

# 10. Schlussfolgerung

In den Abbildungen 10.1 bis 10.3 sind alle im Kap. 9 beschriebenen Messergebnisse zusammengefasst. Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Anomalien sind nur bestimmbar, wenn sich die elektromagnetischen bzw. akustischen Eigenschaften von denen der Umgebung unterscheiden, d.h. wenn die Änderungen der diesbezüglichen Kennwerte eine Laufzeitveränderung bewirken.
- Die Größe der Laufzeitdifferenz wird bestimmt von den Abmaßen der Anomalie und dem Kontrast der Eigenschaften zwischen Anomalie und umgebenden Material.
- Sie sollte größer als der Messfehler sein.
- Die Art der Anomalie ist durch einen Vergleich der Ultraschall- und Radarmessergebnisse nach folgendem Schema feststellbar:

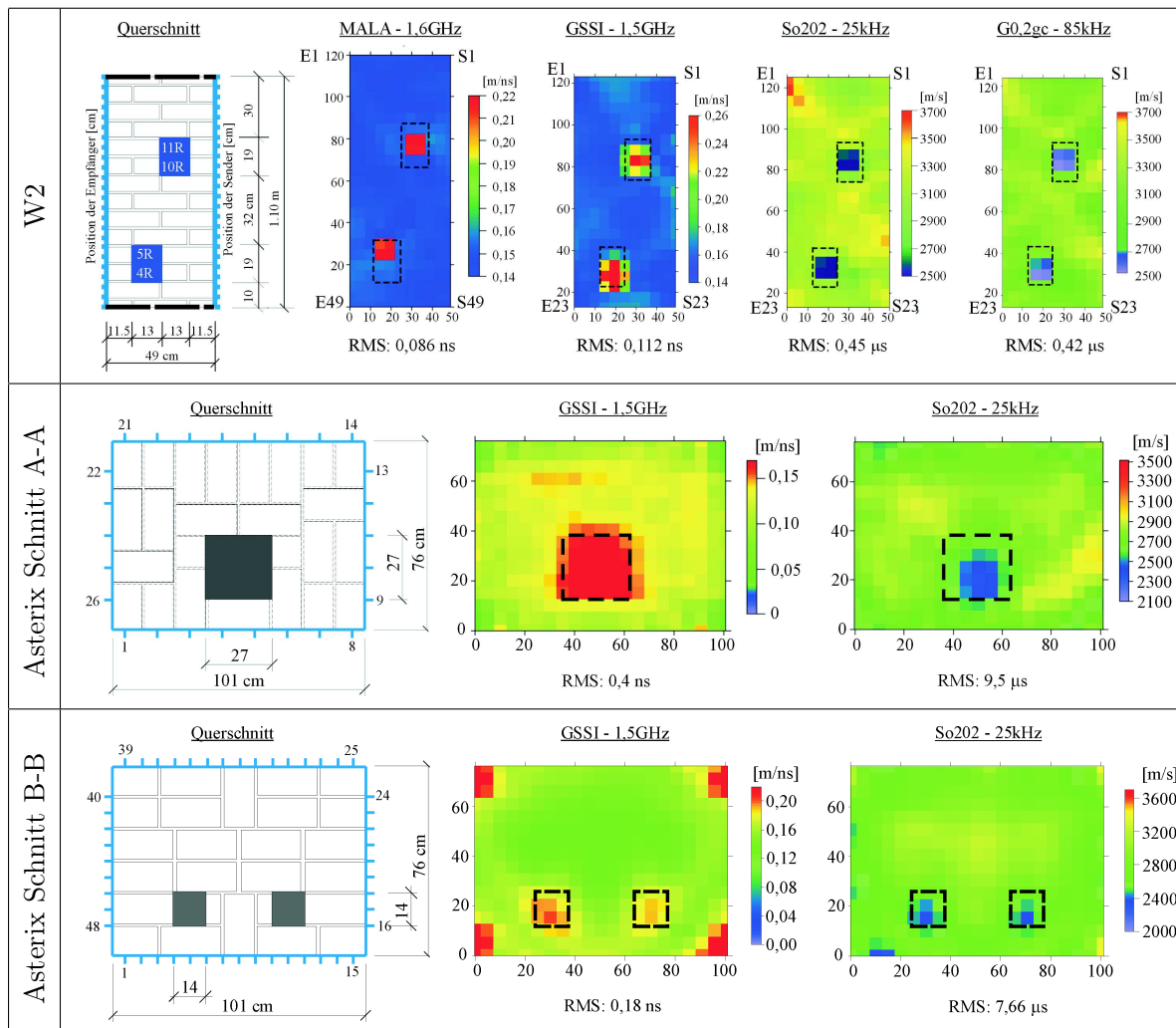
**Tabelle 10.1:** Bestimmung der Art der Anomalie

	<b>Ultraschall</b>	<b>Radar</b>	<b>Art der Anomalie</b>
1	Niedriggeschwindigkeitszone	Hochgeschwindigkeitszone	z.B. Luft; Holz (trocken)
2	Hochgeschwindigkeitszone	Niedriggeschwindigkeitszone	z.B. Granit; Metall
3	Niedriggeschwindigkeitszone	Niedriggeschwindigkeitszone	z.B. Holz (feucht); poröses, feuchtes Gestein

- Die im Tomogramm ermittelte Geschwindigkeit einer Anomalie entspricht nicht ihrer realen Geschwindigkeit.
- Die gewählte Messanordnung ist richtungsweisend für das Messergebnis. Bereiche mit hoher Strahlenüberdeckung aus unterschiedlichen Richtungen sind besser rekonstruierbar als andere.
- Das Ergebnis lässt sich qualitativ durch das Signal-Rausch-Verhältnis beurteilen.

## 10. Schlussfolgerung

- Die Größe der Anomalien kann näherungsweise mit Hilfe des Signal-Rausch-Verhältnisses, Schnitten durch das Tomogramm und die tomografische Rekonstruktion bestimmt werden. Eine Aussage über ihre Form ist nur eingeschränkt möglich.
- Die Abstrahlcharakteristik der Sender sowie die Auswirkung der Fresnelzone bewirken eine Verschlechterung der Signalqualität mit zunehmendem Winkel zwischen Sender und Empfänger sowie deren Entfernung voneinander.



**Abbildung 10.1:** Ergebnisse der Untersuchungen von luftgefüllten Anomalien mit Radar und Ultraschall

Die Auflösung eines Objektes ist abhängig von der Fresnelzone (siehe S.150), der Wellenlänge ( $\lambda/4 \dots \lambda/2$  d.h. ca. 3-5 cm), von Abstand der Sender bzw. Empfänger, der Diskretisierung (Elementgröße  $\geq$  Quellabstand) und der Messgenauigkeit der Appara-

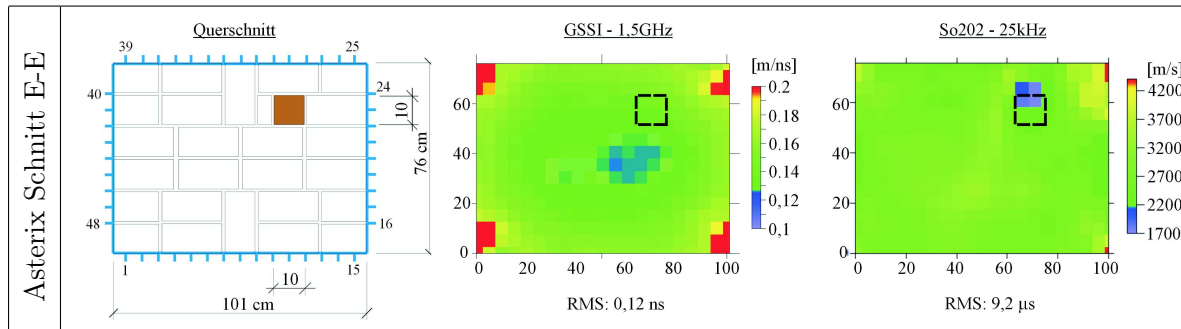


Abbildung 10.2: Ergebnisse der Untersuchungen eines Holzeinschlusses mit Radar und Ultraschall

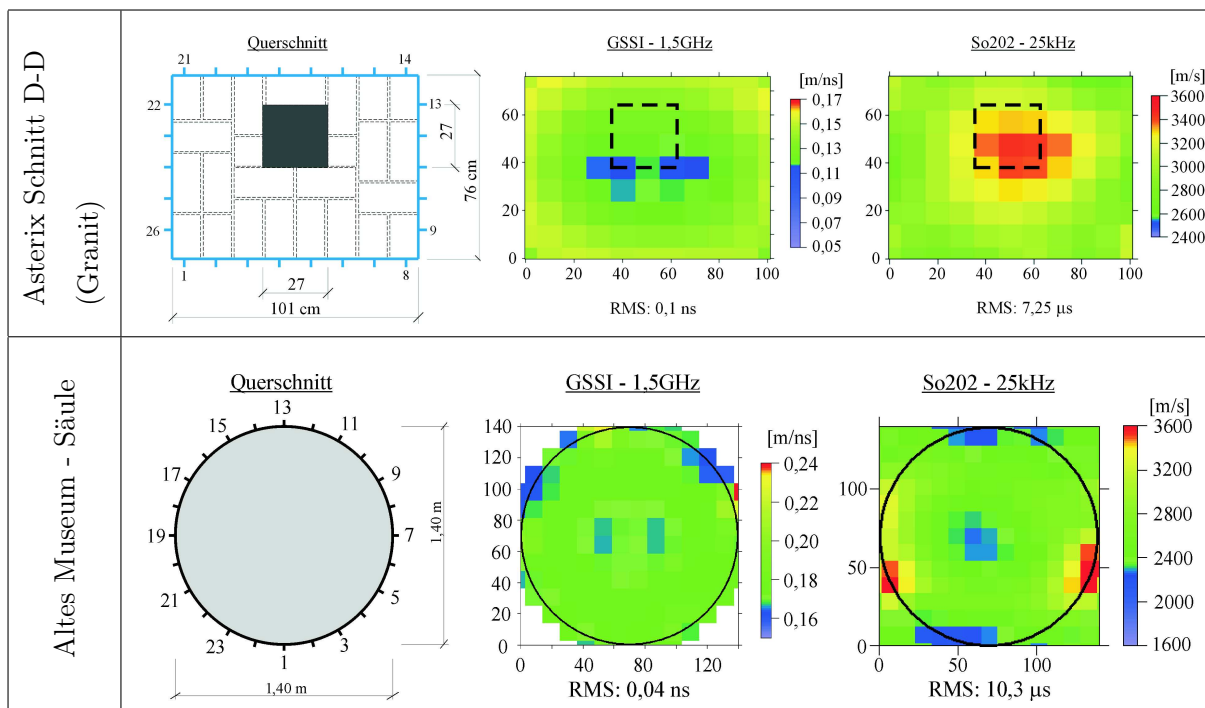


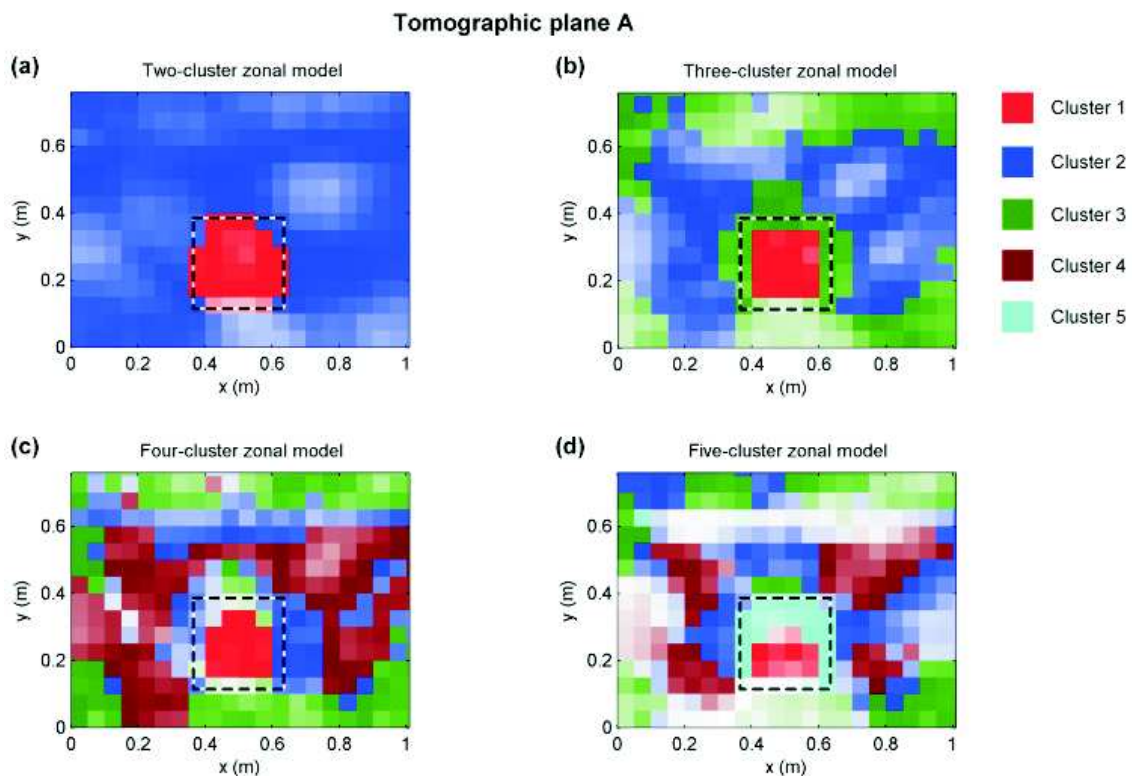
Abbildung 10.3: Ergebnisse der Untersuchungen von Anomalien mit Radar und Ultraschall

tur. Der Wert liegt für Ultraschall bei mindestens  $5 \mu s$ , was in Mauerwerk ca. 1,5 cm entspricht. Für Radar liegt die Messgenauigkeit bei mindestens 0,15 ns. Das entspricht ca. 2,3 cm in Mauerwerk. Demnach können Anomalien 5 cm theoretisch aufgelöst bzw. geortet werden. Dies ist jedoch von der Datenqualität und dem Kontrast zwischen den Materialien abhängig.



