik	34
7.1.2. Matrixverfahren	34
7.1.3. Ray Tracing	38
7.1.4. Allgemeiner Ablauf einer laufzeittomografischen Auswertung	39

7.2.	Erwartungen an tomografische Darstellungen	48
7.3.	Beschreibung der verwendeten Software	54
7.4.	Laufzeitbestimmung und Fehlerbetrachtung	56
7.4.1.	Laufzeitbestimmung	56
7.4.2.	Fehlerbetrachtung - Ultraschall	57
7.4.3.	Radar	59
8.	Beschreibung der Untersuchungsobjekte	63
8.1.	Klassifizierung von historischem Mauerwerk	63
8.2.	Beschreibung der Untersuchungsprobleme	64
8.3.	Beschreibung der Messobjekte	66
8.3.1.	Laborprobekörper	66
8.3.2.	Altes Museum	68
9.	Messergebnisse & Auswertung	71
9.1.	Hohlstellen - luftgefüllte Einschlüsse	72
9.1.1.	Messungen am Prüfkörper "W2" mit Ultraschall (25 kHz)	72
9.1.2.	Messungen am Prüfkörper "W2" mit Ultraschall (85 kHz)	82
9.1.3.	Messungen am Prüfkörper "W2" mit Radar (1,5 GHz)	86
9.1.4.	Messungen am Prüfkörper "W2" mit Radar (1,6 GHz)	91
9.1.5.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt A mit Ultraschall	95
9.1.6.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt A mit Radar	99
9.1.7.	Messungen an "Asterix", Schnitt B mit Ultraschall	103
9.1.8.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt B mit Radar	106
9.2.	Anomalie aus Granit	110
9.2.1.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt D mit Ultraschall	110
9.2.2.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt D mit Radar	115
9.3.	Anomalie aus Holz	118
9.3.1.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt E mit Ultraschall	118
9.3.2.	Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt E mit Radar	123
9.4.	Anomalie aus Mörtel	126
9.4.1.	Untersuchung einer Säule im Eingangsbereiches des Alten Museums in Berlin, mit Radar	126
9.4.2.	Transmissionsmessungen mit Ultraschall an einer Säule im Eingangsbereiches des Alten Museums in Berlin, mit den Prüfköpfen SO202 (25 kHz)	132
10.	Schlussfolgerung	137
11.	Ausblick	141
12.	Zusammenfassung	145

Begriffsdefinitionen	149
Symbolverzeichnis	153
Literaturverzeichnis	157
Anhang	169
A. Zusatzinformation aus dem Kapitel Fehlerbetrachtung - Ultraschall	169
B. Zusatzinformation aus dem Kapitel Messergebnisse	175
Danksagung	191
Lebenslauf	193
Liste der Veröffentlichungen	195

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Unsere abendländische (Bau)Kultur gründet sich auf unterschiedlichste Arten von Mauerwerk. Dieses kulturelle Erbe früherer Bauperioden mit traditionellen zum Teil fast vergessenen Handwerkskünsten gilt es zu erhalten.

Um Bauwerke erhalten und schützen zu können, sind Voruntersuchungen notwendig. Sie liefern Informationen u.a. über die innere Struktur und den Aufbau, Belastungszustände, Feuchte- und Salzgehalte. Mit diesen Voruntersuchungen werden Schäden und mögliche Schwachstellen erkannt. Aus den Ergebnissen können Rückschlüsse auf deren Ursachen gezogen werden. Aus der Kenntnis der Ursachen können dann geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um den Verfallsprozess zu verlangsamen und die Bauwerke so weit wie möglich für künftige Generationen zu erhalten.

Dem zu erhaltenden Bauwerk sollte während der Voruntersuchungen so wenig zusätzlicher Schaden als möglich zugefügt werden. Dabei wird oft der Wunsch nach zerstörungsfreien oder mindestens zerstörungsarmen Untersuchungen laut. Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) sind beispielsweise Radar, Ultraschall, Impact-Echo und Seismik. Zu den zerstörungsarmen Methoden gehören unter anderem das Mikrowellenbohrloch-Verfahren, Flat-Jack und die Bohrwiderstandsmethode.

Aus der Einmaligkeit eines Bauwerkes ergibt sich folgende Problematik: Die Interpretation der Ergebnisse der einzelnen Verfahren wird um so anspruchsvoller, je weniger Informationen über das Bauwerk und die Baustoffe vorliegen. Inhomogenes Mauerwerk sowie Feuchte- und Salzbelastungen erschweren die Untersuchung zusätzlich.

Der Anspruch an ein modernes Gebäude hat sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. Keller und Dachböden, die früher als klimatische Pufferzone dienten, werden zu Wohn- und Arbeitsräumen umgebaut. Die Wohlfühl-Innentemperatur ist gestiegen. Um dem Umweltschutz Rechnung zu tragen, werden Gebäude zur Minimierung der Energieverluste "eingepackt". Dies führt zur Verhinderung des Luft- und Feuchtigkeitsaustausch über die Fenster. Die Zwangsbe- und Entlüftung über Klimaanlage und Lüftungssysteme wird somit notwendig. Die althergebrachte Raumluftzirkulation verschiebt sich. Werden diese Veränderungen nicht beachtet folgen Wärmebrücken, Feuchtigkeitsschäden und schließlich Schimmelpilzbildungen.

Ein Forschungsgebiet der modernen Bauphysik ist die Untersuchung der Folgen dieser geänderten Nutzungsanforderungen an historische Mauerwerke. Um die neue Raumluftzirkulation zu ermitteln, helfen Computersimulationen und Versuchsstände. Mit Hilfe

der zerstörungsfreien und -armen Prüfung lassen sich die Annahmen verifizieren und erhöhte Feuchtigkeitskonzentrationen in Bauteilen ermitteln. Beispielsweise ist es möglich mit dem Radarverfahren oder der Seismik in Reflexion einen großflächigen Überblick über die Feuchtigkeitsverteilung sowie den Konstruktionsaufbau als Integral über die gesamte Bauteildicke zu bestimmen. Mit Hilfe des Mikrowellenverfahrens kann dann für ausgewählte Bereiche die Feuchtigkeitsverteilung über die Tiefe ermittelt werden. Jedoch ist das Mikrowellenverfahren nur zerstörungsarm und liefert Einblick in einen relativ kleinen Bereich. Die Radar- und Ultraschall-Tomografie bietet die Möglichkeit über einen größeren Bereich tiefenaufgelöste Informationen zerstörungsfrei zu liefern. Somit erhält man mit dem kombinierten Einsatz von Radar und Ultraschall in Reflexion einen groben und durch die tomografische Rekonstruktion transmittierter Wellen einen detaillierten Überblick über die veränderten bauphysikalischen Prozesse.

Einige Studien haben sich schon mit der tomografischen Rekonstruktion von Laufzeiten zur Untersuchung von inneren Strukturen [Côte, 1995; Valle, 1996], Rissen [Siegesmund, 2004] und Feuchtigkeit [Venzmer, 2001] auseinandergesetzt. In allen Berichten werden Einzelbeispiele beschrieben. Da historische Bauwerke einmalig sind, lassen sich diese Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere Objekte übertragen. Es fehlen bis jetzt systematische Betrachtungen zur Auflösbarkeit, Grenzen, Untersuchung mit verschiedenen Frequenzen, Datenfusion und eine Daten-Qualitätskontrollen. Die Methode der Rekonstruktion ist eine Rückrechnung, um mögliche Ausgangsparameter zu ermitteln, bei der immer mehrere Lösungen möglich sind. Um das Ergebnis objektiv beurteilen zu können, werden in der Geophysik Daten-Qualitätskontrollen durchgeführt, um die gefundene Lösung (Rekonstruktion) als die wahrscheinlichste zu kennzeichnen [Tronicke, 2002].

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Übertragung der in der Geophysik bereits angewendete tomografische Rekonstruktion inklusive der Daten-Qualitätskontrolle auf das Bauwesen leisten. Es wird die Aufnahme und Auswertung von tomografischen Messungen beschrieben. Die hier verwendeten tomografischen Verfahren basieren auf der Auswertung von Laufzeiten. Hier werden die Möglichkeiten und Grenzen diese Methode untersucht. Es wäre der zweite Schritt vor dem Ersten, mit der Untersuchung der Feuchtigkeit zu beginnen. Deshalb konzentriert sich die Arbeit auf die Detektion und Auflösbarkeit von Inhomogenitäten wie Luft, Gestein und Holz.

Um zerstörungsfrei Veränderungen der Materialeigenschaften in natürlichem oder künstlichem Stein zu untersuchen stehen mechanische, magnetische oder elektromagnetische Wellen zur Verfügung. Die zFP-Verfahren, mit denen Mauerwerk untersucht werden soll, sollte keinen Strahlenschutzanforderungen unterliegen, baustellentauglich, flexibel im Einsatz, transportabel, bereits am Markt eingeführt und relativ kostengünstig. Die Verfahren Radar und Ultraschall erfüllen die genannten Kriterien weitgehend.

Das Ziel ist es für Radar und Ultraschall jeweils eine Messapparatur auszuwählen mit der stabile, reversible Messungen durchgeführt werden können. Es muss die optimale

Frequenz herausgefunden werden, um bestmögliche Auflösbarkeit und klare Ersteinsätze mit gutem Signal/Rausch-Verhältnis zu erreichen. Weiterhin ist die Ermittlung der Messfehler und apparativen Einflüsse von großer Wichtigkeit. Es wird ein Schema zur Daten-Kontrolle zusammengestellt, um die rekonstruierten, tomografischen Ergebnisse zu überprüfen. Die Frequenz, der Kontrast zwischen Anomalie und Umgebung, die Größe von Anomalien, Messkonfigurationen und Randbedingungen für die Rekonstruktion sind hinsichtlich ihrer Auflösbarkeit hin zu untersuchen. Darüber hinaus wird die Frage untersucht, ob durch die Kombination von ZfP-Verfahren eine Verbesserung des Informationsgewinns ermöglicht werden kann.

2. Stand der Technik

Die zerstörungsfreie Ortung von Anomalien erfolgte mit der tomografischen Rekonstruktionsmethode. Der Begriff "Tomografie" wird oft mit dem Gebiet der Medizin, MRT bzw. Röntgen-Tomografie assoziiert. Allerdings gehen die Ursprünge der Visualisierungstechnik, auf die in dieser Arbeit eingegangen wird, auf die Seismologie zurück. Die Seismologie ist ein Arbeitsgebiet der Geologie bzw. Geophysik. Die Visualisierungstechniken der Geophysik entwickelten sich unabhängig von denen der Medizin und wurden bis zum Anfang der 80iger Jahre "3D-Inversion" genannt. Erst als die in der Medizin verwendeten "iterativen Matrix-Algorithmen" auf die Rekonstruktionstechniken der Seismik übertragen wurden, fand eine Umbenennung in "Tomografie" statt. Demnach verbinden die in der Geophysik und Medizin verwendete Visualisierung nur das Wort "Tomografie", die Messmethoden, mathematischen Algorithmen und Darstellungsmöglichkeiten unterscheiden sich voneinander.

Die Abhandlungen von [Stewart, 1991] und [Jackson, 1994] erläutern die wichtigsten Rekonstruktionsalgorithmen. Eine Zusammenfassung der seismischen Tomografie liefert [Iyer, 1993]. Bereits [Dines, 1979] stellte die ersten tomografischen Anwendungen in der Geophysik vor. Die Diffraktionstomografie für die Darstellung von schwachen Geschwindigkeitskontrasten wird in [Devaney, 1984] erläutert. [Bishop, 1985] beschäftigte sich mit der Inversion von reflektierten, seismischen Wellen. 1989 berichten [Berryman, 1989b] und [Bregman, 1989] über die gewichteten Methode der kleinsten Quadrate für die Laufzeit-Tomografie seismischer Wellen. Im selben Jahr beschrieb [Berryman, 1989a] einen robusten und stabilen Rekonstruktionsalgorithmus speziell für Querschnitte mit hohen Geschwindigkeitskontrasten. In der Publikation von [Abraham, 1998] werden zwei Möglichkeiten erläutert wie anisotropes Verhalten im SIRT-Algorithmus implementiert werden kann. In den Arbeiten von [Witten, 1992], [Cardarelli, 2001], [Daily, 1984] und [Hyndman, 1996] werden einzelne Untersuchungsergebnisse vorgestellt.

Tomografie bedeutet das scheibenweise Darstellen eines durchstrahlten Objektes. Es handelt sich dabei immer um ein 3-dimensionales Untersuchungsproblem, welches meist mathematisch 2-dimensional vereinfacht betrachtet wird. 3-dimensionale Algorithmen werden in [Eppstein, 1998a] und [Eppstein, 1998b] erläutert.

Mit der Filterung von Daten zur Glättung von Tomogrammen befassten sich [Deal, 1996] und [Gersztenkorn, 1988]. [Maurer, 2004] stellt ein neues Inversionsverfahren für die Radar-Amplituden-Tomografie vor.

Das Wichtigste bei der Auswertung von Laufzeiten ist deren exakte Bestimmung der Ersteinsätze, welches sich durch den Einfluss von Rauschen als schwierig erweisen kann. Mit deren automatischen Bestimmung befassen sich die Veröffentlichungen von [Kurz, 2003a], [Kurz, 2003b], [Brauchler, 2003], [Ernst, 2002] und [Tronicke, 2007].

Wie [Bording, 1987] und [Tronicke, 2001] beschreiben, lässt sich die Strahlenüberdeckung und somit die Aussagefähigkeit der Rekonstruktion durch die gleichzeitige Auswertung der transmittierten und reflektierten Welle erhöhen. Die neuesten Forschungen befassen sich mit der gemeinsamen Inversion von Laufzeiten und Amplituden aus elektromagnetischen bzw. mechanischen Wellen, wie in den Veröffentlichungen von [Ernst, 2002], [Tronicke, 2004], [Paasche, 2006b] und [Paasche, 2007] gezeigt werden konnte. Einen vielversprechenden Ansatz zur Erhöhung des Auflösungsvermögens liefert [Pratt, 2003] mit der Inversion von seismischen Wellenfeldern.

Circa Mitte der 80iger Jahren begann man die in der Geophysik verwendeten tomografischen Methoden auf das Bauwesen zu übertragen. 1985 wurde an der Universität Karlsruhe der Sonderforschungsbereich (SFB) 315 "Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke" eingerichtet. Seine Aufgabe war die "Entwicklung von Untersuchungsmethoden für Bauefuge, Konstruktionen und Werkstoffe sowie von denkmalverträglichen Verfahren zur Erhaltung und Verbesserung der Substanz". Zunächst wurden zerstörungsarme und -freie Verfahren zusammengetragen, die zur Erkundung von historischem Mauerwerk in Frage kamen. Die Veröffentlichungen von [Berger, 1990], [Berger, 1991], [Thomassen, 1993], [Silman, 1993], [Wenzel, 2000] und [ZfPBau-Kompodium, 2004] geben darüber einen Überblick.

[Kahle, 1993], [Kahle, 1994] und [Patitz, 2006] beschreiben das Potential des Radar-Echo-Verfahrens zur Strukturerkundung von Mauerwerk. [Gemert, 1995] stellt geoelektrische Messungen für die Überwachung und Qualitätskontrolle von Verfestigungsinjektionen vor. In den Veröffentlichungen von [Valle, 1996] und [Valle, 1998] werden die Auflösbarkeit und Grenzen der Radar-Tomografie beschrieben. Die Arbeiten von [Patitz, 1996] und [Patitz, 1998] befassen sich mit der Erkundung mehrschaligen Mauerwerks mit mechanischen Wellen in Reflexion. [Côte, 1995] und [Siegesmund, 2004] erörtern die Möglichkeiten der Tomografie mit seismischen Wellen. Mit der Kombination von elektromagnetischen und mechanischen Wellen zur Erhöhung der Aussagekraft und -sicherheit befassen sich [Abraham, 1996], [Derobert, 2000] und [Wendrich, 2004a]. An Hand von einem Anwendungsbeispiel beschreibt [Redmer, 2004] den kombinierten Einsatz von Radar, Radiografie und Videoskopie. In der Arbeit von [Kingsley, 1995] geht es um dem kombinierten Einsatz von Seismik und Ultraschall.

Neben der Kenntnis über den inneren Mauerwerksaufbau ist die Tragfähigkeit, der Feuchte- und Salzgehalt sowie deren Verteilung von großem Interesse. Mit dem Tragverhalten von Mauerwerk befasst sich die Dissertation von [Egermann, 1994]. Im Mittelpunkt der Publikationen von [Boos, 1993], [Fleischer, 2002] und [Fleischer, 2004] steht die zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit mittels mechanischer Wellen.

Zur Ermittlung und Sanierung eines Schadens muss oft der Feuchte- und Salzgehalt bestimmt werden. In der Praxis wird meist die gravimetrische-Methode, auch Darr-Methode genannt, angewendet. Das ist ein zerstörendes Verfahren und kann nur einmalig eingesetzt werden. Es eignet sich nicht um laufende Prozesse zu verfolgen (wiederholte Anwendung an einer bestimmten Stelle) und an historisch bedeutenden Oberflächen (Fresken, Stofftapeten etc.). Aus diesen Gründen wurde nach zerstörungsarmen oder -freien Methoden gesucht, um den Feuchte- und Salzgehalt zu bestimmen. [Wittmann, 1993], [Leschnik, 1999b] und [Venzmer, 2006] stellen mehrere Varianten vor zur Feuchtigkeitsbestimmung. Da die Dielektrizitätszahl stark mit der Feuchte zunimmt, eignen sich elektromagnetische Verfahren im Besonderen. Sie ist jedoch im unteren Frequenzbereich zusätzlich vom Salzgehalt abhängig. Ab ca. 500 MHz lässt sich der Feuchtigkeitsgehalt unabhängig vom Salzgehalt bestimmen, wie in den Arbeiten von [Kahle, 1997], [Hauenschild, 1999] und [Venzmer, 2001] gezeigt wird. Mit der getrennten Ermittlung von Feuchte- und Salzgehalte befassen sich [Rahm, 1995], [Leschnik, 1999c], [Holm, 1998] und [Schlemm, 2003]. [Knöchel, 1999] beschreibt die Entwicklung geeigneter Mikrowellen-Sensoren. Die Arbeit von [Göller, 1999] geht auf die Möglichkeiten eines eigenen, bereits am Markt eingeführten Feuchtemessgerätes mit Mikrowellen näher ein.