# 11. Ausblick

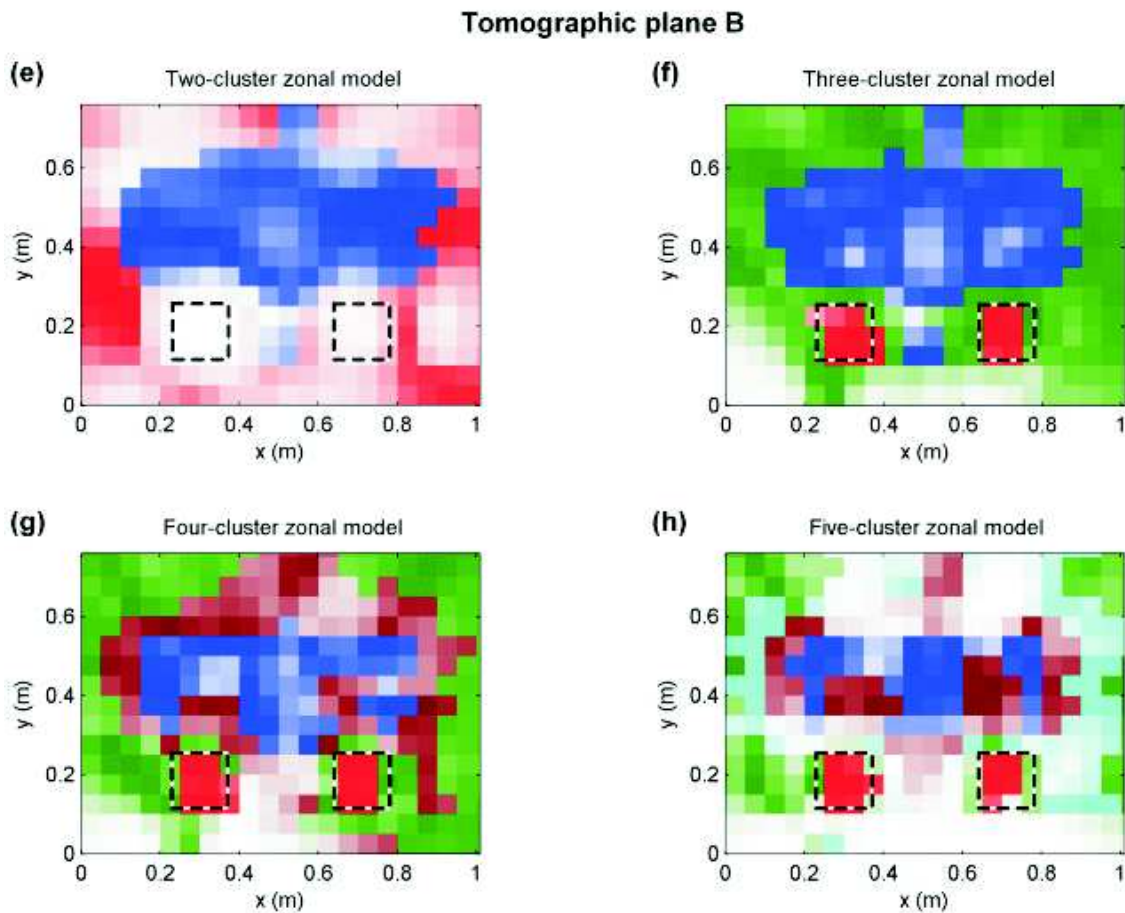
Die Verfahren Radar und Ultraschall ergänzen sich hervorragend. Zur Verbesserung der Datenqualität und Zuverlässigkeit der Auswertung sowie deren anschließender Interpretation, ist eine quantitative Kombination wünschenswert. Die effizienteste Möglichkeit, den Informationsgehalt der einzelnen Datensätze quantitativ zusammenzufassen, besteht in der Integration der gesammelten Datensätze vor oder während des Rekonstruktionsprozesses durch gemeinsame Inversion aller Datensätze.



**Abbildung 11.1:** Ergebnis der gemeinsamen Inversion von zwei Datensätzen (Ultraschall und Radar) gemessen an Asterix, Schnitt A-A für eine verschiedene Anzahl an Clustern

Die jüngsten Forschungen im Bereich der Geophysik beschäftigen sich mit der gemeinsamen Inversion von unterschiedlichen Datensätzen [Paasche, 2006a, 2007]. Sie basiert auf der Kombination konventioneller Inversionsalgorithmen (“regularized least squares

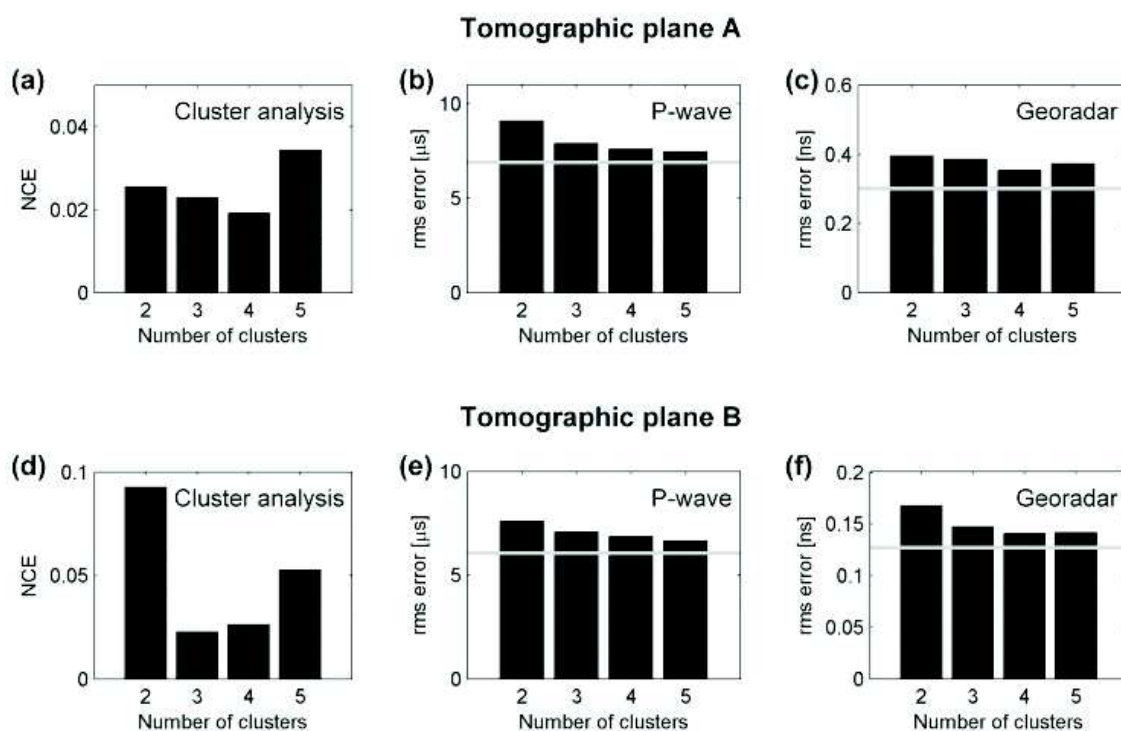
inversion'für die Inversion der einzelnen Datensätze) mit fuzzy c-means Clusteranalyse [Höppner, 1999]. Das ist eine statistische Methode, die die einzelnen Datensätze in eine vorher festgelegte Anzahl von Teildaten (sogenannte Cluster) gruppiert. Anders ausgedrückt: jeder Datensatz wird zuerst separat in die gleiche Gruppenanzahl zerlegt. Somit trägt nun jeder Datenwert die Information über seine  $x,y,(z)$ -Position und seine Cluster-Zugehörigkeit. Es folgt die Vereinigung der Datensätze und die gemeinsam Inversion. Danach können die Datensätze problemlos wieder voneinander getrennt werden. Hierfür muss die Cluster-Zuordnung durch die dazugehörige Geschwindigkeit ersetzt werden.



**Abbildung 11.2:** Ergebnis der gemeinsamen Inversion von zwei Datensätzen (Ultraschall und Radar) gemessen an Asterix, Schnitt B-B für eine verschiedene Anzahl an Clustern

Die optimale Anzahl der Cluster ist jedoch vorher unbekannt. Um diese zu Bestimmen wird die normalisierte Klassifikationsentropie (“normalized classification entropy“ ... NCE) berechnet [Paasche, 2006b]. Das ist eine Hilfsgröße, um die “Unordnung“ in einem System statistisches zu beschreiben. Für die optimale Anzahl an Clustern erreicht NCE ein Minimum.

An der Universität Potsdam wurde an Hand von zwei Beispielen eine gemeinsame Inversion von Ultraschall und Radar Daten von Herrn Prof. Dr. Tronicke und Herrn Dr. Paasche durchgeführt. Diese Daten rühren aus den bereits beschriebenen Messungen am Laborprüfkörper Asterix, Schnitt A und B her. Die Ergebnisse der getrennten Inversion wurden bereits in der Abb. 10.1 dargestellt. Die Ergebnisse der gemeinsamen Inversion für zwei, drei, vier und fünf Cluster sind für den Schnitt A-A in Abb. 11.1 und für den Schnitt B-B in Abb. 11.2 zusammengestellt. Für den Schnitt A-A wird der kleinste NCE-Wert bei vier Clustern (siehe Abb. 11.3) erreicht und liefert somit das optimale Ergebnis. Für den Schnitt B-B sind drei Cluster zur optimalen Rekonstruktion des untersuchten Querschnitts ausreichend.



**Abbildung 11.3:** Das NCE-Diagramm (“normalized classification entropy“) und die RMS-Diagramme für Radar und Ultraschall für verschiedene Anzahlen an Clustern

Um die Methode der tomografischen Rekonstruktion außerhalb der Forschung einzusetzen, müssen die manuellen Bearbeitungszeiten reduziert werden. So erwies sich die Messwertaufnahme der Ultraschalluntersuchungen als sehr zeitaufwendig. Letzte Forschungen auf dem Gebiet der Ultraschall-Gerätekonstruktion befassen sich mit der Entwicklung von berührungslosen Verfahren wie Luftultraschall. Seit einigen wenigen Jahren sind bereits solche Geräte auf dem Markt vorhanden. Derzeit laufen in der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) Untersuchungen zu deren Einsatzmöglichkeiten. Mit Hilfe solcher Verfahren lassen sich die Messzeiten reduzieren und

automatisieren. Ein weiterer Vorteil berührungsloser Verfahren ist die Unversehrtheit der Oberfläche. Das ist besonders wichtig für gestaltungsreiche Wände von historischen Gebäuden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Laufzeiten noch manuell bestimmt. Es existieren eine Vielzahl geeigneter Algorithmen um diese zu automatisieren. So wäre eine Übertragung der Erkenntnisse aus dem Bereich der Geophysik sinnvoll wie z.B. in [Brauchler, 2003; Kurz, 2003a,b] beschrieben.



## 12. Zusammenfassung

Oft werden für die Sanierung von Bauwerken Informationen über die innere Struktur, Belastungszustände, Feuchte- und Salzgehalte benötigt. Die Untersuchung mit zerstörungssarmen und -freien Methoden minimieren die dazu nötigen Eingriffe. Ebenfalls lassen sich damit Prozesse beobachten. Um diese speziellen Aufgaben zu lösen ist bereits der Einsatz von Radar und Seismik in Reflexion Stand der Technik. Oft sind die Ergebnisse einer Reflexionsmessung für einen Laien selbst mit einer Erläuterung von Experten schwer verständlich. Weiterhin können damit Tiefenlagen, insbesondere hinter Objekten, die eine abschattende Wirkung haben, schwierig bis gar nicht ermittelt werden. In einigen Fällen können keine Ergebnisse mit dem Reflexionsverfahren erzielt werden, da die Welle das Objekt zweimal und zwar vom Reflektor und zurück durchlaufen muss. Die Vorzüge von Transmissionsmessungen und deren tomografischen Rekonstruktionen sind die Bestimmung von Tiefenlagen, eine höhere Auflösbarkeit, bessere Interpretierbarkeit, einmaliges Durchlaufen der Welle und verständlichere Visualisierung.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der tomografischen Rekonstruktion von Ultraschall- und Radar-Transmissionsmessungen an Mauerwerk. Das Ziel bestand im Aufbau einer Messapparatur, deren Fehlerbestimmung, der Übertragung der Rekonstruktionstechnik von der Geophysik auf das Bauwesen, eine qualitativen Datenkontrolle sowie die Bestimmung von Materialeigenschaften. Ebenfalls sollten die Grenzen und Möglichkeiten dieser Visualisierungstechnik ausgelotet werden.

Für den speziellen Fall der Durchschallung von (historischem) Mauerwerk mit Ultraschall standen keine spezielle, marktübliche Apparatur zur Verfügung. Sie wurde aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten entwickelt. Deshalb mussten die in Frage kommenden Geräte auf ihre Eignung getestet werden. Die besten Ergebnisse konnten mit Prototypen neuentwickelter Prüfköpfe bei einer Sendefrequenz von 25 kHz erzielt werden. Die Auswahl von marktüblichen Prüfköpfen in diesem für Ultraschall niedrigem Frequenzbereich war sehr begrenzt. Für die Radaruntersuchung konnte auf das bestehende, marktübliche System SIR20 der amerikanischen Firma GSSI Geophysical Survey Systems Inc. zurückgegriffen werden. Die Frequenzen der verwendeten Radarantennen lag bei 900 MHz und 1,5 GHz.

Weiterhin wurde die verschiedenen Einflüsse auf die Laufzeit untersucht. Mit Hilfe der 6M-Methode können die Einflüssen in Maschine (Hard- und Software), Methode (Messdurchführung und Auswertung), Material (Material- und Struktureigenschaften),

Milieu, Mensch, Management zusammengefasst werden. Die Bestimmung der Messfehler erfolgte an Laborprobekörpern. Für die Ultraschalluntersuchungen liegt dieser bei ca. 4-5  $\mu s$  und bei der Radarmessungen bei ca. 0,15 ns.

Die Laufzeiten der ersten Welle wurden mit dem Tomografieprogramm "GeoTom", das auf der Grundlage des SIRT-Algorithmus arbeitet, rekonstruiert. Um die Qualität einer tomografischen Rekonstruktion zu kontrollieren, wird in dieser Arbeit ein Ablauf zur Kontrolle der gemessenen und rekonstruierten Daten vorgestellt. Zuerst findet eine Voruntersuchung, Ermittlung der optimalen Messgeometrie und eine Simulation des Querschnitts statt. Dann werden die gemessenen Laufzeiten auf mögliche systematische Fehler überprüft. Weiterhin wird das Startmodell, das Diskretisierungsnetz und das Abbruchkriterium für die iterative Rekonstruktion definiert. Es folgt eine Überprüfung der Stabilität der tomografischen Berechnung. Um detailliertere Rekonstruktionsbilder zu erhalten, kann eine Auswahl von Teildatensätzen und die Anpassung des Startmodells vorteilhaft sein.

Die Messungen wurden an den Laborprobekörpern W2, Asterix I und Asterix II sowie an einem realen Bauwerk, dem Alten Museum in Berlin, durchgeführt. Die untersuchten Querschnitte beinhalteten Anomalien bestehend aus Luft, Granit, Holz und Mörtel. Die Abmaße der Anomalien lagen zwischen 10-27 cm bezogen auf eine Querschnitt von 0,76x1,0 m.

Aus den Simulationen und Messungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten: Die Rekonstruktion liefert nur für eine vollständige Strahlenüberdeckung ein realistisches Abbild. Ist das nicht möglich, dann verschmieren die Anomalien. Das führt zu undeutlicheren Abbildern. Weiterhin treten aufgrund der gewählten Messgeometrie und von Inhomogenitäten Schattenzonen auf, die man in Form von Artefakten wiedererkennt.

Die Größe der Anomalien kann näherungsweise mit Hilfe des Signal-Rausch-Verhältnisses, Schnitten durch das Tomogramm und die tomografische Rekonstruktion bestimmt werden. Jedoch ist dies abhängig von der Messgeometrie. Eine Aussage über ihre Form ist nur eingeschränkt möglich. Weiterhin sind Anomalien nur bestimmbar, wenn sich die elektromagnetischen bzw. akustischen Eigenschaften von denen der Umgebung unterscheiden, d.h. wenn die Änderungen der Kennwerte eine Laufzeitveränderung bewirken. Diese Laufzeitdifferenz sollte größer oder gleich dem Messfehler sein. Die Größe der Laufzeitdifferenz wird bestimmt von den Abmaßen der Anomalie und dem Kontrast der Eigenschaften zwischen Anomalie und umgebenden Material. Vergleicht man die Ergebnisse der Ultraschall- und Radaruntersuchungen miteinander, kann man auf die Art der Anomalie schließen.