3. Auswahl der Untersuchungsmethoden

Die Aufgabe dieser Arbeit ist die zerstörungsfreie Visualisierung von inneren Strukturen (insbesondere in historischem Mauerwerk) und deren Beurteilung in Bezug auf ihre Materialeigenschaften. Das heißt es sollen Bereiche geortet werden, die beispielsweise poröser oder feuchter sind als ihre Umgebung oder Inhomogenitäten enthalten wie Holz-, Luft- oder Metalleinschlüsse. Doch mit Hilfe welcher (physikalischer) Größen lassen sich diese Untersuchungsproblem zerstörungsfrei erfassen und von einander differenzieren? Bei der Beantwortung dieser Frage hilft die Petrophysik, die u.a. Einflüsse auf die elastischen, inelastischen und elektrischen Eigenschaften auf natürliches Gestein beschreibt. Auf dieser Grundlage können dann Rückschlüsse auf künstlichen Stein (Ziegel), Luft, Holz und Metall abgeleitet werden.

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** v_P elastischer Wellen in Gesteinen nimmt mit steigender Dichte (bis zu 4 g/cm^3), steigendem basischen Charakter, steigendem Feuchtegehalt, sinkender Korngröße und somit abnehmender Porosität zu. Es gilt: $v_{Luft} < v_{Wasser} < v_{Matrix}$ und somit ist $v_{P,trocken} < v_{P,gesättigt}$. Die Geschwindigkeit sinkt mit steigender Temperatur [Schön, 1983],[Fleischer, 2002, 2004]. Bei Druckbeanspruchung muss die Geschwindigkeits-Druck-Beziehung in drei Abschnitte unterteilt werden: a) starke Zunahme von v infolge Schließen von Poren, b) geringe Geschwindigkeitszunahme, da sich die Matrix ideal-elastisch verhält und c) Absinken der Geschwindigkeit durch Rissbildung. Das Verhalten der Transversalwellengeschwindigkeit v_S unter Druckbeanspruchung zeigt den gleichen Charakter wie der der Longitudinalwellengeschwindigkeit v_P . Jedoch ist das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten zu einander, welche über die Querdehnzahl $\mu = v_P/v_S$ definiert wird, nicht konstant und somit druckabhängig. Die Geschwindigkeit verhält sich in vielen Gesteinen anisotrop. Insbesondere bei Sedimenten ist eine Zunahme des anisotropen Verhaltens mit steigendem Tongehalt zu beobachten.

Die **elektrischen Eigenschaften** lassen sich durch den spezifischen elektrischen Widerstand φ und der Dielektrizitätszahl ε beschreiben. Um die elektrischen Eigenschaften eines Gesteins beurteilen zu können, muss vorerst die Matrix und der Porenraum getrennt voneinander betrachtet werden. Die *Matrix* der meisten Gesteine besitzt eine geringe Leitfähigkeit, die durch eine Zunahme des Druckes und der Temperatur ansteigt. Die Dielektrizitätszahl ε liegt im Größenbereich von $\varepsilon < 10$ und verhält sich bei geschichteten Gesteinen anisotrop. Sie ist frequenzabhängig und im trockenem Gestein

3. Auswahl der Untersuchungsmethoden

im Frequenzbereich von $10^2 - 10^6 \text{ Hz}$ dispersiv (für $T = \text{konstant}$). Bei Magmatiten nimmt ε vom sauren zum basischen Gestein zu.

Der *Porenraum* kann mit Gasen oder Flüssigkeiten gefüllt sein. Gase sind Nichtleiter. Den entscheidenden Leitfähigkeitsanteil liefert die Porenflüssigkeit. Der spezifischen elektrischen Widerstand φ ist abhängig von der Art und Konzentration des Elektrolytes sowie von Druck und Temperatur. Die Dielektrizitätszahl ist dispersiv und frequenzabhängig d.h. ε nimmt mit steigender Frequenz ab. Tonige Bestandteile führen zur Zunahme der Leitfähigkeit.

Die **Absorption** kann mit Hilfe des Absorptionsgrades α beschrieben werden und ist frequenzabhängig d.h. die Absorption nimmt mit steigender Frequenz zu. Der Absorptionsgrad α nimmt ab mit zunehmenden Verfestigungsgrad und Tiefenlage, steigendem Druck und Temperatur sowie abnehmender Porosität und Korndurchmesser.

Zusammenfassend kann man sagen das alle hier beschriebenen Kenngrößen durch Druck und Temperatur beeinflusst werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit mechanische Wellen wird darüber hinaus durch Porosität (somit auch Dichte und Korndurchmesser) und Feuchte, die Geschwindigkeit elektromagnetische Wellen durch Messfrequenz und vor allem Feuchte maßgeblich gekennzeichnet. Weiterhin bewirken Veränderungen der Messfrequenz und Porosität eine Änderung der Absorption.

4. Mechanische Wellen

4.1. Wellentheorie

Die Definition einer Welle ist in [Golm, 1986] wie folgt beschrieben: “Eine Welle ist ein physikalischer Vorgang, bei dem Energie übertragen wird, jedoch kein Stoff transportiert wird und der durch zeitlich und örtlich periodische Änderungen einer physikalischen Größe beschrieben werden kann.“

Teilchen aus einem schwingungsfähigem, miteinander elastisch gekoppeltem System werden infolge einer Energiezufuhr aus ihrer Ruhelage in Schwingung versetzt. Nach [Krautkrämer, 1986] kann man sich das Modell eines elastischen Stoffes wie in Abb. 4.1 vorstellen. Die Federn übertragen die Schwingungen zeitlich verzögert auf die benachbarten Teilchen. Dieser zeitlich und örtlich periodische Vorgang wird Welle genannt.

Eine Art mechanischer Wellen sind die Schallwellen (Schall vom althochdeutschen *scal*). Bei ihnen ist der Druck die sich verändernde physikalische Größe. Mechanische Wellen (auch als elastische Wellen bezeichnet) stellen die Ausbreitung von kleinsten Druck- und Dichteströmungen dar. Im Vakuum setzt sich kein Schall fort. Entsprechend der Frequenz unterscheidet man:

- Infraschall (< 16 Hz, für Menschen nicht hörbarer Bereich)
- Schall (16 Hz - 20 kHz, für Menschen hörbarer Bereich)
- Ultraschall (20 kHz - 1 GHz, für Menschen nicht hörbarer Bereich)
- Hyperschall (> 1 GHz, bedingt ausbreitungsfähig, nicht hörbar)

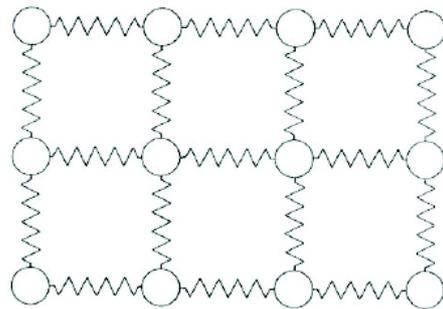


Abbildung 4.1: Elastisches Wellenmodell nach [Krautkrämer, 1986]

4.2. Wellenarten

Bei der Ausbreitung von Schall in einem Medium treten verschiedene Arten von Wellen auf. Die beiden Haupttypen sind Raumwellen und Oberflächenwellen. Raumwel-

len werden weiter unterschieden in Longitudinal- und Transversalwellen (siehe Abb.4.2, Abb.4.3). Die Oberflächenwellen können sich nur entlang einer Oberfläche und nicht im Raum ausbreiten. Sie sind langsamer als Raumwellen, jedoch nimmt ihre Amplitude weniger schnell ab. Man unterscheidet Rayleigh-, Love- und Lambwellen.

Eine **Longitudinalwelle**, auch Längs-, Druck-, Kompressions-, Primär- oder P-welle genannt, ist eine physikalische Welle, bei der die Bewegungsrichtung der schwingenden Teilchen in Ausbreitungsrichtung verlaufen. Somit sind Ausbreitungsrichtung und Auslenkung parallel zu einander. Sie können sich in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern ausbreiten.

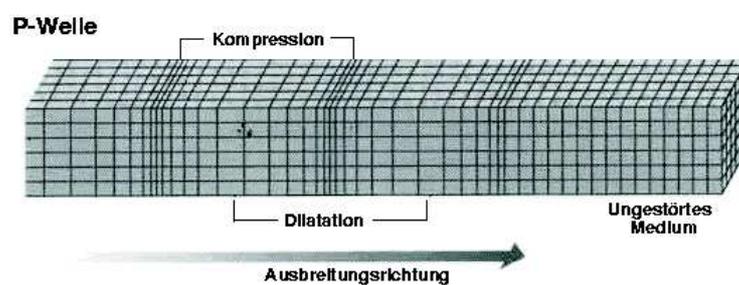


Abbildung 4.2: Grafische Darstellung der Longitudinalwelle nach [Bolt, 1976]

Bei **Transversalwellen** dagegen schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Energie wird über Schub- bzw. Scherkräfte übertragen. Da Gase und Flüssigkeiten praktisch keine Schubkräfte übertragen können, treten Transversalwellen nur in Festkörpern auf. Andere Bezeichnungen für diese Wellenart sind Scher-, Quer-, Sekundär- oder S-welle.