Die Auflösung eines Objektes ist abhängig von der der Fresnelzone, der Wellenlänge ( $\lambda/4 \dots \lambda/2$  d.h. ca. 3-5 cm), von Abstand der Sender bzw. Empfänger, der Diskretisierung (Elementgröße  $\geq$  Quellabstand) und der Messgenauigkeit der Apparatur. Der Wert liegt für Ultraschall bei mindestens 5  $\mu s$ , was in Mauerwerk ca. 1,5 cm entspricht.

Für Radar liegt die Messgenauigkeit bei mindestens 0,15 ns. Das entspricht ca. 2,3 cm in Mauerwerk. Demnach können Anomalien 5 cm theoretisch aufgelöst bzw. geortet werden.

In den Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, konnten Hohlstellen bis zu einer Größe von ca 10x10 cm für einen Querschnitt von ca. 1,0x0,8 m geortet werden.



# Begriffsdefinitionen

**Artefakt** = Phantombild. Es bezeichnet eine nicht real vorhandene Inhomogenität im Tomogramm und ist eine Folgeerscheinung der Rekonstruktion. Alle Rekonstruktionsalgorithmen können Artefakte verursachen.

**Dispersion** ist die Abhängigkeit einer Größe (hier die Ausbreitungsgeschwindigkeit) von der Wellenlänge. Phasen- und Gruppengeschwindigkeit sind ungleich voneinander.

**Dissipation** ist die Umwandlung einer beliebigen Energieform in thermische Energie. Beispielsweise ist die gedämpfte Schwingung ein dissipatives System.

**Eikonalgleichung** (altgriechisch = Bild, Abbild) Mit diesem Begriff wird meist das Bruns-Eikonal bezeichnet. Das ist diejenige Funktion, die mittels des Fermat'schen Prinzips den kürzesten Weg zwischen zwei durch optische Medien getrennte Punkte, beschreibt. Das Bruns-Eikonal wird zur Berechnung der Ausbreitung seismischer Wellen verwendet.

**Fermat'sche Prinzip** besagt, dass ein Strahl zwischen zwei Punkten A und B immer so verläuft, dass er dazu die möglichst kürzeste Zeit braucht.

Das Prinzip des kürzesten Lichtweges war schon seit der Antike bekannt. Fermat erweiterte es auf die Brechung und fand damit einen wichtigen Baustein für die Entwicklung der Variationsrechnung. Das Fermat'sche-Prinzip in seiner allgemeinen Form ist ein Variationsprinzip und trifft eine Aussage über den Lichtweg zwischen zwei Punkten. Es beurteilt damit das Problem der Lichtausbreitung final (Betrachtung des Gesamtzusammenhanges) und nicht kausal (z.B. welcher Reflexionswinkel sich für das unter einem bestimmten Winkel auf einen Spiegel fallende Licht ergibt). Die Länge (optische Weglänge) des Lichtweges hat im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen einen Extremwert, in den meisten Fällen ein Minimum. Im homogenen Medium ist der Lichtweg folglich eine Gerade. Bei Brechung wird der Lichtweg mit der Brechzahl gewichtet. [Erb, 2006]

**ferroelektrisch** Substanzen werden ferroelektrisch genannt, wenn sie auch ohne anliegendes elektrisches Feld eine permanente Polarisation aufweisen. Diese permanente Polarisation kann durch ein äußeres elektrisches Feldes umgepolt werden. Die Polarisation ist temperaturabhängig. Ferroelektrizität kommt nur in Kristallen vor. Die Vorsilbe "Ferro" bezieht sich nicht auf die Eigenschaften von "Eisen", sondern soll auf die Analogie zum Ferromagnetismus verweisen.

**Fresnelzone** beschreibt die laterale (horizontale) Auflösung von Objekten mit Hilfe von mechanischen oder elektromagnetischen Wellen.  $r$  ist der Radius der 1. Fresnelzone. Ist ein Reflektor mit seiner Ausdehnung größer als  $r$ , so kann seine Form abgebildet werden. Ist er kleiner werden an ihm die Wellen gebeugt. Haben zwei Reflektoren mindestens den Abstand  $r$  zueinander, so können sie voneinander separiert werden. Wie groß das Objekt oder ihr Abstand mindestens sein muss, hängt von seiner Tiefenlage  $z$  und der Wellenlänge  $\lambda$  ab.  $r = \sqrt{2 \cdot z \cdot \lambda}$  für  $z \gg r$

**Gruppengeschwindigkeit** Stellt man sich ein Wellenpaket, zusammengesetzt aus vielen einzelnen Wellen mit mehreren Frequenzen bzw. Wellenlängen, vor, dann ist die Gruppengeschwindigkeit die Geschwindigkeit mit der sich das gesamte Wellenpaket ausbreitet. Liegt keine Dispersion vor, so ist die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit gleich.

**Huygenssche Prinzip** (nach Christian Huygens), auch Huygens-Fresnelsches Prinzip genannt, besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer neuen Welle, der Elementarwelle, ist. Die Elementarwelle ist für den 3-dimensionalen Fall kugelförmig und für den 2-dimensionalen Fall kreisförmig. Die neue Lage der Wellenfront ergibt sich durch Überlagerung sämtlicher Elementarwellen. Breitet sich die neue Wellenfront im selben Medium aus, so ist ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz gleich der ursprünglichen Welle.

**Phasengeschwindigkeit** ist eine kinematische Größe, die lediglich die Bewegung eines geometrischen Punktes (nicht eines physikalischen Objektes) beschreibt. Es ist die Geschwindigkeit mit der sich die Phase der Welle ausbreitet. In Materie ist die Phasengeschwindigkeit frequenzabhängig.

**Radar** ist die Abkürzung für **R**adio **D**etection and **R**anging und bezeichnet verschiedene Erkundungs- und Ortungsverfahren und -geräte. Es beschreibt ein Verfahren, welches auf der Aussendung von elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenfrequenzbereich (Ultra High Frequency) zwischen 500 MHz und 2 GHz, basiert.

**Ray tracing** ist das Verfolgen eines Strahls durch eine Folge von brechenden und reflektierenden Grenzflächen. [Herrmann, 1997]

**RMS** kommt aus dem Englischen und bedeutet "Root means square" (= quadratischer Mittelwert). Er ist definiert als Wurzel des Mittelwertes der Quadrate. Man bildet zuerst die Quadrate jedes einzelnen Wertes, danach deren Mittelwert und zieht daraus zum Schluss die Wurzel.

$$RMS = \sqrt{\frac{(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_b^2)}{b}}$$

Der Mittelwert aus positiven und negativen Werten kann sich zu Null ergeben. Manchmal ist aber der Mittelwert ohne Vorzeichen interessant und das ist der quadratischer Mittelwert.

**Schatteneffekt** tritt bei hohen Geschwindigkeitskontrasten zwischen Umgebung und Inhomogenität auf. Das heißt, dass es im untersuchten Querschnitt Zonen gibt, die von wenigen Strahlen durchquert werden. Somit reduziert sich die Informationsdichte in diesen Bereichen. Beispielsweise liegen solche Schattenzonen immer in der Nähe von Hochgeschwindigkeitszonen, infolge des fokussierenden Effektes.

**Snelliussche Brechungsgesetz** besagt, dass eine Welle (z.B. ein Lichtstrahl) ihre Richtung ändert - man sagt gebrochen wird - wenn sie von einem transparenten Medium in ein anderes transparentes Medium mit einer anderen Phasengeschwindigkeit übergeht. Das Gesetz gilt für alle Wellenarten. Es trifft nur eine Aussage darüber, in welche Richtung die Welle abgelenkt wird, nicht aber, wie viel von der Welle an dem Übergang zwischen den beiden Medien transmittiert bzw. reflektiert wird. Das Brechungsgesetz ist wahrscheinlich zum ersten Mal im 10. Jahrhundert von Ibn Sahl erwähnt worden. 1601 wurde es von Thomas Harriot wiederentdeckt, aber nicht veröffentlicht. 1618 wurde es von dem Holländer Willebrord van Roijen Snell und fast gleichzeitig von René Descartes beschrieben. [Hentschel, 2001]





# Symbolverzeichnis

## *Variablen*

$\mathcal{E}$	Einheitsmatrix
$E$	elektrische Feldstärke in $V/m$
$p$	Druck in $N/m^2$
$r$	Radius in $m$
$T$	Temperatur in $^{\circ}C$
$E$	Elastizitätsmodul des Materials in $N/m^2$
$a, b$	Variable
$A_0$	Amplitude (Elongation) ist maximal mögliche Auslenkung der Welle
$B$	magnetische Induktion in $T = V \cdot s \cdot m^{-2}$
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$
$c_{\text{Salz}}$	Salzgehalt
$c_{\text{Wasser}}$	Wassergehalt
$dt$	Zeitdifferenz in $s$
$F$	Kraft in $N$
$f$	Frequenz in $Hz$
$G$	Schubmodul in $N/m^2$
$H$	magnetische Feldstärke in $A/m$
$h_j$	Höhe des Elementes $j$ in $m$
$I$	Schallintensität nach einem Hindernis in $W/m^2$
$I_0$	Schallintensität vor einem Hindernis in $W/m^2$
$k$	Wellenzahl, -vektor bzw. Ortsfrequenz in $m^{-1}$
$l_j$	Länge des Elementes $j$ in $m$

$M$	Gesamtanzahl der Elemente
$m$	Anstieg der linearen Funktion $f(x) = y = mx + n$
$N$	Anzahl der Sender-Empfänger Kombinationen
$n$	Schnittpunkt mit der y-Achse der linearen Funktion $f(x) = y = mx + n$
$P$	Langsamkeitsvektor
$p$	Langsamkeit in $s/m$
$p_j$	Langsamkeit des Elementes $j$ in $s/m$
$Q+; Q-$	Ladungsschwerpunkt in $m$
$r$	Reflexionsgrad
$S$	Matrix, die die Geometrie der Strahlenwege beinhaltet
$s$	Weg in $m$
$S^i$	Gesamtlänge des Strahls $i$ in $m$
$s_j^i$	Strecke des Strahls $i$ im Element $j$ in $m$
$T$	Vektor für die Laufzeiten
$t$	(Lauf)Zeit in $s$
$t_0$	Startzeit in $s$
$t_x$	Zeit zum Zeitpunkt $x$ in $s$
$t_{gesttigt}$	Laufzeit in einem wassergesättigtem Material in $s$
$t_{Luft}$	Laufzeit der Welle in Luft in $s$
$t_{Matrix}$	Laufzeit der Welle in der Matrix in $s$
$t_{peak}$	Zeit der max. Amplitude in $s$
$t_{trocken}$	Laufzeit in einem trockenem Material in $s$
$t_{Wasser}$	Laufzeit der Welle in Wasser in $s$
$U$	elektrische Spannung in $V$
$u$	Funktion $u(x_1, \dots, x_n, t)$
$v$	Geschwindigkeit in $m/s$
$v_a$	Geschwindigkeit der Anomalie in $m/s$
$v_P$	Geschwindigkeit der P-Welle (Longitudinalwelle) in $m/s$
$v_S$	Geschwindigkeit der S-Welle (Transversalwelle) in $m/s$
$v_u$	Geschwindigkeit der Umgebung in $m/s$

$v_{Gruppe}$	Gruppengeschwindigkeit in $m/s$
$v_{Luft}$	Geschwindigkeit in Luft in $m/s$
$v_{Matrix}$	Geschwindigkeit in der Matrix in $m/s$
$v_{Phase}$	Phasengeschwindigkeit in $m/s$
$v_{Wasser}$	Geschwindigkeit im Wasser in $m/s$
$x, y, z$	kartesische Koordinaten

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Winkel in $^\circ$
$\alpha'$	Absorptionskoeffizient in $dB/m$
$\alpha_{Gr}$	Grenzwinkel in $^\circ$
$\bar{\alpha}$	Absorptionsgrad in $m^{-1}$
$\beta$	Phasenkonstante in $m^{-1}$
$\Delta$	Laplace-Operator
$\delta$	Dissipationsgrad
$\delta$	Verlustwinkel in $^\circ$
$\gamma$	komplexe Ausbreitungskonstante in $m^{-1}$
$\lambda$	Dämpfungsparameter
$\lambda$	Wellenlänge in $m$
$\mu$	Querdehnzahl
$\mu$	magnetische Permeabilität in $H \cdot m^{-1} = V \cdot s \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$
$\mu_0$	magnetische Permeabilität in Vakuum $4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$
$\mu_r$	relative magnetische Permeabilität in $H \cdot m^{-1}$
$\omega$	Kreisfrequenz in $s^{-1}$
$\rho$	Dichte in $kg/m^3$
$\sigma$	elektrische Leitfähigkeit in $S/m = A \cdot V^{-1} \cdot m^{-1}$
$\sigma_D$	Druckspannung in $N/m^2$
$\tau$	Scherspannung in $N/m^2$
$\tau$	Transmissionsgrad
$\Theta$	Streuwinkel in $^\circ$
$\varepsilon_r''$	Imaginärteil der relativen Dielektrizitätszahl

## Symbolverzeichnis

---

$\varepsilon'_r$	Realteil der relativen Dielektrizitätszahl
$\varepsilon$	Permittivität (Dielektrizitätszahl)
$\varepsilon_0$	elektrische Feldkonstante im Vakuum = $8,85418782... \times 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
$\varepsilon_r$	komplexe, relative Permittivität (relative Dielektrizitätszahl)
$\varphi$	Phase in $^\circ$ oder <i>rad</i>
$\varphi$	spezifischer elektrischer Widerstand in $\Omega m$

# Literaturverzeichnis

- Abraham, O.; Alexandre, J.; Gourry, J.-C.; Grandjean, G.: (2000), *3D seismic imaging for the detection of small cracks*. In: European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Bd. 4, S. 171–193. Geophysical Press
- Abraham, O.; Ben Slimane, K.; Côte, P.: (1998), *Factoring Anisotropy into Iterative Geometric Reconstruction Algorithms for Seismic Tomography*. In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Bd. 35, Nr. 1, S. 31–41
- Abraham, O.; Derobert, X.; Alexandre, J.; Côte, P.: (1996), *Seismic and electromagnetic tomography applied to historical buildings: A case study*. In: 2nd Meeting EEGS, Nantes, S. 232–235
- Ballato, A.: (1996), *Piezoelectricity: History and new thrusts*. In: IEEE (Hrsg.), *Ultrasonics Symposium*, Bd. 1, S. 575–583, ISBN 0-7803-3615-1
- BDZ: (Oktober 1987), *Richtlinie Druckfestigkeits-Ersatzprüfverfahren für Mauersteine*. Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. [Http://ziegel.de/technik/mauer.html](http://ziegel.de/technik/mauer.html)
- Becht, A.; Tronicke, J.; Appel, E.; Dietrich, P.: (2004), *Invesion strategy in crosshole radar tomography using information of data subsets*. In: Geophysics, Bd. 69, Nr. 1, S. 222–230
- Berger, F.: (1991), *Zerstörungsarme Untersuchungen historischen Mauerwerks*. In: U. K. Sonderforschungsbereiches 315 “Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ (Hrsg.), *Untersuchungen an Material und Konstruktion historischer Bauwerke*, Bd. Heft 10/1991, S. 15–22, ISSN 0934-7410
- Berger, F.: (Sonderheft 1990), *Zerstörungsarme und zerstörungsfreie Erkundung von Mauerwerksgefüge. Stand der Forschungen*. In: S. 315 (Hrsg.), *Bauwerksdiagnostik*
- Berryman, J.: (1989a), *Fermat’s Principle and Nonlinear Traveltime Tomography*. In: Physical Review Letter, Bd. 62, Nr. 25, S. 2953–2956