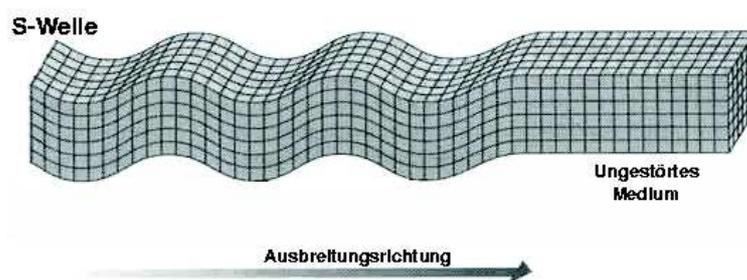


Abbildung 4.3: Grafische Darstellung der Transversalwelle nach [Bolt, 1976]

Weiterhin existieren noch Rayleigh-Wellen [Pohl, 2001], Love-Wellen [Haas, 1997; Love, 1991] und Lamb-Wellen [Fischerauer, 2003; Lamb, 1617].

4.3. Wichtige Welleneffekte

Wichtige Effekte, die bei allen Wellenarten auftreten können, sind Beugung (Diffraktion), Brechung (Refraktion), Reflexion, Streuung, Dämpfung, Absorption und Interferenz.

Brechung (bzw. Refraktion): (lat. *re* = zurück, *frangere* = brechen) bezeichnet die Richtungsänderung einer Welle aufgrund einer lokalen Änderung ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit. Trifft eine Welle schräg auf eine Grenzfläche (Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit), so wird sie i.a. gebrochen (gemäß des Snelliusschen Brechungsgesetzes - siehe S.151) und reflektiert. Einfallslot, einfallende, reflektierte und gebrochene Welle liegen in einer Ebene. Beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium wird die Welle zum Lot hin gebrochen. Die Ablenkung der Welle aus ihrer ursprünglichen Richtung ist um so stärker, je größer der Einfallswinkel ist. Wird der Grenzwinkel α_{Gr} überschritten kommt es zur Totalreflexion. Der Grenzwinkel α_{Gr} ist materialabhängig.

Beugung (bzw. Diffraktion): ist die "Ablenkung" von Wellen an einem Hindernis. Ist die Öffnung des Hindernisses kleiner oder gleich groß der Wellenlänge, kann sich die Welle im geometrischen Schattenraum des Hindernisses (Spalt, Gitter, Fangspiegel usw.) ausbreiten. Zur Beugung kommt es durch Entstehung neuer Wellen entlang einer Wellenfront gemäß dem Huygensschen Prinzip (siehe S.150). Diese können durch Überlagerung zu Interferenzerscheinungen führen.

Von **Reflexion** (lat. *reflectere* = zurückbeugen, -biegen, -krümmen) spricht man, wenn eine Welle von einer Grenzfläche zurückgeworfen wird. Der Eintrittswinkel der einfallenden Welle ist gleich dem Austrittswinkel (Reflexionsgesetz) und die Wellen liegen in der gleichen Einfallsebene. Die beiden Winkel werden zum Einfallslot hin gemessen.

Interferenz leitet sich aus dem altfranzösischem Wort *s'entreferir* ab, welches wiederum auf die lateinische Vorsilbe *inter* = zwischen und dem Verb *ferire* = schlagen zurückgeführt werden kann. Interferenz beschreibt die Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen. Bei der Überlagerung kommt es zur Addition oder Subtraktion der Amplituden. Dabei entstehen typische Muster, die als Interferenzmuster bezeichnet werden.

In natürliche Werkstoffe unterliegt die Welle einer **Dämpfung** (auch Schwächung oder Extinktion genannt). Diese beruht auf zwei Ursachen, der Streuung und der Absorption.

Die **Streuung** beruht darauf, dass das zu untersuchende Material nicht streng homogen ist. Es ist die Ablenkung (mit dem Streuwinkel Θ) einer Welle infolge der Wechselwirkung mit einem Streuzentrum. Die Ablenkung kann in alle Richtungen erfolgen. Deshalb unterscheidet man Vorwärts- und Rückwärtsstreuung. Das Streuzentrum besteht aus Grenzflächen, an denen der Schallwiderstand sich plötzlich ändert, aufgrund verschiedener Dichten und Schallgeschwindigkeiten [Krautkrämer, 1986]. Streuzentren können beispielsweise Korngrenzen, Poren, Kristallanisotropien und sogar Atome sein. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass die Wellenlänge größer oder gleich des Durch-

messers des Streuobjektes ist. Ist sie deutlich kleiner als das Streuobjekt, so spricht man von Reflexion. Um die Verluste durch Streuung auszugleichen, Hilft die Erhöhung der Sendeleistung oder Verstärkung nicht (Vergleich mit Scheinwerferlicht im Nebel). Es Hilft nur das Ausweichen auf niedrigere Frequenzen. Dadurch erhöht sich die Wellenlänge und der Nachweisbarkeit kleinerer Fehlstellen werden natürliche Grenzen gesetzt. [Krautkrämer, 1986]

Der Begriff **Absorption** (lat. *absorptio* = Aufsaugung) bezeichnet im Allgemeinen das Aufsaugen, das In-sich-Aufnehmen von etwas. Beim Durchgang einer Welle durch ein Material bewirkt die Absorption keine Richtungsänderung sondern eine Schwächung. In der Physik ist die Energie-Absorption mit Dissipation (siehe S.149) in einem Körper verbunden. Die Stärke der Absorption wird durch den Absorptionsgrad α beschrieben, der i. d. R. von einer Vielzahl von Parametern nichtlinear abhängig ist. Die Absorption nimmt in der Regel proportional mit der Frequenz zu [Pohl, 1976]. Um die Verluste durch Absorption auszugleichen, kann man die Sendeleistung und Verstärkung erhöhen sowie auf niedrigere Frequenzen ausweichen.

4.4. Mathematische Beschreibung der Welle

Die Ausbreitung von Wellen wird mit Hilfe der Wellengleichung, die eine lineare partielle Differenzialgleichung zweiter Ordnung ist, beschrieben. Im n-dimensionalen Raum lautet die homogene Wellengleichung:

$$v^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (4.1)$$

für eine Funktion $u(x_1, \dots, x_n, t)$, an einem Ort x , mit einer Geschwindigkeit v und zu einer Zeit t . Die Lösung der Differenzialgleichung für eine Dimension (x-Richtung) lautet in der Eulerschen Schreibweise:

$$u(x, t) = A_0 \cdot e^{i(kx \pm \omega t)} \quad (4.2)$$

Generell wird eine Welle mit zwei Größen beschrieben: Der Amplitude und der Phase. Die **Amplitude** A ist die maximale mögliche Auslenkung der Welle. Sie ist bei Wellen (im Gegensatz zu Schwingungen) eine vektorielle Größe, da neben der Stärke der Auslenkung auch deren Richtung entscheidend ist. Die **Phase** φ einer Welle gibt an, in welchem Abschnitt innerhalb einer Periode sich die Welle zu einem Referenzzeitpunkt und -ort befindet. Sie legt also fest, wie groß die Auslenkung ist. Im Beispiel einer ebenen Welle ist

$$\varphi = \vec{k} \cdot \vec{x} - \omega \cdot t \quad (4.3)$$

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen

Kenngröße	Formelzeichen	Beziehung
Amplitude	A_0	$A_0 \perp k$ Transversalwelle $A_0 \parallel k$ Longitudinalwelle
Wellenlänge	λ	$\lambda = 2\pi/k$
Kreisfrequenz	ω	$\omega = 2\pi \cdot f$
Frequenz	f	$f = \omega/2\pi$
Phasengeschwindigkeit	v_{Phase}	$v_{Phase} = \omega/k = \lambda f$
Gruppengeschwindigkeit	v_{Gruppe}	$v_{Gruppe} = d\omega/dk$
Phase	φ	$\varphi = k \cdot r - \omega t$
Wellenzahl, -vektor bzw. Ortsfrequenz	k	$\omega = \omega(k)$

die Phase zum Zeitpunkt t am Ort x .

Man unterscheidet zwischen *Phasen- und Gruppengeschwindigkeit* (siehe S.150). Die Phasengeschwindigkeit v_{Phase} kann für alle Wellenarten durch folgende Beziehung beschrieben werden

$$v_{Phase} = f \cdot \lambda. \quad (4.4)$$

Die Schallgeschwindigkeit der verschiedenen Wellenarten (siehe Kap. 4.2) lassen sich unter kontinuumsmechanischer Betrachtung aus den elastischen Konstanten eines Stoffkorns berechnen, und zwar aus dem Elastizitätsmodul E des Einzelkorns, der Reindichte ρ , und der Querdehnzahl μ (auch Poisson-Konstante genannt)

$$\text{für Longitudinalwellen (P-Welle):} \quad v_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (4.5)$$

$$\text{für Transversalwellen (S-Welle):} \quad v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (4.6)$$

Zwischen den beiden Schallgeschwindigkeiten besteht daher folgender Zusammenhang

$$v_S = v_P \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}}. \quad (4.7)$$

In der Tabelle 4.2 sind einige Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_L für typische Materialien, die im Bauwesen vorkommen, aufgeführt.