- Berryman, J.: (1989b), *Weighted Least-Squares Criteria for Seismic Traveltime Tomography*. In: IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Bd. 27, Nr. 3, S. 302–309
- Binda, L.; Saisi, A.; Zanzi, L.: (2003), *Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l’Arena (Italy)*. In: NDT & E International, Bd. 36, Nr. 215-27
- Birch, F.: (1960), *The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars - Part I*. In: Journal of Geophysical Research, Bd. 65, S. 1083–1102
- Birch, F.: (1961), *The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars - Part II*. In: Journal of Geophysical Research, Bd. 66, S. 2199–2224
- Bishop, T.; Bube, K.; Cutler, R.; Langan, R.; Love, P.; Resnick, J.; Shuey, R.; Spindler, D.; Wyld, H.: (1985), *Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media*. In: Geophysics, Bd. 50, Nr. 6, S. 903–923
- Blackledge, J.; Burge, R.; Hopcraft, K.; Wombell, R.: (1987), *Quantitative diffraction tomography: I. Pulsed acoustic fields*. In: Journal of Physics D: Applied Physics, Bd. 20, S. 1–10. Wheatstone Phys. Lab., King’s Coll., London, UK
- Blum, R.: (1994), *Bericht über Ultraschallmessungen an dem Wohnturm der Burg Oberreifenberg*. In: Burgen und Schlösser, Bd. 35/3, S. 175–182, ISSN 0007-6201
- Bodare, A.: (1998), *Non destructive test methods of stone and rock*. geoforum.com, URL <http://www.geoforum.com/knowledge/texts/bodare/index.asp?Lang=Eng>.
- Boin, M.: (2005), *Kompensation von Artefakten bei der Rekonstruktion tomographischer Datensätze*. Diplomarbeit, Fachhochschule für Wirtschaft (FHW) Berlin
- Bolt, A.: (1976), *Nuclear Explosions and Earthquakes: The Parted Veil*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, ISBN 0-7167-0276-2
- Bonn, M.: (2000), *Computer-Tomographie*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Insitut für Prozessrechentchnik und Robotik. Seminar WS 1999/2000: Robotik in der Medizin
- Boos, M.; Grobe, J.: (1993), *Grundlagen und Beispiele zur zerstörungsfreien Ermittlung von Festigkeitsprofilen an Natursteinen*. In: R. Snethlage (Hrsg.), *Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung*, Bd. 5, S. 91–94, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, ISBN 3-433-01249-0
- Bording, R.; Gersztenkorn, A.; Lines, L.; Scales, J.; Treitel, S.: (1987), *Applications of seismic travel-time tomography*. In: Geophys. J. R. astr. Soc., Bd. 90, S. 285–303

- Brauchler, R.; Liedl, R.; Dietrich, P.: (2003), *A travel time based hydraulic tomographic approach*. In: Water Resources Research, Bd. 39, Nr. 12, S. 1370–1380. Doi:10.1029/2003WR002262
- Bregman, N.; Bailey, R.; Chapman, C.: (1989), *Crosshole seismic tomography*. In: Geophysics, Bd. 54, Nr. 2, S. 200–215
- Cardarelli, E.; de Nardis, R.: (2001), *Seismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and Faustina temple AD 141)*. In: Geophysical Prospecting, Bd. 49, S. 228–240
- Colla, C.; Binda, L.: (1999), *Bestimmung der Feuchteverteilung mit Radar Tomografie*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtetag '99*, Bd. DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
- Côte, P.; Abraham, O.: (1995), *Seismic Tomography in Civil Engineering*. In: DGZfP (Hrsg.), *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, S. 459–466, ISBN 3-931 381-02-1
- Côte, P.; Abraham, O.; Derobert, X.: (1996), *Non-destructive testing applied to historical monuments*. In: *Non-destructive testing to evaluate damage due to environmental effects on historic monuments*, Trieste, Italien. EC-Workshop
- Curie, J.; Curie, P.: (1880), *Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. 91:294-5
- Daily, W.: (1984), *Underground oil-shale retort monitoring using geotomography*. In: Geophysics, Bd. 49, Nr. 10, S. 1701–1707
- Daniels, D.: (1996), *Surface Penetrating Radar*. Institution of Electrical Engineers, ISBN 0-85296-862-0
- Deal, M.; Nolet, G.: (1996), *Nullspace shuttles*. In: Geophys. J. Int., Bd. 124, S. 372–380
- Deck, T.: (2002), *Brustkrebsfrüherkennung mit Ultraschall-Computertomographie: Datenakquisition und Online-Bildrekonstruktion*. Diplomarbeit, Berufsakademie Mannheim, Fachrichtung Informationstechnik
- Derobert, X.; Abraham, O.: (2000), *GPR and seismic imaging in a gypsum quarry*. In: Journal of Applied Geophysics, Bd. 45, S. 157–169
- Deutsch, V.; Platte, M.; Vogt, M.: (1997), *Ultraschallprüfung - Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-62072-9. S. 152 - 163

- Devaney, A.: (1984), *Geophysical Diffraction Tomography*. In: IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Bd. GE-22, Nr. 1, S. 3–13
- DGZfP: (2005), *Radar Merkblatt*. DGZfP - Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. Version: 10.02.2005
- Dines, K.; Lytle, R.: (1979), *Computerized Geophysical Tomography*. In: Proceedings of the IEEE, Bd. 67, Nr. 7, S. 1065–1073
- Egermann, R.: (1994), *Tragverhalten mehrschaliger Mauerwerkskonstruktionen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Tragkonstruktionen. Sonderforschungsbe- reich 315 Heft 29
- Eppstein, M.; Dougherty, D.: (1998a), *Efficient three-dimensional data inversion: Soil characterization and moisture monitoring from cross-well ground-penetrating radar at a Vermont test site*. In: Water Resources Research, Bd. 34, Nr. 8, S. 1889–1900
- Eppstein, M.; Dougherty, D.: (1998b), *Optimal 3-D travelttime tomography*. In: Geophy- sics, Bd. 63, Nr. 3, S. 1053–1061
- Erb, R.: (2006), *Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip*. Humboldt- Universität Berlin, Didaktik der Physik. [Http://didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/fermat.pdf](http://didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/fermat.pdf)
- Ernst, J.: (2002), *Gemeinsame Inversion von Georadar-Laufzeiten und Amplituden*. Di- plomarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- Fischerauer, G.: (2003), *Resonatoren und Verzögerungsleitungen: SAW-Sensorik im Ver- gleich*. Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik, Bad Honnef. 10. DEGA-/DPG-Workshop Physikalische Akustik
- Fleischer, G.: (2002), *Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege*. Dissertation, TU Wien, Institut für Ingenieurgeologie
- Fleischer, G.: (2004), *Untersuchung von Natursteinfassaden mittels ULtraschall- Laufzeitmessungen und anderen zerstörungssarmen Prüfverfahren*. In: H. Venz- mer (Hrsg.), *15. Hanseatische Sanierungstage: Fassadeninstandsetzung*, S. 193–206, Feuchte- und Altbausanierung e.V., Huss-Medien GmbH, Rostock-Warnemünde, ISBN 3-345-00876-9. Tagungsband
- van Gemert, D.: (1995), *Geoelektrische Untersuchungsmethode zur Hohlraumbestimmung vor und nach der Anwendung von Injektionsverfahren*. In: P. D. E. Niel (Hrsg.), *In- standsetzen von Mauerwerk*, Bd. WTA - Schriftenreihe Heft 6, S. 28–37, Aedificatio Verlag, ISBN 3-905088-08-8



- Gersztenkorn, A.; Scales, J.: (1988), *Smoothing seismic tomograms with alpha-trimmed means*. In: Geophysical Journal, Bd. 92, S. 67–72
- Göller, A.: (1999), *Moisture Mapping - Flächen- und tiefenaufgelöste Feuchtemessung mit dem MOIST-Verfahren*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtag '99*, Bd. DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
- Golm, W.; Plötz, R.; Anders, B. e. a.: (1986), *PHYSIK - Lehrbuch für Klasse 10*. 16. Aufl., Berlin, Verlag Volk und Wissen
- Gräfe, B.; Krause, M.: (2006), *Basic investigation with air-coupled ultrasonic echo for concrete elements*. In: *6th International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, St. Louis, MO, USA
- Haas, C.: (1997), *Bestimmung der Meereisdicke mit seismischen und elektromagnetisch-induktiven Verfahren*, Bd. Bericht zur Polarforschung 223. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung. [Http://web.awi.de/BIB/BerPolarforsch/BerPolarforsch1997223.pdf](http://web.awi.de/BIB/BerPolarforsch/BerPolarforsch1997223.pdf)
- Hauenschild, C.: (1999), *Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe für die Entwicklung von Feuchtemeßverfahren*. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg
- Hentschel, K.: (2001), *Das Brechungsgesetz in der Fassung von Snellius*. In: Archive for History of Exact Sciences, Springer Verlag, Bd. 55, Nr. 4, ISSN 0003-9519 (Print) 1432-0657 (Online)
- Hermann, G.: (1980), *Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computer Tomography*. Academic Press, New York
- Herrmann, F.: (1997), *Physik IV - Optik*. Universität Karlsruhe, Abteilung für Didaktik der Physik. Skripten zur Experimentalphysik
- Hillger, W.: (2000), *Erfahrungen mit luftgekoppelter Ultraschallprüftechnik*. In: DGZfP (Hrsg.), *DGZfP-Jahrestagung, Band 2*, Bd. Berichtsband 73, S. 781–786, Innsbruck
- Hillger, W.: (2001), *HFUS 2400 AirTech - ein bildgebendes Ultraschallprüfsystem für Luft- und konventionelle Ankopplung*. In: , Bd. Berichtsband 75
- Holm, A.; Krus, M.: (1998), *Zerstörungsfreie Bestimmung der Salzgehaltsverteilung durch Kombination zweier Meßmethoden*. IBP-Mitteilung 340 25, Fraunhofer Institut für Bauphysik
- Höppner, F.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Runkler, T.: (1999), *Fuzzy Cluster Analysis: Methods for Classification, Data Analysis and Image Recognition*. New York: Wiley & Sons Inc.

- Hyndman, D.; Harris, J.: (1996), *Traveltime inversion for the geometry of aquifer lithologies*. In: Geophysics, Bd. 61, Nr. 6, S. 1728–1737
- Iyer, H.; Hirahara, K. (Hrsg.): (1993), *Seismic Tomography: Theory and Practice*. Chapman & Hall, ISBN 0-412-37190-1
- Jackson, M.; Tweeton, D.: (1994), *MIGRATOM - Geophysical tomography using wavefront migration and fuzzy constraints*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. Report of Investigations 9497
- Kahle, M.: (1993), *Feuchtemessungen an historischem Mauerwerk mit dem Radarverfahren*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtetag '93*, S. 57–67
- Kahle, M.: (1994), *Verfahren zur Erkundung des Gefügestandes von Mauerwerk, insbesondere an historischen Bauten*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für Architektur. Sonderforschungsbereich 315 Heft 28
- Kahle, M.: (1997), *Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Messverfahren, Applikation, Normen, Kontakt & Studium*, Bd. 513, Kap. 20. Das Radarverfahren zur Feuchtedetektion in historischem Mauerwerk, S. 335–347. Expert Verlag, ISBN 3-8169-1359-8
- Kak, A.; Slaney, M.: (1987), *Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, ISBN 0-87942-198-3
- Kellerer, E.: (2001), *Ultraschalllaminographie - Ein neues Verfahren zur Früherkennung von Zeitstandschäden an Rohrbögen*. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen
- Kingsley, G.; R.A., L.; Taylorl, J., T.H.; Noland, J.: (1995), *Nondestructive Evaluation of a 19th Century Smokehouse in Colonial Williamsburg, Virginia*. In: *Proceedings, International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historic Buildings*, S. 149–158, Institute of Computational Mechanics, Southampton, UK
- Knöchel, R.; Daschner, F.; Taute, W.: (1999), *Mikrowellen-Sensor zur präzisen Feuchtemessung an Bauteilen und Baustoffen*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtetag '99*, Bd. DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
- Knödel, K.; Krummel, H.; Lang, G.: (1997), *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik*. Springer Verlag, ISBN 3-540-59462-0
- Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: (1986), *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. Aufl., Springer-Verlag, ISBN 3-540-15754-9
- Kurz, J.: (2003a), *Advances in automatic acoustic emission analysis*. IWB. Jahresbericht/Activities 2002/03

- Kurz, J.; Finck, F.; Grosse, C.; Reinhardt, H.: (2003b), *Automatic analysis of acoustic emission measurements on concrete*. In: *Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, DGZfP, ISBN 3-931381-49-8
- Kurz, J. H.; Ruck, H.-J.; Finck, F.; Grosse, C. U.; Reinhardt, H.-W.: (2003c), *Wavelet algorithms for non destructive testing*. In: *Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, DGZfP, ISBN 3-931381-49-8
- Lamb, H.: (1916/17), *On Waves in an Elastic Plate, A*, Bd. 93. Proceedings of the Royal Society of London
- Leschnik, W.: (1999a), *Feuchte- und Salzgehaltsmessungen an Mauerwerk mit Mikrowellen (HF-Meßtechnik)*. In: H. Venzmer (Hrsg.), *10. Hanseatische Sanierungstage: Entfeuchtung / Entsalzung*, S. 67–82, Feuchte- und Altbausanierung e.V., Kühlungsborn. Tagungsband
- Leschnik, W.: (1999b), *Feuchtemessung an Baustoffen - Zwischen Klassik und Moderne*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtetag '99*, Bd. DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
- Leschnik, W.; Schlemm, U.: (1999c), *Dielektrische Untersuchung mineralischer Baustoffe in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt bei 2,45 GHz*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtetag '99*, Bd. DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
- Love, A.: (1991), *Some problems of geodynamics*. Cambridge University Press, London
- Maierhofer, C.; Köpp, C.: (2006), *On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings*. Techn. Ber., European Commission, Belgium
- Martin, J.; Broughton, K.; Giannopolous, A.; Hardy, M.; Forde, M.: (2001), *Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams*. In: *NDT&E International*, Bd. 34, S. 107–113
- Maurer, H.; Musil, M.: (2004), *Effects and removal of systematic errors in crosshole georadar attenuation tomography*. In: *Journal of Applied Geophysics*, Bd. 55, Nr. 3-4, S. 261–270
- Mielentz, F.: (2006), *Einsatzpotenzial von laufzeitgesteuerten Ultraschall-Gruppenstrahlern an Betonbauteilen The potential of the application of ultrasonic phased array at concrete elements*. Dissertation, TU Berlin, Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik, Institut für Energie- und Automatisierungstechnik. [Http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1455/](http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1455/) oder urn:nbn:de:kobv:83-opus-14555
- Mould, R.: (2007), *Pierre Curie, 1859-1906*. In: *Current Oncology*, Bd. 14, Nr. 2, ISSN 1198-0052. History of Medicine

- Nicolotti, G.; Socco, L.; Martinis, R.; Godio, A.; Sambuelli, L.: (2003), *Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees*. In: Journal of Arboriculture, Bd. 29(2), S. 66–78
- Paasche, H.: (2006a), *Characterization of alluvial aquifers using geophysical techniques: Integrated surveying strategies and case studies*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- Paasche, H.; Tronicke, J.: (2007), *Cooperative inversion of 2D geophysical data sets: A zonal approach based on fuzzy c-means cluster analysis*. In: Geophysics, Bd. 72, Nr. 3, S. A35–A39
- Paasche, H.; Tronicke, J.; Holliger, K.; Green, A.; Maurer, H.: (2006b), *Integration of diverse physical-property models: Subsurface zonation and petrophysical parameter estimation based on fuzzy c-means cluster analyses*. In: Geophysics, Bd. 71, Nr. 3, S. H33–H44
- Parnadi, I. W. W.: (2001), *Kennwert-Schätzung aus Georadar-Transmissionsdaten*. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
- Patitz, G.: (1996), *Zerstörungssarme Beurteilung der Innenfüllung mehrschaligen alten Mauerwerks mit mikroseismischen Verfahren*. In: U. K. Sonderforschungsbereiches 315 (Hrsg.), *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke*, S. 137–166, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, ISBN 3-433-01260-1
- Patitz, G.: (1998), *Erkundung mehrschaligen Mauerwerks mit mechanischen Wellen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für Architektur. Sonderforschungsbereich 315 Heft 35
- Patitz, G.: (2006), *Radaruntersuchungen zum Mauerwerksaufbau, zur Feuchte- und Salzverteilung*. In: H. Venzmer (Hrsg.), *17. Hanseatische Sanierungstage: Messen und Sanieren*, S. 113–124, Feuchte- und Altbausanierung e.V., Huss-Medien GmbH, Kühlungsborn, ISBN 3-345-00906-4. Tagungsband
- Paulus, D.; Bouattour, S.: (), *Hauptseminar: Medizinische Bildverarbeitung - Seminararbeiten*. Institut für Computer Visualistik, Universität Koblenz-Landau. [Http://www.uni-koblenz.de/agas/lehre/ss03/medbv/summaryHandout.pdf](http://www.uni-koblenz.de/agas/lehre/ss03/medbv/summaryHandout.pdf)
- Pohl, J.: (2001), *Risstiefenmessung mit Ultraschall-Rayleighwellen*. In: DGZfP (Hrsg.), *DGZfP-Jahrestagung - ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung*, Bd. Berichtsband 75, Berlin
- Pohl, R.: (1976), *Einführung in die Physik - Dritter Band (Optik und Atomphysik)*, Bd. 13. Auflage. Springer Verlag, ISBN 3-540-07450-3

- Pratt, R.: (2003), *Waveform Tomography: theory and practice*. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada
- Radon, J.: (1917), *Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten*. Teubner-Verlag
- Radon, J.: (1987), *Gesammelte Abhandlungen*, Bd. 1-2. Verlag der Österreichische Akademie der Wissenschaften, ISBN 3-7001-1102-9
- Rahm, U.; Blum, R.: (1995), *Zerstörungsfreie Bestimmung des Wasser- und Salzgehaltes an Natursteinen mittels Mikrowellen in Transmissions- und Reflexionsanordnung*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Feuchtetag '95*
- Rangayyan, R.: (1986), *Computed tomography techniques and algorithms: A tutorial*. In: Innovation and Technology in Biology and Medicine, Bd. 7, Nr. 6, S. 745–762
- Redmer, B.; Weise, F.; Ewert, U.; Patitz, G.: (2004), *Kombinierter Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bauzustandsanalyse antiker Baudenkmäler im Pergamonmuseum Berlin*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Dach-Jahrestagung*. Salzburg
- Reinhardt, H.; et al.: (2007), *Beton Kalender - Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen*. Ernst & Sohn, ISBN 978-3-433-01833-0
- Sahebi, M.: (1996), *Application de la Tomographie Sonique au Diagnostic du Beton: Possibilites et Limetes*. Universite de Sherbrooke, Canada
- Sandmeier, K.: (1998-2001), *ReflexW, Version: 2.5*. [Http://www.sandmeier-geo.de/index.html](http://www.sandmeier-geo.de/index.html)
- Schickert, M.: (2004), *Ultraschall-Tomografie an Betonbauteilen*. In: D. D. G. für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.), *Dach-Jahrestagung*. Salzburg
- Schickert, M.; Krause, M.; Müller, W.: (2003), *Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focussing Technique*. In: Journal of Materials in Civil Engineering, Bd. 15, Nr. 3, S. 235–246
- Schlemm, U.: (2003), *Messung von Feuchte- und Salzprofilen mit Mikrowellen: Untersuchung von Störeinflüssen und Verbesserung der Meßeigenschaften*. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg
- Schön, J.: (1983), *Petrophysik*. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, ISBN 3-432-92971-4
- Schubert, F.: (2006), *Schallemissionstomographie - Ein neues bildgebendes Verfahren zur Zustandsüberwachung von Bauteilen*. In: ZfP-Zeitung 98

- Schwarz, W.; Venzmer, H.: (1995), *Neue Möglichkeiten der Feuchtebestimmung an Mauerwerkmaterialien mit Hilfe von Ultraschallsignalanalysen*. In: P. D. E. Niel (Hrsg.), *Instandsetzen von Mauerwerk*, Bd. WTA - Schriftenreihe Heft 6, S. 62–73, Aedificatio Verlag, ISBN 3-905088-08-8
- Siegesmund, S.; Weiss, T.; Rüdrieh, J.: (2004), *Schadensmonitoring mit Ultraschalldiagnostik*. In: *Restauro*, Bd. 02
- Silman, R.; Ennis, M.: (1993), *Non-Destructive Evaluation to Document Historic Structures*. In: *IABSE Symposium: Structural Preservation of the Architectural Heritage*, S. 75–90
- Slaney, M.: (1985), *Imaging with Diffraction Tomography*. Dissertation, Purdue University, NIH Grants, West Lafayette, Indiana
- Stewart, R.: (1991), *Exploration Seismic Tomography: Fundamentals., Course Notes*, Bd. 3. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, ISBN 1-56080-052-6
- Thomasen, S.; Searls, C.: (1993), *Historic Preservation - High and Low Tech Diagnostic Technology*. In: *IABSE Symposium: Structural Preservation of the Architectural Heritage*, S. 91–98
- Tronicke, J.: (2007), *The Influence of High Frequency Uncorrelated Noise on First-Break Arrival Time and Crosshole Traveltime Tomography*. In: *JEEG Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Bd. 12, Nr. 2, S. 173–184
- Tronicke, J.; Dietrich, P.; Appel, E.: (2002), *Quality improvement of crosshole georadar tomography: pre- and post-investigation data analysis strategies*. In: *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Bd. 7, S. 59–73
- Tronicke, J.; Holliger, K.; Barrash, W.; Knoll, M.: (2004), *Multivariate analysis of cross-hole georadar velocity and attenuation tomograms for aquifer zonation*. In: *Water Resources Research*, Bd. 40
- Tronicke, J.; Tweeton, D.; Dietrich, P.; Appel, E.: (2001), *Improved crosshole radar tomography by using direct and reflected arrival times*. In: *Journal of Applied Geophysics*, Bd. 47, S. 97–105
- Valle, S.; Zanzi, L.: (1996), *Radar tomography for cavities detection*. In: R. Bell; M. Cramer (Hrsg.), *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, S. 555–563. Keystone, Colorado
- Valle, S.; Zanzi, L.; Rocca, F.: (1998), *Toward high resolution radar tomography*. In: *Proceedings, 7th International Conference on Ground Penetrating Radar GPR'98*, Lawrence

- Vallen, H.: (2001), *Schallemissionsprüfung: Grundlagen - Gerätetechnik - Anwendungen*. In: DGZfP (Hrsg.), *DGZfP-Jahrestagung 2001, ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung*, Bd. Berichtsband 75, Berlin
- Venzmer, H.: (2001), *Aufsteigende Feuchtigkeit in Ziegelmauerwerk - Programmierete Fehlschläge, Lösungsansätze und Perspektiven für die Baupraxis*. In: H. Venzmer (Hrsg.), *12. Hanseatische Sanierungstage: Mauerwerksfeuchte*, S. 41–62, Feuchte- und Altbausanierung e.V., Verlag Bauwesen, Berlin, Rostock-Warnemünde, ISBN 3-345-00784-3. Tagungsband
- Venzmer, H.; Leuthold, K.; Koss, L.; Lesnych, N.: (2006), *Baufeuchte - Von der Messung bis zur Visualisierung von Feuchtigkeitsverteilungen*. In: H. Venzmer (Hrsg.), *17. Hanseatische Sanierungstage: Messen und Sanieren*, S. 97–112, Feuchte- und Altbausanierung e.V., Huss-Medien GmbH, Kühlungsborn, ISBN 3-345-00906-4. Tagungsband
- Vidale, J.: (1988), *Finite-Difference calculation of travel times*. In: Bulletin of the Seismological Society of America, Bd. 78, Nr. 6, S. 2062–2076
- Weimann, M.; Wittmann, F.: (1995), *Ultraschallmessung zur zerstörungsfreien Bestimmung der Festigkeit tragender Natursteinbauteile*. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, ISSN 0947-4498
- Wendrich, A.; Maierhofer, C.; Hamann, M.; Hennen, C.; Knupfer, B.; Marchisio, M.; da Porto, F.; Binda, L.; Zanzi, L.: (2004a), *Zerstörungsfreie Struktur- und Feuchteuntersuchungen im Alten Museum in Berlin im Rahmen des EU-Projektes ONSITEFORMATION*. In: H. Venzmer (Hrsg.), *15. Hanseatische Sanierungstage: Fassadeninstandsetzung*, S. 225–234, Feuchte- und Altbausanierung e.V., Huss-Medien GmbH, Rostock-Warnemünde, ISBN 3-345-00876-9. Tagungsband
- Wendrich, A.; Maierhofer, C.; Kuritz, M.; Köpp, C.: (2004b), *Aufbau eines historischen Mauerwerkskörpers ("Obelix") zur Bewertung von zerstörungsfreien Verfahren*. In: *DACH - Jahrestagung, Salzburg*, Bd. Berichtsband BB89-CD, ISBN 3-931381-55-2
- Wenzel, F.; Gigla, B.; Kahle, M.; Stiesch, G.: (2000), *Historisches Mauerwerk: Untersuchen, Bewerten, Instandsetzen*. ISBN 3-934540-02-3
- Wikipedia: (2007), *Piezoelektrizität: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=PiezoelektrizitA4t&oldid=31851073](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=PiezoelektrizitA4t&oldid=31851073), Online Stand: 23. Mai 2007
- Witten, A.; D.D., G.; Sypniewski, J.; King, W.: (1992), *Geophysical diffraction tomography at a dinosaur site*. In: Geophysics, Bd. 57, Nr. 1, S. 187–195
- Wittmann, F. (Hrsg.): (1993), *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung: Tagungsbericht des Dritten Internationalen Kolloquiums zum Thema Werkstoffwissenschaften*

*und Bausanierung, Kontakt & Studium, Baupraxis*, Bd. 420. Expert Verlag, ISBN 3-8169-0953-1

Zanzi, L.: (2003), *Deliverable D8.1 - Software for 3D Echo-Radar Data, Impact Echo Data, Sonic/Radar Tomography*. Techn. Ber., European Commission, Belgium. EU-Project: ONSITEFORMASONRY

ZfPBau-Kompendium: (2004).

[http://www.bam.de/microsites/zfp\\_kompendium/welcome.html](http://www.bam.de/microsites/zfp_kompendium/welcome.html)

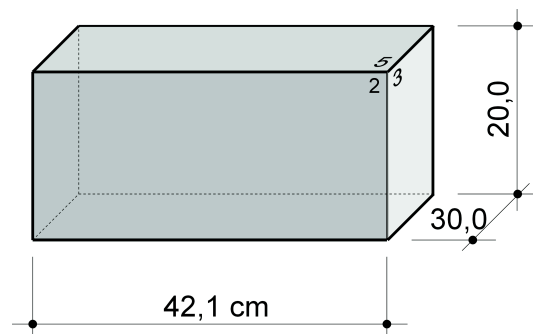


# Anhang A.

## Zusatzinformation aus dem Kapitel Fehlerbetrachtung - Ultraschall

Um die verschiedenen Einflüsse auf die Bestimmung der Laufzeit zu ermitteln, wurden Messungen an den Probekörpern Polyamid PA6 und W2 (siehe Kap. 8.3.1, S. S.66) durchgeführt und z.T. einen Tag später wiederholt. Um die Wiederholbarkeit von Messungen zu gewährleisten bzw. Einflüsse abzuschätzen, sind folgende Einflüsse untersucht wurden:

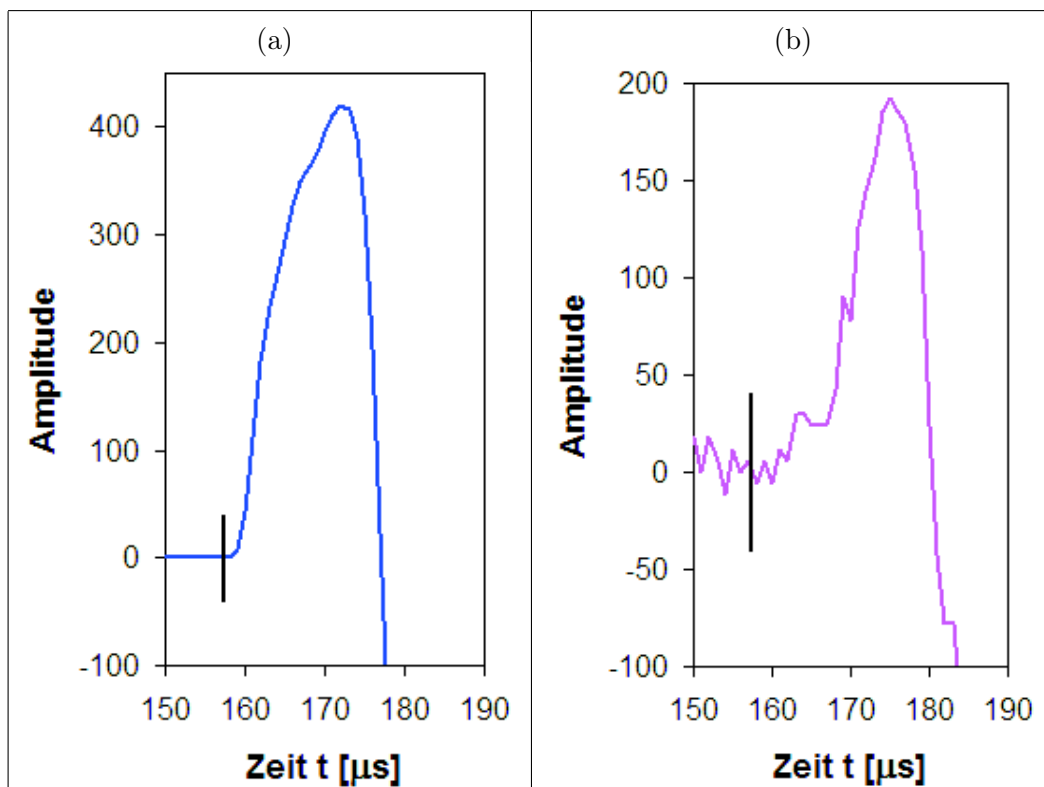
- Pickgenauigkeit
- Ankopplung
- Frequenz
- Einfluss von Zusatzgeräten (wie Vorverstärker, Bandpassfilter)
- Kabellängen
- Erwärmung der Apparatur
- Anpressdruck
- Prüfköpfe
- Koppelmittel



**Abbildung A.1:** homogener Referenzprobekörper aus Polyamid-6-Guss "PA6"

Die Messungen zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit, Pickgenauigkeit, Ankopplung sowie Einfluss der Frequenz, Vorverstärkung und Geräteerwärmung wurden an einem homogenen Referenzprobekörper aus Polyamid-6-Guss **“PA6“** durchgeführt. Die Geschwindigkeit der P-Welle beträgt laut [Krautkrämer, 1986]  $v_P = 2200 \dots 2600 \text{ m/s}$  und der S-Welle  $v_S = 1100 \dots 1200 \text{ m/s}$ .