Tabelle 4.2: Ausbreitungsgeschwindigkeiten c_L mechanischer Wellen nach *[Deutsch, 1997], **[Weimann, 1995], ***[BDZ, 1987]

Material	Schallgeschwindigkeit c_L (m/s)	Dichte ρ (10^3 kg/m^3)
Luft* (20°C)	344	1,24
Wasser* (destilliert)	1497	0,999
Kochsalzlösung* (25 %)	1770	1,1990
Eis* (-4°C)	3232-3980	0,9
Holz* (quer zur Faser)	1390-1630	0,62-0,69
Holz* (Faserrichtung)	4100-5380	0,62-0,69
Epoxidharz*	2400-2900	1,1-1,25
Sandboden*	270-2000	-
Granit*	3950-6500	2,8-4,1
Basalt*	5930	-
Beton*	3000-4830	1,8-2,5
Marmor*	3810-6500	2,5-2,8
Plexiglas*	2670-2760	1,18
Polyamid*	1800-2600	1,1-1,2
Stahl*	5530-6140	7,7-7,9
Sandstein**	2300-2800	-
Stein* (feuerfest)	2000-4800	
Ton* (gebrannt)	3652	-
Ziegelmauerwerk***	2000-3500	1,6-1,8

4.5. Ultraschall - Beschreibung des Verfahrens

4.5.1. Erzeugen und Empfangen von Ultraschall

Zum Erzeugen und Empfangen von Ultraschall gibt es vielfältige Möglichkeiten z.B. die Ausnutzung des mechanischen und thermischen Effektes [Krautkrämer, 1986]. Der am häufigsten genutzte Effekt ist der piezoelektrische.

4.5.2. Piezoelektrischer Effekt

Der direkte Piezoeffekt wurde im Jahre 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt [Ballato, 1996; Curie, 1880; Mould, 2007]. Der piezoelektrischer Effekt (oder kurz: Piezoeffekt) beschreibt das Zusammenspiel von mechanischem Druck (griech. *piezein* = drücken) und elektrischer Spannung in Festkörpern. Er basiert auf dem Phänomen, dass bei der Verformung bestimmter Materialien auf der Oberfläche elektrische Ladungen auftreten (direkter Piezoeffekt). Umgekehrt verformen sich diese (zumeist Kristalle) bei Anlegen einer elektrischen Spannung (inverser Piezoeffekt). Die Verformung ist allerdings relativ klein bei Anlegen einer Spannung kann kaum eine Promille der Körperabmessung überschreiten.

Durch die gerichtete Verformung eines piezoelektrischen Materials bilden sich mikroskopische Dipole innerhalb der Elementarzellen (Verschiebung der Ladungsschwerpunkte) wie in Abb. 4.4 dargestellt. Die Aufsummierung über alle Elementarzellen des Kristalls führt zu einer makroskopisch messbaren elektrischen Spannung. Gerichtete Verformung bedeutet, dass der angelegte Druck nicht von allen Seiten auf die Probe wirkt, sondern beispielsweise nur von gegenüberliegenden Seiten aus.

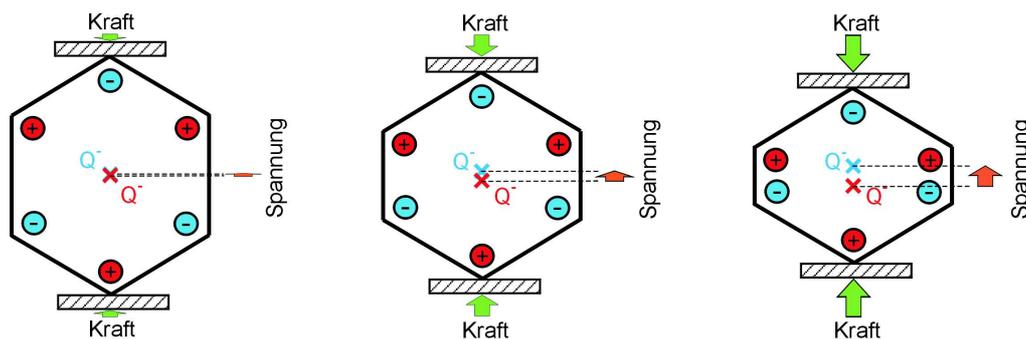


Abbildung 4.4: Direkter Piezoeffekt: Durch mechanischen Druck verlagert sich der positive (Q^+) und negative Ladungsschwerpunkt (Q^-). Dadurch entsteht ein Dipol, bzw. am Element eine elektrische Spannung. nach [Wikipedia, 2007]

Die Frequenz der Schwingung, die ein Piezoelektrikum ausführen kann, ist nur von der Schallgeschwindigkeit (eine Materialkonstante) und den Abmessungen des piezoelektrischen Körpers abhängig.

Der Piezoeffekt kann nur in nicht leitenden Materialien auftreten. Weiterhin sind alle nicht leitenden ferroelektrischen Materialien (Definition siehe S.150) bzw. Materialien mit permanentem elektrischen Dipol auch piezoelektrisch, beispielsweise Bariumtitanat und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Jedoch verhält sich nur ein Teil der Piezoelektrika ferroelektrisch. Bei Kristallen ist ein weiteres Kriterium für das Auftreten der Piezoelektrizität die Kristallsymmetrie. Das bekannteste Material mit Piezoeigenschaften ist Quarz (SiO_2). Weitere piezoelektrische Kristalle sind Bariumtitanat (BaTiO_3), Lithiumniobat,

Galliumorthophosphat, Berlinit, Minerale der Turmalingruppe und alle Ferroelektrika wie Bariumtitanat (BTO) oder Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). BTO und PZT werden jedoch normalerweise nicht als Einkristalle sondern in polykristalliner Form (Keramiken) verwendet.

Als Ultraschallempfänger eignen sich Materialien mit direktem Piezoeffekt, der inverse Piezoeffekt dient der Erzeugung. Im Geber wird ein piezoelektrischer Stoff (z. B. Quarz, Bariumtitanat, Piezokeramik bzw. Nickel-Blechkpakete) durch elektrische, hochfrequente Wechselspannungen zu mechanischen Schwingungen unter Ausnutzung des Resonanzeffektes angeregt. Der Vorteil des Piezoeffekts bei der Ultraschallerzeugung in der Werkstoffprüfung besteht in den kleinen Abmessungen der Kristalle. [Fleischer, 2002]

4.6. Beschreibung der verwendeten Ultraschall-Apparatur

Für Ultraschall standen eine Vielzahl von Einzelkomponenten zur Verfügung, jedoch keine spezielle, marktübliche Apparatur. Deshalb mussten die in Frage kommenden Geräte für den speziellen Fall der Durchschallung von (historischem) Mauerwerk auf ihre Eignung getestet werden. Im folgenden wird die Auswahl der geeigneten Gerätekomponenten beschrieben.

Tabelle 4.3: Übersicht der verwendeten Prüfköpfe

Prüfköpfe	Durchmesser [mm]	Nominale Frequenz [kHz]	Rel. Bandbreite (-6 dB) [%]	Hersteller
G0,2R	56 (planar)	200 (85 kHz gewählt)	130	GE-Krautkrämer
G0,2GC	45 (planar)	200 (85 kHz gewählt)	120	GE-Krautkrämer
K0,1G	45 (planar)	100	ca. 25	GE-Krautkrämer
LD20	Punktkontakt	120	20	ACSYS
TD20 (Scherwellen)	Punktkontakt	50 (55 kHz gewählt)	63	ACSYS
SO202	28 (planar)	25	100	ACSYS
Exp02 (Exponentialhorn)	Punktkontakt	100	ungedämpft, schmalbandig	GE-Krautkrämer

4.6.1. Wahl der Prüfköpfe

Die Prüfköpfe wurden an der in Kap. 8.3.1 beschriebenen Mauerwerksprobekörper W2 und einem Referenzkörper aus Polyamid-6-Guss getestet. In der Tabelle 4.3 sind alle in Frage kommenden Prüfköpfe, die zur Verfügung standen, aufgelistet. Das Hauptkriterium für die Auswahl war ein gutes Signal-Rausch Verhältnis.

Die getesteten niederfrequenten Prüfköpfe können grob in Planare und Punktkontakt-Prüfköpfe eingeteilt werden. Sie wurden entweder von der Firma GE-Krautkrämer (Hürth, Deutschland) oder von ACSYS (Moskau, Russland) hergestellt.

Die meisten niederfrequenten modernen Prüfköpfe sind breitbandig. Sie können mit Rechteck-, Nadel- oder oszillierenden Pulsformen angeregt werden. Eines der wichtigsten Eigenschaften für die praktische Anwendung tomografischer Untersuchungen ist die Art der Ankopplung: Punktkontakt-Prüfköpfe sind wesentlich komfortabler in der Handhabung, da kein Koppelmittel benötigt wird. Andererseits sind deren Resultate derzeit nicht befriedigend, weil die Ankunft der erste Welle sehr schwach bis gar nicht sichtbar ist. Dies ist durch ein schlechtes Signal zu Rausch Verhältnis begründet (siehe Abb. 4.5 a), weshalb diese Prüfköpfe unter den gegebenen Randbedingungen nicht für Laufzeitmessungen geeignet sind. Die Scherwellenprüfköpfe erwiesen sich ebenfalls als ungeeignet, da sich die Scherwellen durch die geschichtete Struktur des Mauerwerks an den Grenzflächen in longitudinale Wellen umgewandelt haben. Die verfügbaren planaren Prüfköpfe wurden genauer untersucht, um die beste Kombination von Pulsform, Bandbreite, Frequenz und Koppelmittel zu finden.