**(a). Die Pickgenauigkeit** Die Messungen erfolgte am homogenen Probekörper PA6. Der Abstand der Prüfköpfe betrug 42,1 cm. Je Messung wurden 10 Laufzeitkurven hintereinander aufgezeichnet. Mit dem Programm ReflexW wurde dann die Ersteinsätze der Welle für jedes A-Bildes 32-mal bestimmt und statistisch ausgewertet. Die Laufzeiten wurden von von nur einer Person gepickt. Die Messungen zeigten einen sehr klaren Ersteinsatz (siehe *Abb. A.2*). Der Mittelwert der Laufzeit betrug  $157,4 \mu\text{s}$  mit einer Standardabweichung von  $0,4 \mu\text{s}$ . Somit konnte der Ersteinsatz mit einer Genauigkeit von  $0,4 \mu\text{s}$  bestimmt werden. Die gemessene Geschwindigkeit beträgt  $v_P = 2675 \text{ m/s} \pm 7 \text{ m/s}$ .



**Abbildung A.2:** Gegenüberstellung der Ersteinsätze an (a) PA6 und (b) W2 (Prüfköpfen: SO202, Koppelmittel: Vaseline, Pulsform: Rechteckpuls)

**(b). Einfluss der Ankopplung** Die Messungen erfolgten am homogenen Probekörper PA6 sowie an der Mauer W2 an drei unterschiedlichen Positionen. Der Abstand der Prüfköpfe an PA6 betrug 42,1 cm und am W2 49 cm. Je Messung wurden jeweils 10 Laufzeitkurven aufgezeichnet. Der Einfluss des An- und Abkoppeln wurde für vier mögliche Varianten untersucht mit folgender Vorgehensweise:

(a) Ankopplung beider Prüfköpfe - Aufzeichnung der 10 Laufzeitkurven - Abkopplung beider Prüfköpfe

PA6:	Mittelwert: 157,4 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 0,4 $\mu s$
W2 (Pos.4):	Mittelwert: 156,3 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,0 $\mu s$
W2 (Pos.11):	Mittelwert: 159,4 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 0,6 $\mu s$
W2 (Pos.14):	Mittelwert: 161,7 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 0,9 $\mu s$

(b) Ankopplung beider Prüfköpfe - Aufzeichnung der 1. Laufzeitkurve - Ab- und Ankopplung des Senders - Aufzeichnung der 2. Laufzeitkurve - Ab- und Ankopplung des Senders - ... u.s.w.

W2 (Pos.4):	Mittelwert: 157,0 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,3 $\mu s$
W2 (Pos.11):	Mittelwert: 162,2 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 0,6 $\mu s$
W2 (Pos.14):	Mittelwert: 161,0 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,4 $\mu s$

(c) Ankopplung beider Prüfköpfe - Aufzeichnung der 1. Laufzeitkurve - Ab- und Ankopplung des Empfängers - Aufzeichnung der 2. Laufzeitkurve - Ab- und Ankopplung des Empfängers - ... u.s.w.

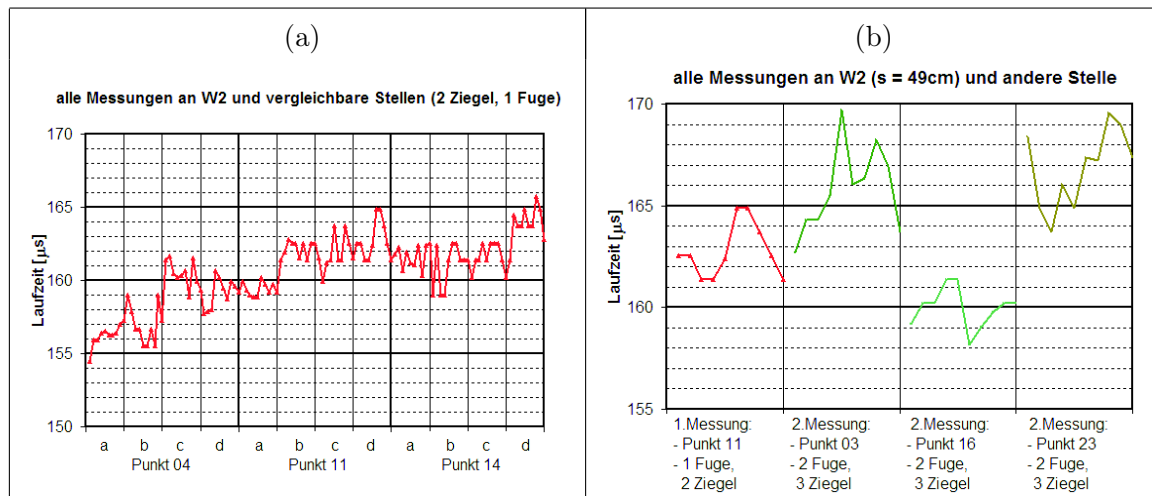
W2 (Pos.4):	Mittelwert: 160,4 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,0 $\mu s$
W2 (Pos.11):	Mittelwert: 161,8 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,2 $\mu s$
W2 (Pos.14):	Mittelwert: 161,6 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 0,9 $\mu s$

(d) Ankopplung beider Prüfköpfe - Aufzeichnung der 1. Laufzeitkurve - Ab- und Ankopplung beider Prüfköpfe - Aufzeichnung der 2. Laufzeitkurve - Ab- und Ankopplung beider Prüfköpfe - ... u.s.w.

PA6:	Mittelwert: 157,6 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 0,5 $\mu s$
W2 (Pos.4):	Mittelwert: 159,1 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,1 $\mu s$
W2 (Pos.11):	Mittelwert: 162,8 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,3 $\mu s$
W2 (Pos.14):	Mittelwert: 163,9 $\mu s$ ;	Standardabweichung: 1,2 $\mu s$

Die Laufzeit wurde für jede Laufzeitkurve 8-mal mit dem Programm ReflexW gepickt und statistisch ausgewertet. Der Anstieg des Mittelwertes der Laufzeit zwischen Fall a) und d) an PA6 betrug 0,2  $\mu s$  (Abb. A.4a, Kurve 1 und 2) und an W2 betrug er ca. 2-3  $\mu s$  (Abb. A.3a)

Die Messungen an den Positionen 4, 10 und 14 wurden 1 Tage später wiederholt. Der Mittelwert betrug 163,9  $\mu s$  mit einer Standardabweichung von 1,2  $\mu s$ .



**Abbildung A.3:** (a) Messungen zur Ermittlung des Einflusses der Ankopplung und der Variation unterschiedlicher Messpunkte mit planmäßig gleichem Aufbau; (b) Messungen zur Ermittlung des Einflusses der Mauerwerksstruktur

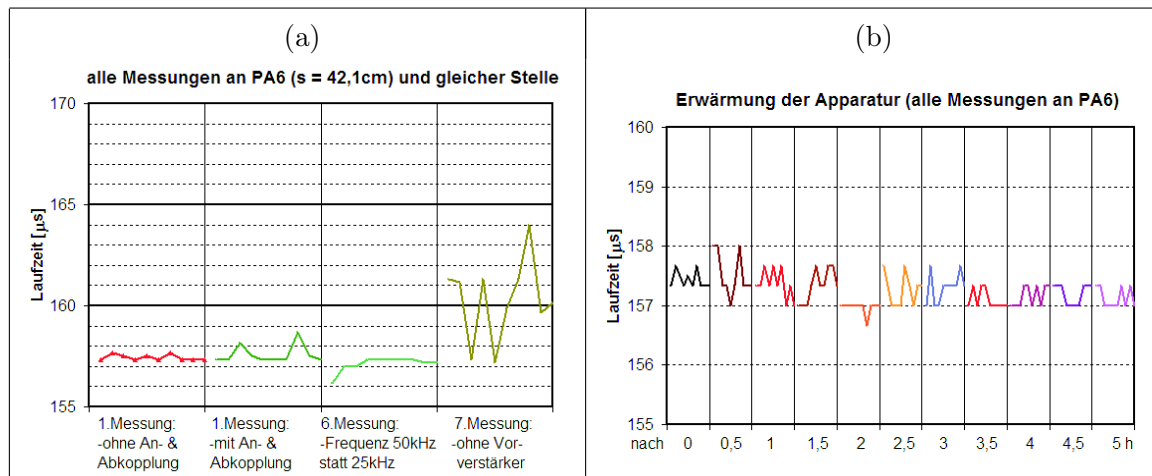
**(c). Einfluss der Frequenz, des Vorverstärkers und der Geräteerwärmung**

Die Messungen erfolgten am Probekörper PA6. Der Abstand der Prüfköpfe betrug 42,1 cm. Je Messung wurden jeweils 10 Laufzeitkurven aufgezeichnet. Nach jeder Speicherung einer Laufzeitkurve wurden die Prüfköpfe erneut ab- und angekoppelt.

Die Frequenz wurde von 25 kHz auf 50 kHz erhöht. Der Mittelwert der Laufzeit betrug 157,1  $\mu\text{s}$  mit einer Standardabweichung von 0,5  $\mu\text{s}$ . Der Mittelwert der Laufzeit sank von 157,6  $\mu\text{s}$  auf 157,1  $\mu\text{s}$  somit um 0,5  $\mu\text{s}$  (Abb. A.4a, Kurve 3). Theoretisch dürfte die Laufzeit nicht abhängig sein von der Frequenz. Die Ursache für die Laufzeitabnahme bei höheren Frequenzen, ist das sich höherfrequente Wellen sich stärker verformen. Dadurch verändert sich die Flanke der ersten Welle und der Ersteinsatz erscheint an einer anderen Stelle.

Es wurde der Vorverstärker VV2 weggelassen. Dadurch sank der Amplitudenausschlag und das Signal-Rausch Verhältnis verschlechterte sich. Der Mittelwert der Laufzeit betrug 160,3  $\mu\text{s}$  mit einer Standardabweichung von 2,0  $\mu\text{s}$ . Durch die Verwendung eines Vorverstärkers verkürzt sich die Laufzeit im Mittel von 157,6  $\mu\text{s}$  auf 160,3  $\mu\text{s}$  somit um ca. 3  $\mu\text{s}$  (Abb. A.3a, Kurve 4). Die Ursache dafür ist eine steilere Flanke infolge der Verstärkung des Signals. Somit wird der Einsatzpunkt klarer und erscheint verschoben.

Der Einfluss der Erwärmung der Apparatur wurde 5h lang untersucht, in dem die Messung aller 0,5h wiederholt wurden. Es konnte keine Laufzeitveränderung festgestellt werden. Der Mittelwert betrug 157,4  $\mu\text{s}$  mit einer Standardabweichung von 0,7  $\mu\text{s}$ .



**Abbildung A.4:** (a) Messungen an homogenen Material, Ermittlung des Einflusses des Ankoppelns, der Frequenz, von Zusatzgeräten; (b) Messungen zur Ermittlung des Einflusses der Geräteerwärmung

**(d). Einfluss der Kabellänge, Prüfköpfe, Bandpassfilter, Anpressdruck, Reproduzierbarkeit** Die Messungen erfolgten am Probekörper W2. Der Abstand der Prüfköpfe betrug 49 cm. Je Messung wurden jeweils 10 Laufzeitkurven aufgezeichnet. Nach jeder Speicherung einer Laufzeitkurve wurden die Prüfköpfe erneut ab- und angekoppelt.

Um den Einfluss der Kabellänge zu ermitteln wurden ausschließlich die Verbindungskabel zwischen Apparatur und Prüfköpfe von 6 m auf 3 m verändert. Weiterhin wurden die beiden unterschiedlichen Prüfköpfe gegeneinander vertauscht (Sender wurde zum Empfänger). Die bestehende Apparatur (Abb. 4.8, S.22) wurde um ein Bandpassfilter erweitert. Die Messung zur Untersuchung des Anpressdruckes erfolgte an einem Betonprobekörper der Dicke 50,5 cm. Der Anpressdruck wurde von 1bar ( $\hat{=}$  5kg) auf 2bar ( $\hat{=}$  10kg) verändert.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen betragen:

Kabellänge:	Mittelwert: 161,5 $\mu\text{s}$ ;	Standardabweichung: 1,1 $\mu\text{s}$
Prüfköpfe:	Mittelwert: 161,6 $\mu\text{s}$ ;	Standardabweichung: 1,1 $\mu\text{s}$
Bandpassfilter:	Mittelwert: 163,1 $\mu\text{s}$ ;	Standardabweichung: 1,3 $\mu\text{s}$
Anpressdruck 1bar:	Mittelwert: 112,9 $\mu\text{s}$ ;	Standardabweichung: 0,6 $\mu\text{s}$
Anpressdruck 2bar:	Mittelwert: 113,1 $\mu\text{s}$ ;	Standardabweichung: 0,5 $\mu\text{s}$

Die Erwärmung der Apparatur (Abb. A.4b), veränderte Kabellängen (Abb. A.5(a), Kurve 4), das Vertauschen von Prüfköpfen (Abb. A.5(a), Kurve 1, 3 und 5), die Verwendung eines Bandpassfilters (Abb. A.5(a), Kurve 8) und der Anpressdruck (Abb. A.5(b))

haben keinen signifikanten Einfluss auf die Laufzeit. Ebenfalls kann aus den Messungen geschlussfolgert werden, dass sich jederzeit die Ergebnisse reproduzieren lassen (Abb. A.5(a), Kurve 10).

Die Heterogenität des Mauerwerks bewirkt eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses und somit auch einen weniger eindeutigen Ersteinsatzpunkt (siehe Abb. A.2). Die Laufzeit an W2 konnte mit einer Genauigkeit von 2-3  $\mu\text{s}$  bestimmt werden (Abb. A.3a).