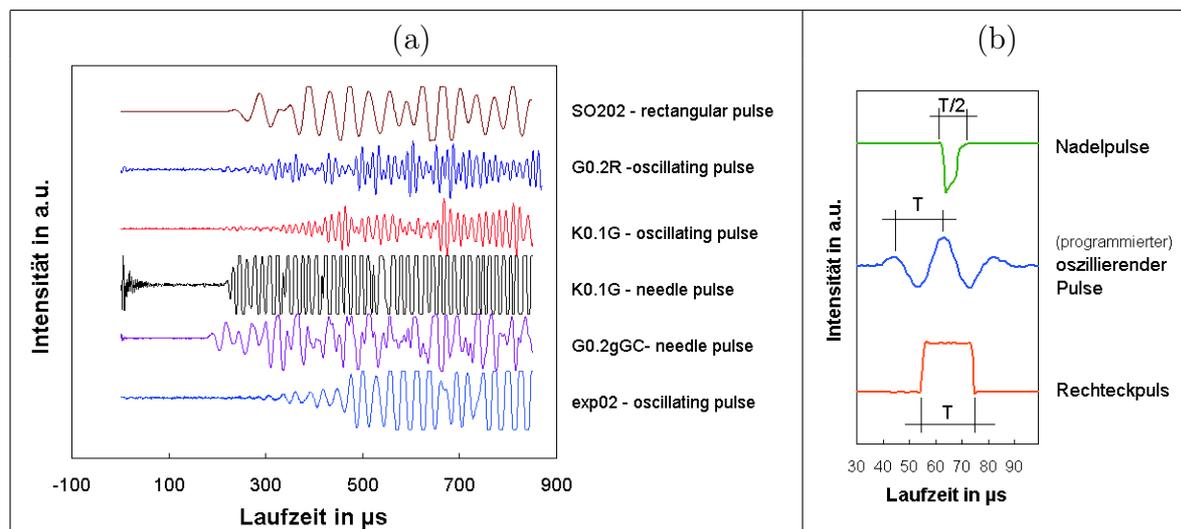


Abbildung 4.5: (a) Durchschallungskurven bei einem Winkel von 45° zwischen Sender und Empfänger am "W2" (Strahlenweg $s = 0,69$ m) für verschiedene Prüfköpfe und Pulsformen; (b) verwendete Pulsformen

Wie die Abb. 4.5 (a) zusehen ist, kann durch die Reduzierung der Frequenz der Ersteinsatzpunkt präziser bestimmbar werden. Von allen getesteten Prüfköpfen liefert der Prüfkopf SO202 mit einer Mittenfrequenz von 25 kHz die besten Ergebnisse. Vergleichbare Ergebnisse werden mit dem Prüfkopf G0,2gc mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz erzielt.

4.6.2. Wahl der Pulsform

Ein Signal kann mittels eines Impulses, eine langzeitige oder eine kurzzeitige Anregung ausgesendet werden, wie die Abb. 4.6 verdeutlicht. Um die Laufzeit eines Signals zu be-

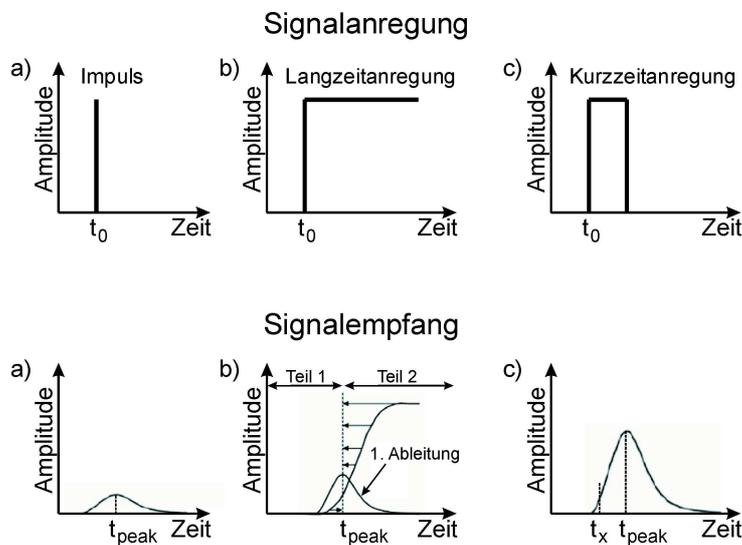


Abbildung 4.6: Mögliche Signalanregungen und deren Empfang

stimmen, muss entweder der Ersteinsatz oder das erste Maximum deutlich zu bestimmen sein. Das ist bei der kurzzeitigen Anregung der Fall. Die Form des Kurzzeitsignals kann beispielsweise rechteckig, nadelförmig oder oszillierend sein (siehe Abb. ??b). Bei der oszillierenden Pulsform erhofft man sich mittels einer Autokorrelation diese Form im empfangenen Signal wiederzuerkennen. Sie wird oft bei niederfrequenten Echo-Messungen angewendet. Dies erlaubt die Kontrolle der gewünschten Bandbreite des Prüfkopfes. Die folgende Pulsformen wurden getestet:

- Nadelpuls
- programmierter, oszillierender Puls
- Rechteckpuls

Der Vergleich der Messergebnisse mit verschiedenen Pulsformen in Abb. ?? (a) zeigt die besten Ergebnisse mit dem Nadel- und dem Rechteckpuls. Die oszillierende Form konnte nicht im Signal wiedererkannt werden.

4.6.3. Wahl des Koppelmittels

Für planare Prüfköpfe ist die Verwendung von Koppelmitteln unerlässlich. Glycerine und Vaseline werden oft für vertikale Flächen verwendet. Für horizontale Flächen kann auch Wasser tauglich sein. Allerdings ist auf Oberflächen von historischer Bedeutung wie z.B. bei Fresken das Auftragen von Koppelmittel oft nicht akzeptabel. Deshalb

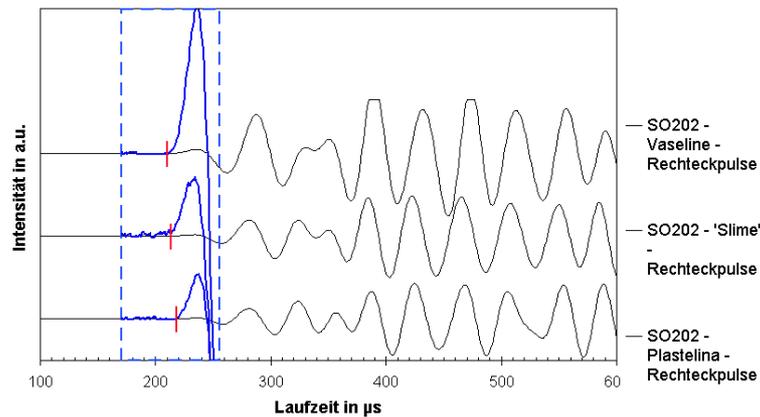


Abbildung 4.7: Untersuchung von Koppelmitteln in direkter Transmission ($s = 0,49 \text{ m}$)

wurden für vertikale Oberflächen zwei weitere Koppelmittel aus “den Kinderzimmern“ ins Labor geholt: Slime und Plastilina (Knete). Die Tests wurden am Probekörper W2 mit dem Prüfkopf SO202, angeregt mit einem Rechteckpuls, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.7 dargestellt. Die größte Intensität des Ersteinsatzes konnte mit Vaseline verzeichnet werden, aber auch die anderen Koppelmittel zeigen gute Resultate.

4.6.4. Ultraschallapparatur

Die verwendete Ultraschall-Durchschallungs-Apparatur wurde aus den Schlussfolgerungen der vorangegangenen Tests wie folgt zusammengestellt:

- Messcomputer: PC Pentium IV 1,8 GHz
- Funktionsgenerator: Agilent 33120 A (15 MHz Funktion, Arbitrary Waveform Generator)
- Messkarte: ist ein A/D Wandler mit integriertem Vorverstärker (HV1) und integriertem Empfangsverstärker (VV4) - Eigenbau
- Sendeimpulsgeber: Rechtecksender - Eigenbau
- Empfangsverstärker: Vorverstärker VV2 - Eigenbau
- Prüfköpfe: 2 planare Prüfköpfe der Firma Acsys/ACS (Acoustic Control Systems, Ltd.) “SO202“ (Prototyp) bzw. “SO205“ (Nachfolger) mit Mittenfrequenz 25 kHz