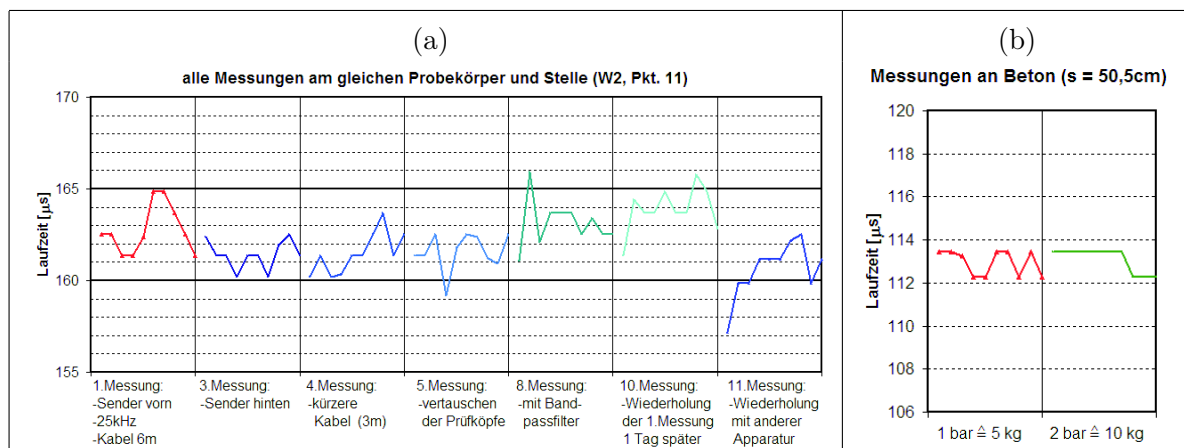
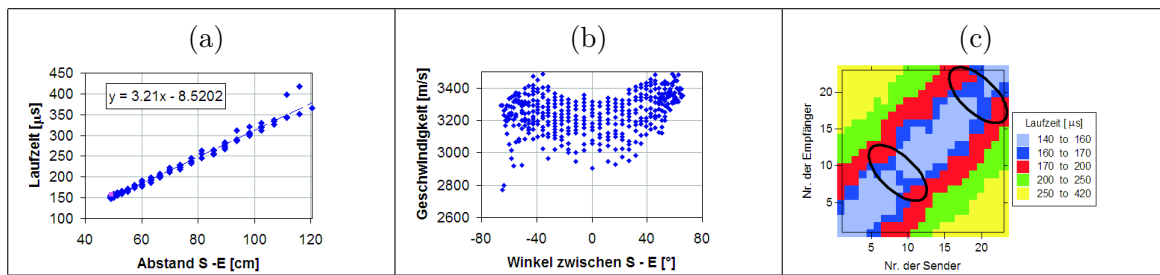


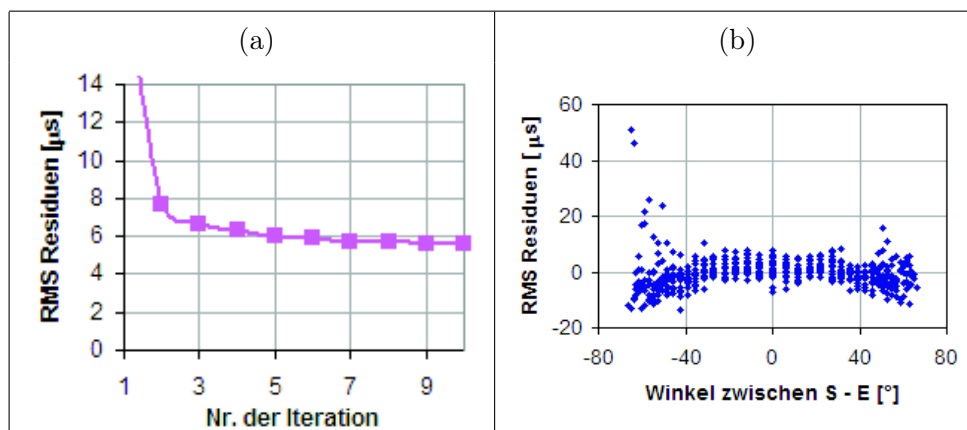
Abbildung A.5: (a) Messungen zur Ermittlung der Geräteinflüsse; (b) Messungen zur Ermittlung des Einflusses des Anpressdruckes

## Anhang B.

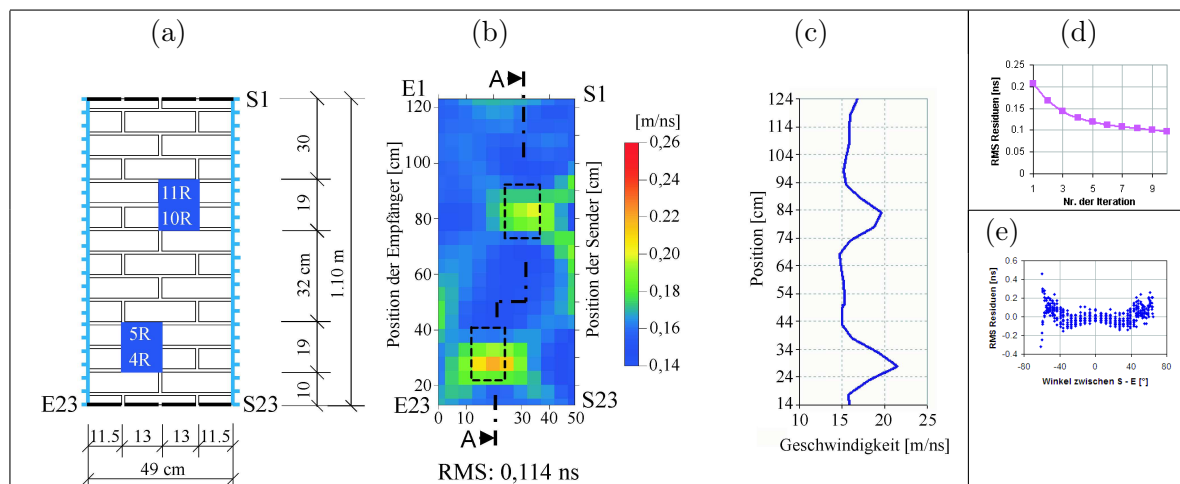
### Zusatzinformation aus dem Kapitel Messergebnisse



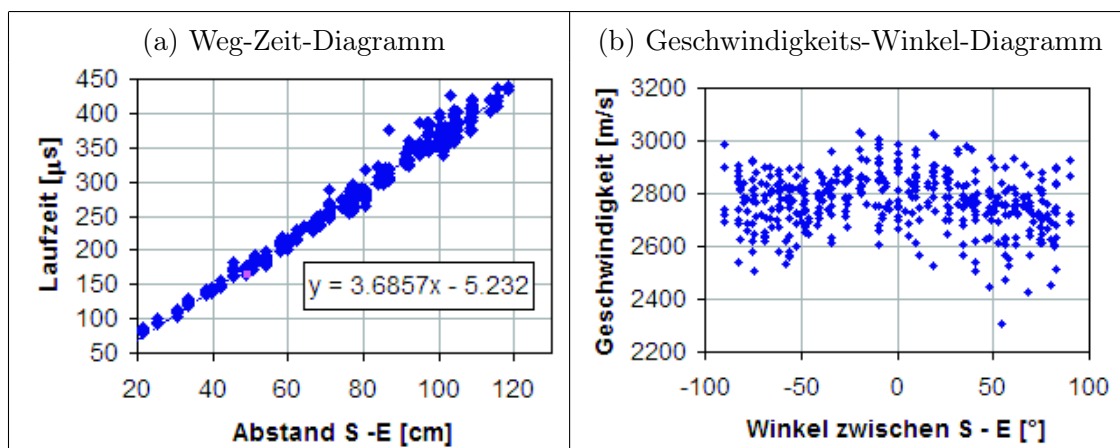
**Abbildung B.1:** Prüfung der Datenqualität - Ultraschallmessung an W2 mit Prüfköpfen G0,2gc (85 kHz); (a) Weg-Zeit-Diagramm; (b) Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm; (c) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers



**Abbildung B.2:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Ultraschall an W2 mit Prüfkopf G0,2gc (85 kHz); (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

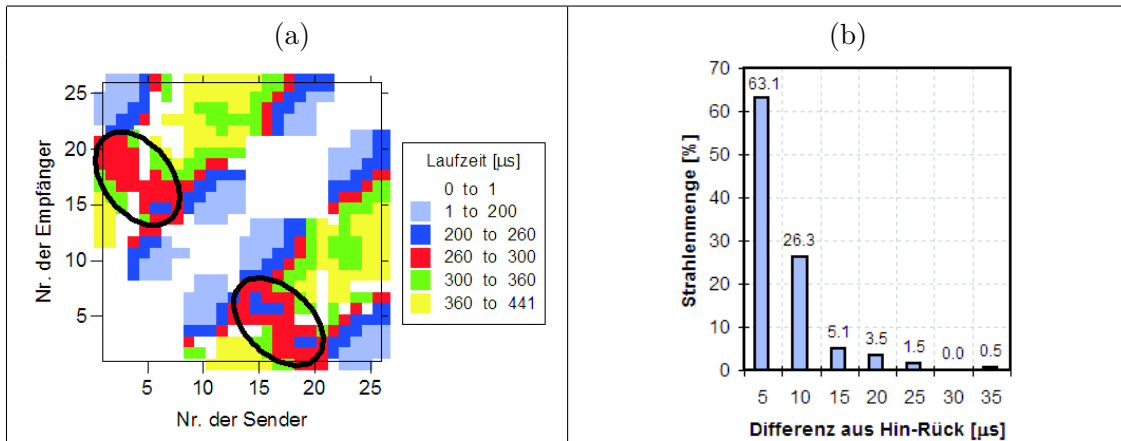


**Abbildung B.3:** Messung an W2 mit Radar, GSSI, SIR 10A und 1,5 GHz Antenne; (a) Querschnitt; (b) Tomogramm (homogenes Startmodell Nr. 1); (c) Schnitt A-A; (d) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (e) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

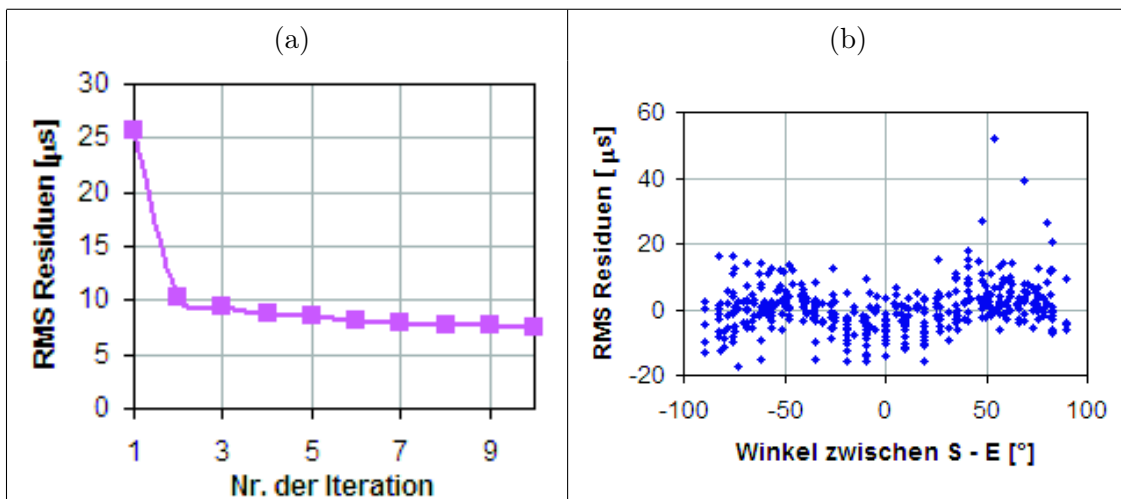


**Abbildung B.4:** Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 (25 kHz) an Asterix, Schnitt A-A





**Abbildung B.5:** Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 (25 kHz) an Asterix, Schnitt A-A; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



**Abbildung B.6:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Ultraschallmessung mit SO202 (25 kHz) an Asterix, Schnitt A-A; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

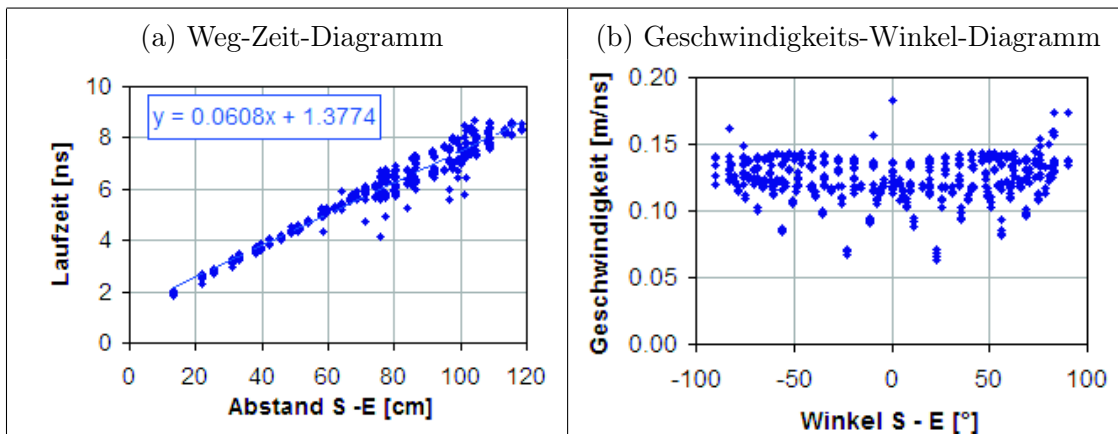


Abbildung B.7: Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt A-A mit 1,5 GHz

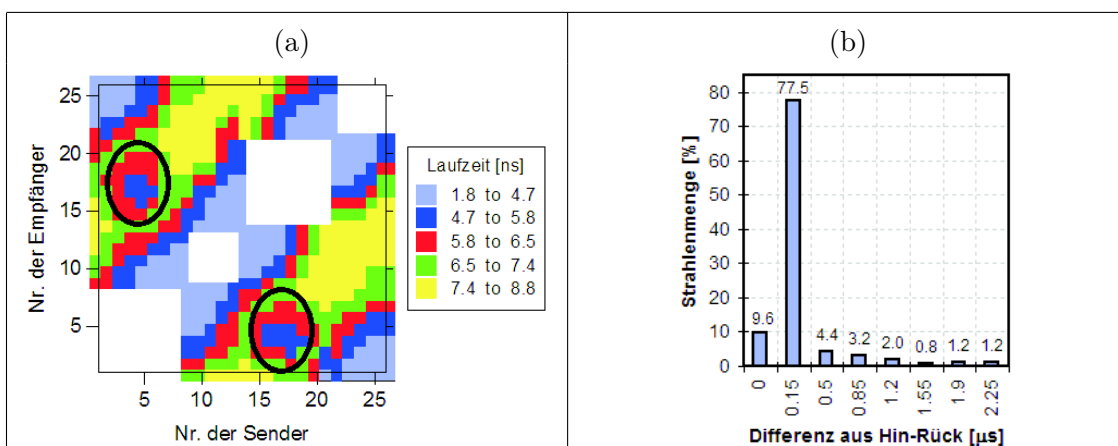
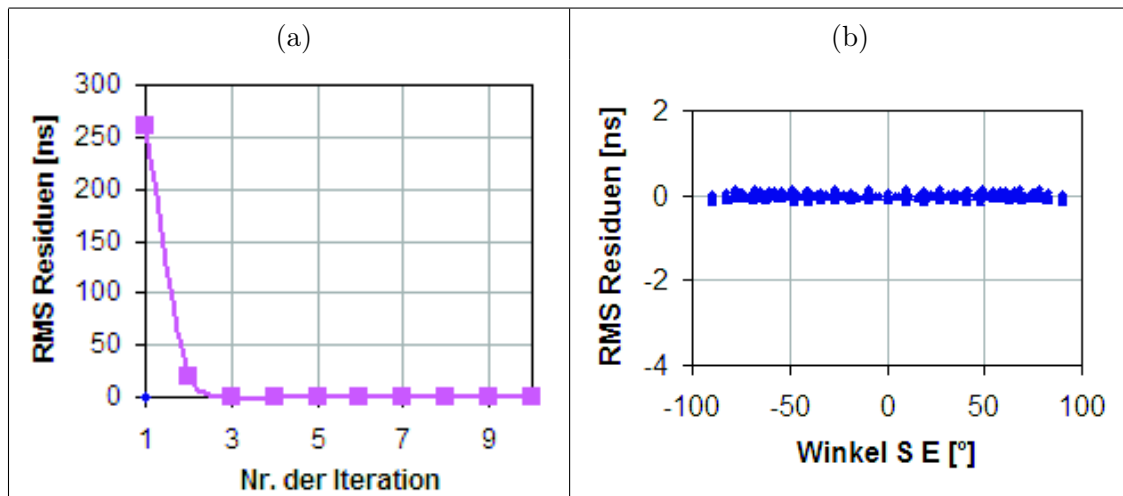
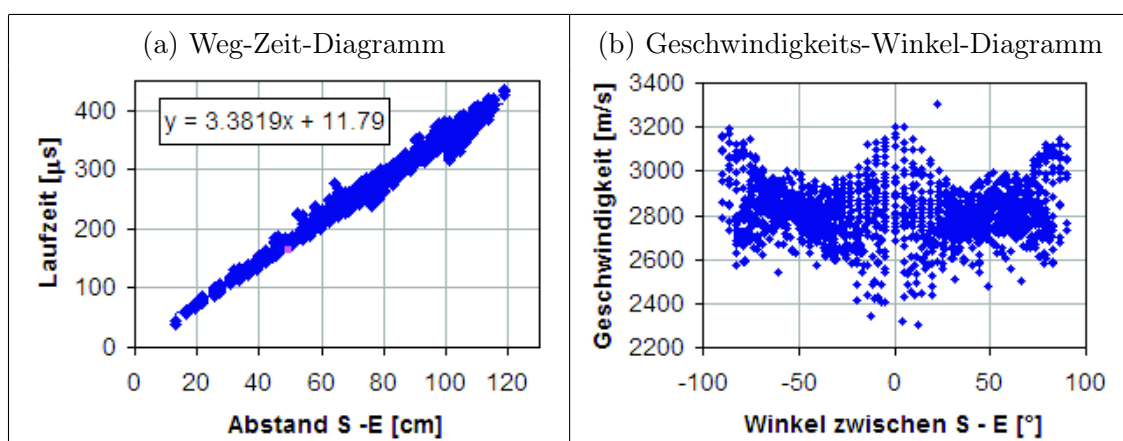