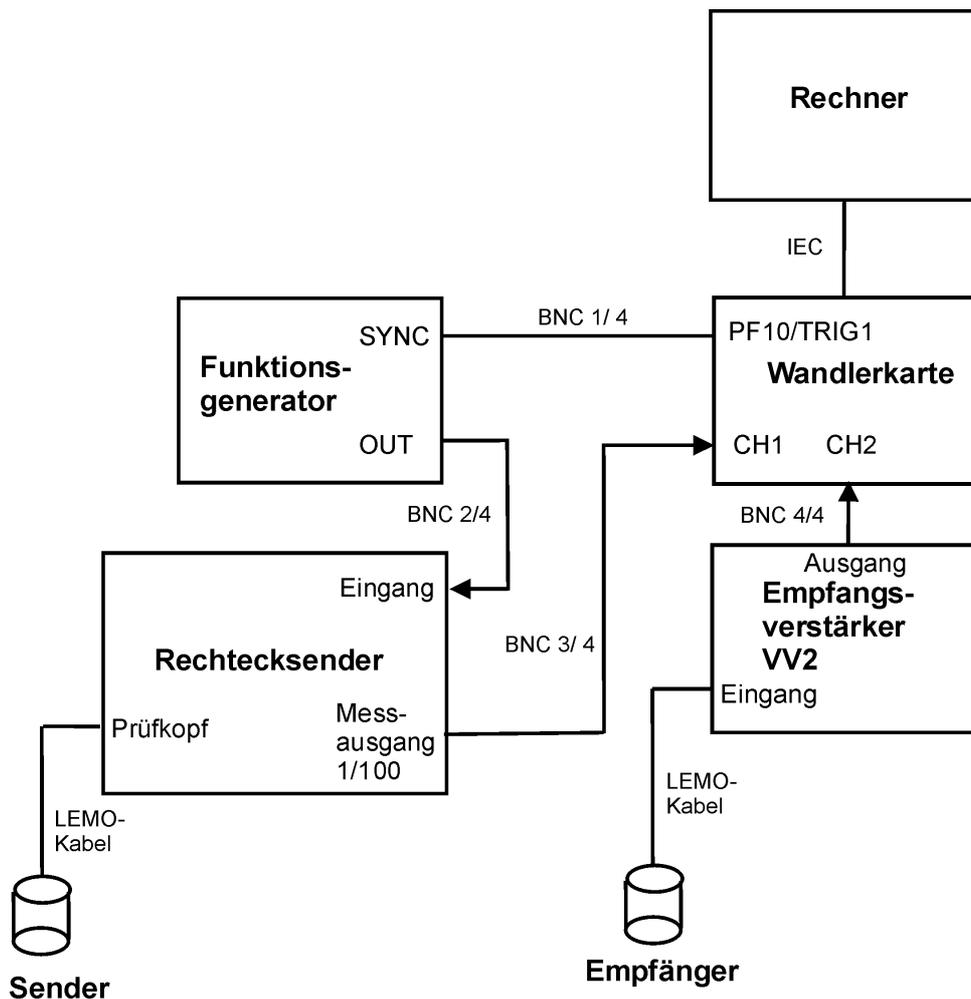


Abbildung 4.8: Geräteauswahl und Schaltbild der verwendeten Laufzeitapparatur

Die Messungen wurden mit der oben beschriebene Apparatur und den Prüfköpfe SO202 unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Amplitude (des generierten Pulses): 2 V
- Frequenz (des generierten Pulses): 25 kHz
- Wiederholrate (des generierten Pulses): 20 Hz
- Pulsform (des generierten Pulses): Rechteck
- Vorverstärkung (VV2): 1000-fach
- Datenpunkte/Kurve: 1000
- Abtastrate: 1 MHz (Datenpunkte und Abtastrate ergibt Zeitachse (x-Achse) von 0-1000 μs)
- Mittelung je A-scan: 10 (d.h. die Mittelung aus 10 Kurven ergibt einen A-scan)

5. Elektromagnetische Wellen

5.1. Wellentheorie

Elektromagnetischer Felder breiten sich in endlicher, allseitiger Richtung und hoher Geschwindigkeit aus. Die veränderlichen elektrischen und magnetischen Felder sind unlösbar miteinander verknüpft. Man bezeichnet das sich ausbreitender elektromagnetische Wechselfeld auch als elektromagnetische Welle, da wie bei mechanischen Wellen Energie übertragen wird und Erscheinungen wie Beugung, Reflexion, Brechung, Streuung und Interferenzen auftreten können. Im Gegensatz zu mechanischen Wellen können sich elektromagnetische Wellen ohne stoffliche Träger ausbreiten. Im Vakuum breitet sich die Welle mit Lichtgeschwindigkeit aus und ist unabhängig von ihrer Frequenz. In jedem anderen Medium ist jedoch die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Absorption elektromagnetischer Wellen stark frequenzabhängig [Knödel, 1997]. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen erfolgt als Transversalwelle.

Schon 1868 sagte der englische Physiker JAMES CLERK MAXWELL das Vorhandensein von elektromagnetischen Feldern, mit denen eine Übertragung elektromagnetischer Energie in den Raum verbunden sei, voraus. Nach der Maxwell-Gleichung ist die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes stets mit der räumlichen Änderung des Magnetfeldes verbunden. Gleichfalls ist die zeitliche Änderung des Magnetfeldes mit der räumlichen Änderung des elektrischen Feldes verbunden. Die vier Maxwellschen Gleichungen beschreiben die Ursache, Wirkung, Wechselwirkung und zeitliche Abhängigkeit elektromagnetischer Felder [Knödel, 1997]. Weiterhin werden zur Beschreibung des Verhaltens von elektrischen und magnetischen Feldern in Materialien (nicht im Vakuum) die drei Konstitutiven Gleichungen (auch Zustands-Gleichungen genannt) benötigt [Parnadi, 2001].

Aus diesen Gleichungen folgen die Telegraphengleichungen, die als Grundgleichungen der Wellenausbreitung gelten. Sie beschreiben die Ausbreitung elektrischer und magnetischer Felder in leitenden und dielektrischen Medien.

Für die elektrische Feldstärke E ergibt sich:

$$\Delta E - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (5.1)$$

und für die magnetische Feldstärke:

$$\Delta H - \sigma \mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (5.2)$$

Es bedeuten:

Δ	-	Laplace-Operator
σ	-	elektrische Leitfähigkeit
ε_0	-	Dielektrizitätskonstante im Vakuum ($8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)
ε_r	-	relative Dielektrizitätszahl
μ_0	-	magnetische Permeabilität im Vakuum ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$)
μ_r	-	relative magnetische Permeabilität
t	-	Zeit

Die Materialparameter σ , ε_r und μ_r sind von verschiedenen physikalischen Größen wie Frequenz f , elektrische Feldstärke E oder magnetische Induktion B , Ort x , Zeit t , Temperatur T und Druck p abhängig.

5.2. Prinzip des Radarverfahrens

Das Radarverfahren (siehe S.150) ist ein elektromagnetisches Impulsverfahren [Daniels, 1996]. Die Aussendung von Impulsen erfolgt mit einer Impulsweite zwischen 0,5 ns und 200 ns und mit einer Amplitude von 20 - 5000 V. Die Wiederholfrequenz kann mehr als 100 kHz betragen [DGZfP, 2005].

Die kurzen elektromagnetischen Impulse werden von der Oberfläche in das zu untersuchende Medium abgestrahlt. Dabei können die Wellen an Schichtgrenzen mit sprunghaften Änderungen der elektrischen Eigenschaften reflektiert, gebeugt, gebrochen, gestreut und absorbiert werden. Entsprechend der gewählten Messanordnung, wird die reflektierte oder transmittierte Welle wieder empfangen. Dabei werden die Laufzeiten und die Amplituden der elektrischen Feldstärke E aufgezeichnet.

Die Wellenausbreitung in einem Medium wird vorrangig beeinflusst von der Dielektrizitätszahl ε , der Leitfähigkeit σ und der magnetischen Permeabilität $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$. Die komplexe Dielektrizitätszahl ε setzt sich aus dem Produkt der elektrischen Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8,8544 \times 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$ und der komplexen, relative Dielektrizitätszahl ε_r zusammen.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (5.3)$$

Die komplexen Dielektrizitätszahl, auch relative Dielektrizitätskonstante genannt, berechnet sich aus:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \quad (5.4)$$

Für die meisten geologischen sowie für viele im Bauwesen verwendete Materialien kann die relative magnetische Permeabilität μ_r vernachlässigt werden ($\mu_r \cong 1$, $\mu \cong \mu_0$)

[DGZfP, 2005; Knödel, 1997]. Wie schon im vorangegangenen Abschnitt 5.1 erwähnt wurde, kann die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen mit Hilfe der Maxwell-Gleichung beschrieben werden. Für eine ebene Welle im homogenen, isotropen Medium lautet die Lösung der Gleichungen 5.1 und 5.2:

$$E(t, z) = E_0 e^{(i\omega t - \gamma z)} \quad \text{in } Vm^{-1} \quad (5.5)$$

mit:

- ω - Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$
- t - Laufzeit
- γ - komplexe Ausbreitungskonstante $\gamma = \alpha + i\beta$
- α - Absorptionsfaktor $\alpha = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\varepsilon'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}$
- α' - Absorptionskoeffizient $\alpha' = 8,686 \alpha$
- β - Phasenkonstante $\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\varepsilon'_r}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)}$
- c_0 - Vakuum-Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$
- δ - Verlustwinkel $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon'}$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v (= Phasengeschwindigkeit $v_{Phase} = v$) der Radarwelle kann aus dem Abstand der Flächen konstanter Phasen zu $v = \lambda f$ (in m/ns) mit der Wellenlänge $\lambda = 2\pi/\beta$ (in m) berechnet werden [Knödel, 1997]. Aus der Laufzeit und der dazugehörigen Ausbreitungsgeschwindigkeit v kann man über die bekannte Beziehung $v = s/t$ den Laufweg der Welle (z.B. bei Reflexion Tiefenlage des Reflektors) bestimmen. Für den Fall, dass $\tan \delta$ vernachlässigbar klein ist ($\tan \delta \ll 1$), d.h. dass es sich um ein verlustarme Medien handelt [Knödel, 1997], ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v \approx \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon'_r}}, \quad (5.6)$$

In der Tabelle 5.1 sind einige speziell für das Bauwesen relevanten Werte für die relative Dielektrizitätszahl ε'_r (Realteil), die Leitfähigkeit σ , die Ausbreitungsgeschwindigkeit v und den Absorptionskoeffizienten α' aufgeführt [DGZfP, 2005; Knödel, 1997].

Tabelle 5.1: Dielektrizitätszahl, Leitfähigkeit, Geschwindigkeit und Dämpfung bei 100 MHz, Werte für Eis bei 60 MHz ermittelt nach [Knödel, 1997]

Material	ϵ'_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α' (dB/m)
Luft	1	0	0,2998	0
Eis	3,18	0,01	0,168	0,02
Süßwasser	80	0,5	0,033	0,1
Salzwasser	80	30000	0,01	1000
Sandstein (trocken)	3 - 5	$< 10^{-3}$	0,15	...
Sandstein (feucht)	5 - 10	0,01 - 1	0,11	...
Kalkstein	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Schiefer	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Granit	4 - 8	0,01 - 1	0,12	0,01 - 1
Ziegel (trocken)	4 - 8	$< 10^{-3}$	0,12	...
Ziegel (feucht)	8 - 12	0,01	0,09	...
Holz	2 - 7			
Holz (darrtrocken)	2 - 3,5			

5.3. Radarapparatur

Für die Radaruntersuchung konnte auf das bestehende, marktübliche Radarsystem SIR 10A und 20 der amerikanischen Firma GSSI Geophysical Survey Systems Inc. (Salem, USA) zurückgegriffen werden. Das Impuls-Radar-Gerät besteht im Wesentlichen aus einem Pulsgenerator, einem auswechselbaren Antennensystem, Vorverstärker, Analog/Digital-Wandler und einem Controller zur Steuerung dieser Baugruppen (siehe Abb. 5.1). Dieser ist in einem Computer integriert, mit dessen Hilfe Messdaten visualisiert und bearbeitet werden können. Zur Positionierung wird entweder ein Laufrad oder ein Marker verwendet. Es kamen die 900 MHz und 1,5 GHz Schmetterlingsantennen der gleichen Firma zur Anwendung.

Einige Ergebnisse, die im Rahmen des EU-Projektes "ONSITEFORMASONRY" [Maierhofer, 2006] stattfanden, wurden mit dem RAMAC System, der neu entwickelten 1,6 GHz Antenne und dem neuen Positionierungssystem von MALA verglichen.

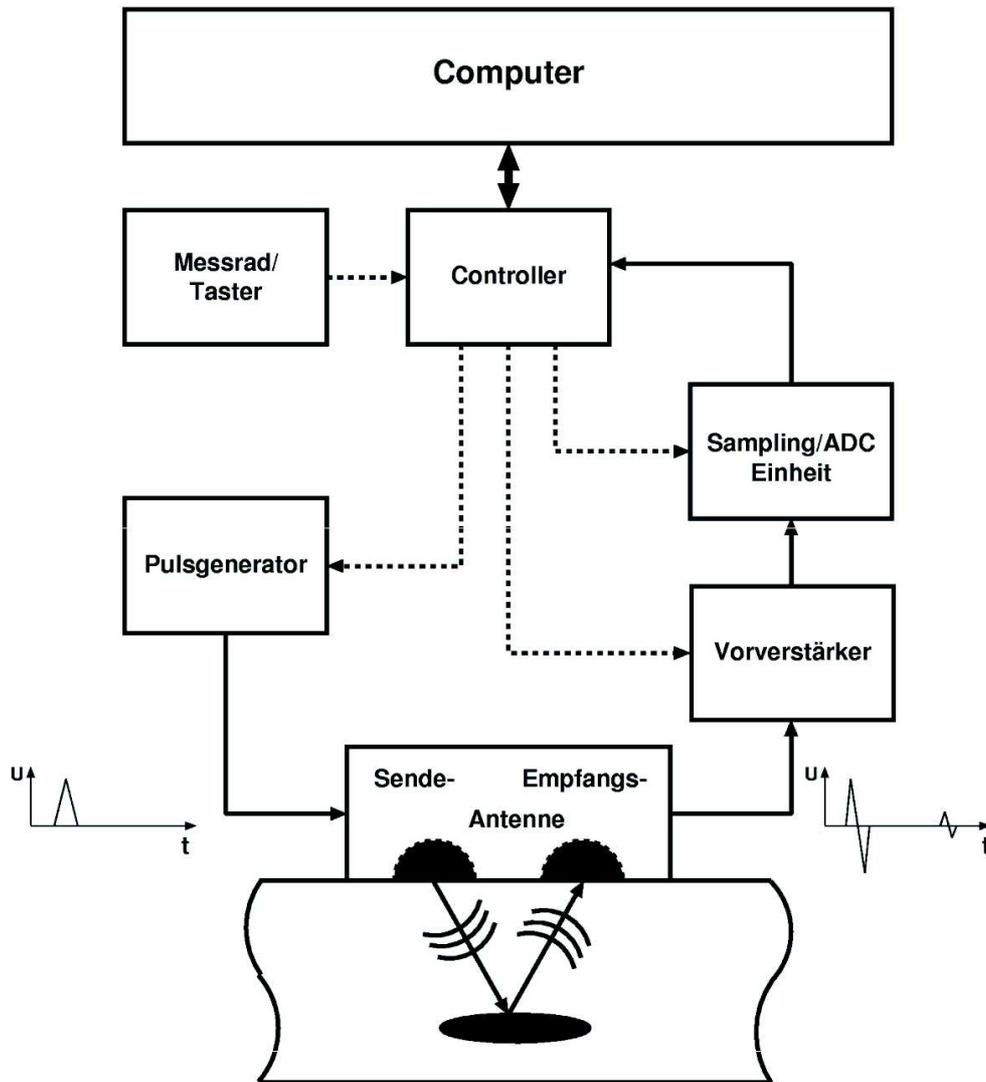


Abbildung 5.1: Prinzipieller Aufbau des Radargerätes von GSSI - Geophysical Survey Systems Inc.

6. Messanordnung der Sender und Empfänger auf der Bauteiloberfläche

Reflexion (siehe Kap. 4.3): Sender und Empfänger befinden sich auf der gleichen Seite des zu untersuchenden Objektes. Der Empfänger erfasst den Anteil der Welle, der in seine Richtung reflektiert wurde (siehe Abb. 6.1).

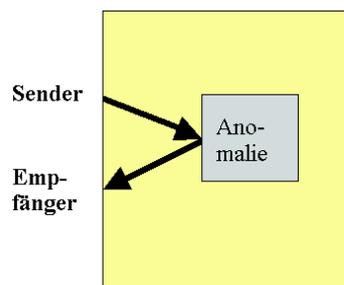


Abbildung 6.1: Echo

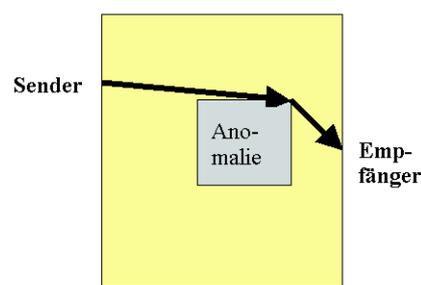


Abbildung 6.2: Transmission

Der Begriff **Transmission** (von lat. *trans* = hinüber und *mittere* = schicken) bedeutet Hinüberschicken (siehe Abb. 6.2). Die Transmission ist in der Physik eine Größe für die Durchlässigkeit eines Mediums für Wellen. Trifft eine sich im Medium A bewegende Welle auf ein Medium B endlicher Dicke, so wird sie je nach den Stoffeigenschaften des Hindernis zum Teil an den Grenzflächen reflektiert und beim Durchqueren absorbiert. Der Transmissionsgrad τ ist definiert als der Quotient zwischen der Wellenintensität oder der Schallintensität I_0 vor dem Hindernis und der Intensität I hinter dem Hindernis:

$$\tau = \frac{I}{I_0} \quad (6.1)$$

Der Transmissionsgrad ist somit ein Maß für die “durchgelassene“ Intensität und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Mit dem Reflexionsgrad r als Maß für die reflektierte Intensität, dem (hier dimensionslosen) Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ als Maß für die absorbierte Intensität oder dem Dissipationsgrad δ als Maß für die dissipierte, also vom Material abgeleitete Intensität kann folgende Leistungsbilanz aufgestellt werden:

$$1 = r + \bar{\alpha} \quad \text{bzw.} \quad 1 = r + \delta + \tau \quad (6.2)$$

6. Messanordnung der Sender und Empfänger

Der Transmissionsgrad ist u.a. abhängig von der Wellenlänge und somit von der Frequenz des Schalls oder der elektromagnetischen Welle bzw. von der Farbe des Lichtes, sowie vom Einfallswinkel der Welle.