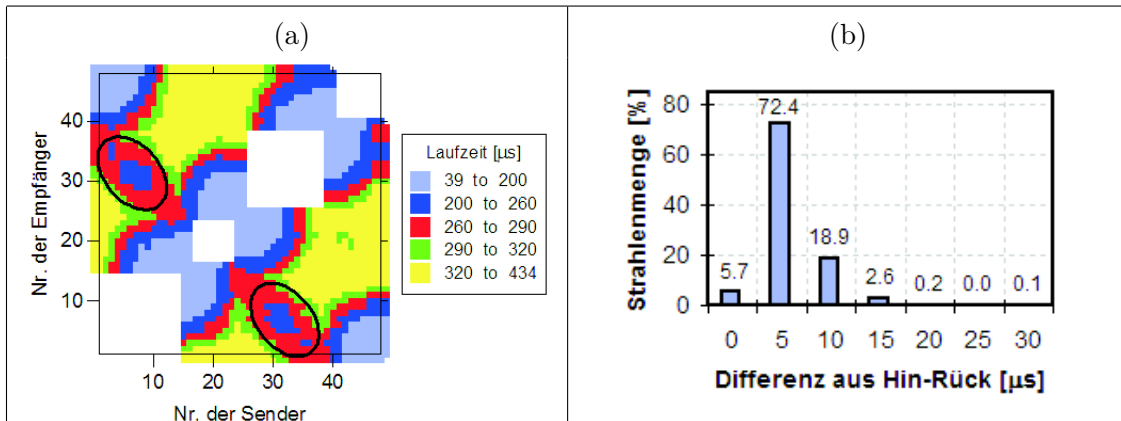
Abbildung B.8: Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt A-A mit 1,5 GHz; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



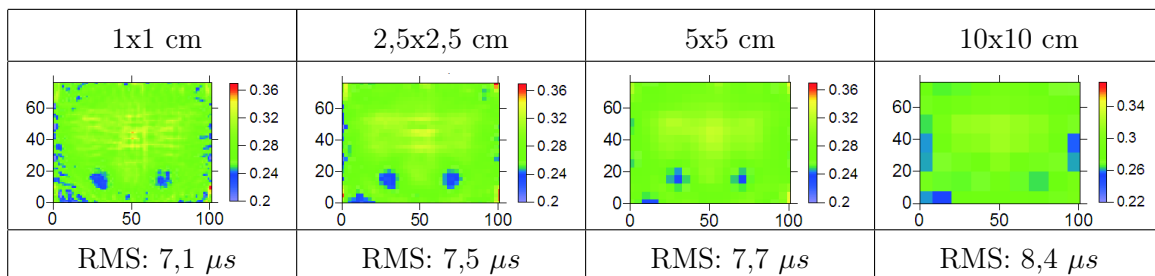
**Abbildung B.9:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Radarmessung an Asterix, Schnitt A-A mit 1,5 GHz; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes



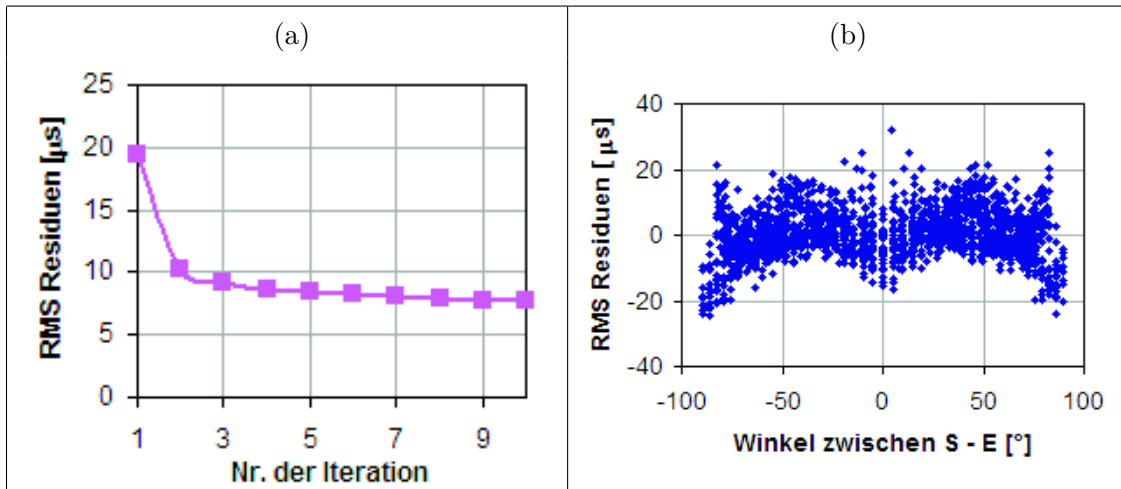
**Abbildung B.10:** Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt B-B



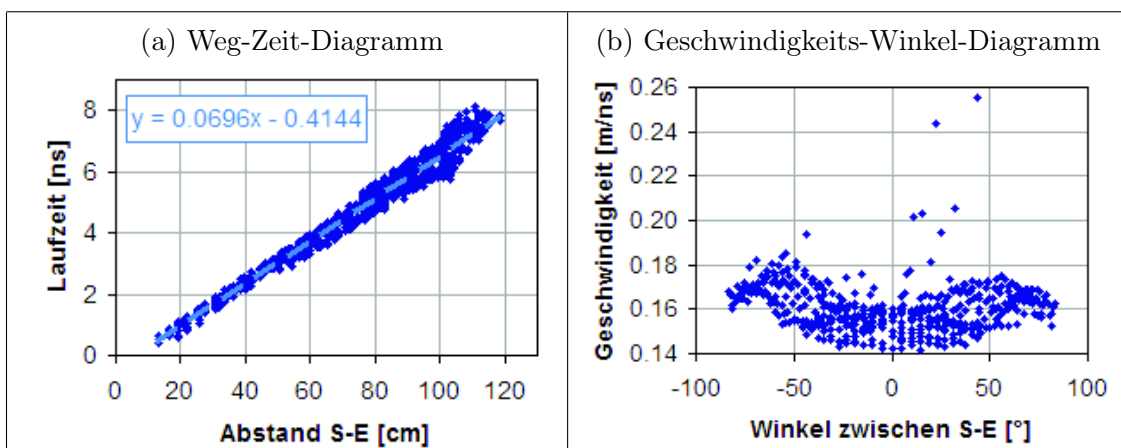
**Abbildung B.11:** Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt B-B; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



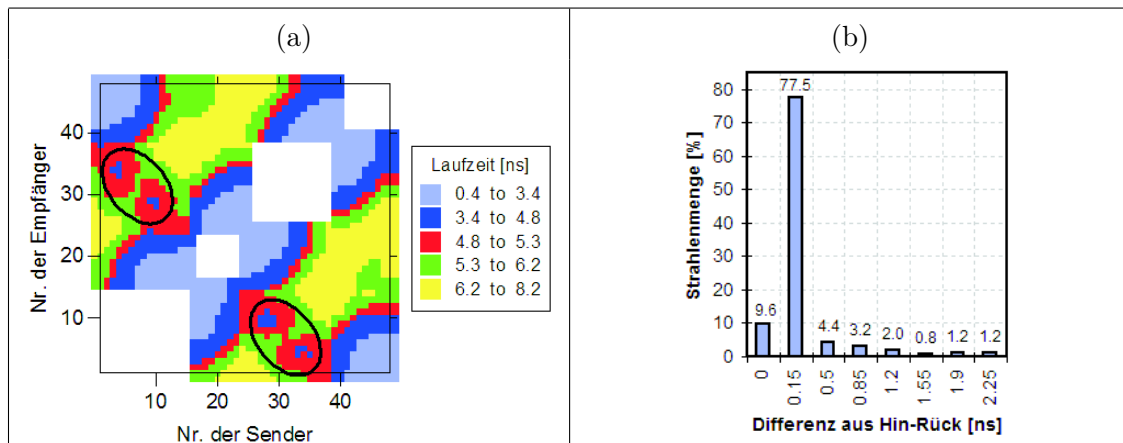
**Abbildung B.12:** Tomogramme mit unterschiedlichen Netzgrößen von 1x1 2,5x2,5, 5x5, 10x10 cm; Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt B-B



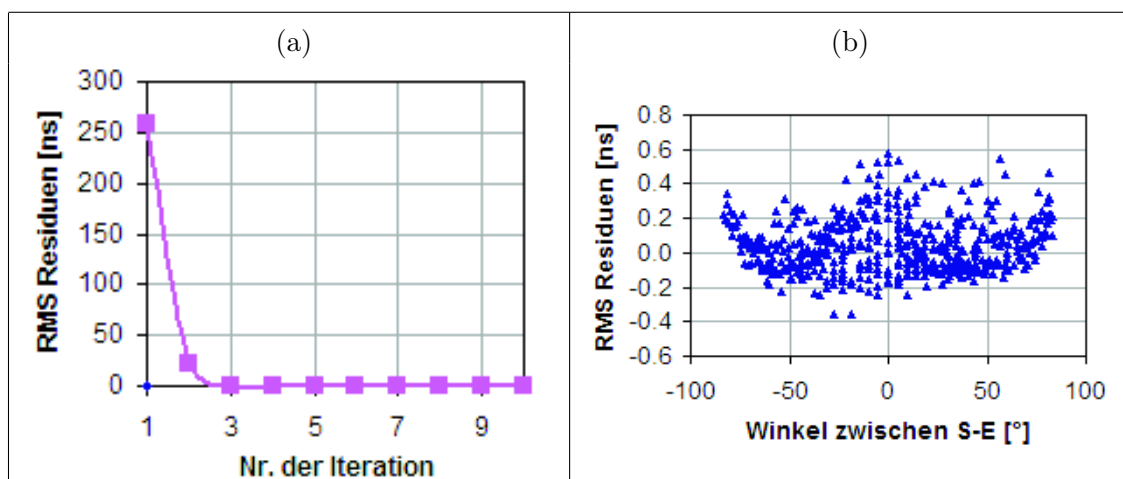
**Abbildung B.13:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Ultraschallmessung mit SO205 an Asterix, Schnitt B-B; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes



**Abbildung B.14:** Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt B-B mit 1,5 GHz



**Abbildung B.15:** Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt B-B mit 1,5 GHz; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



**Abbildung B.16:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Radarmessung an Asterix, Schnitt B-B mit 1,5 GHz; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

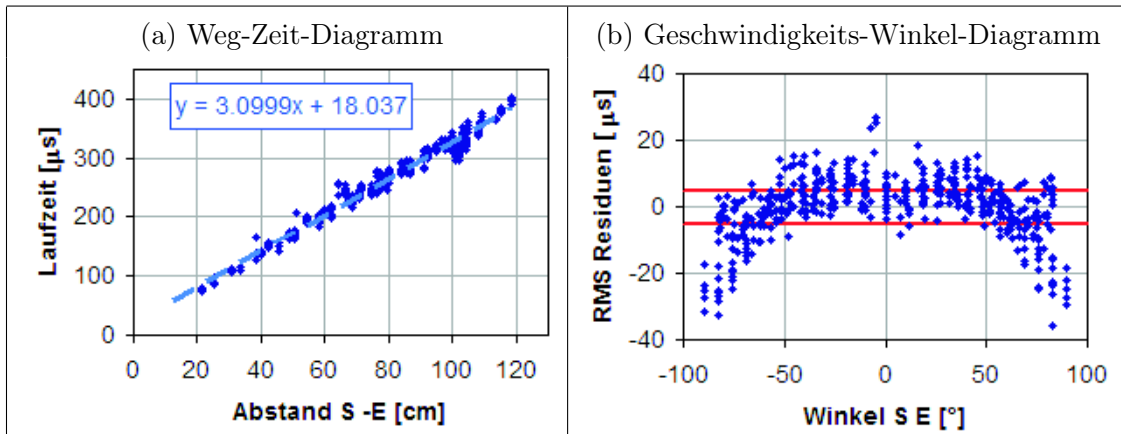


Abbildung B.17: Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt D-D

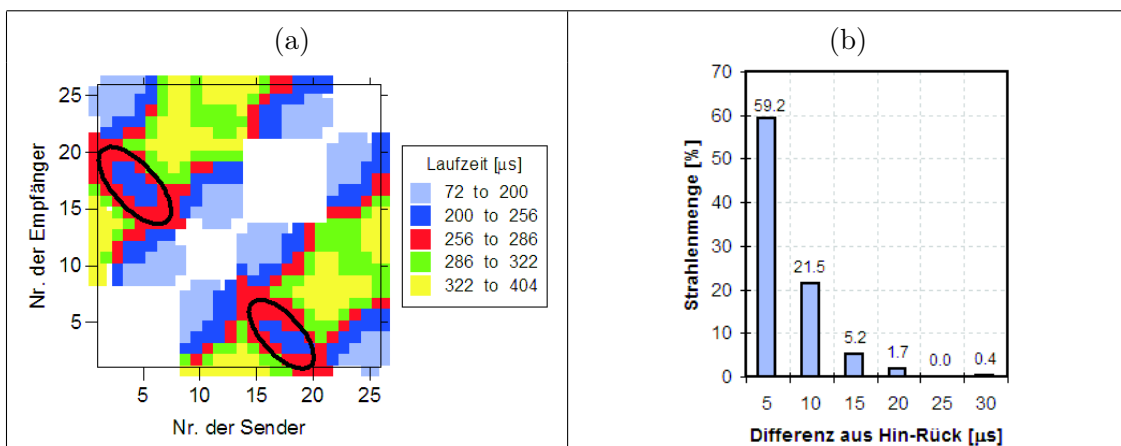
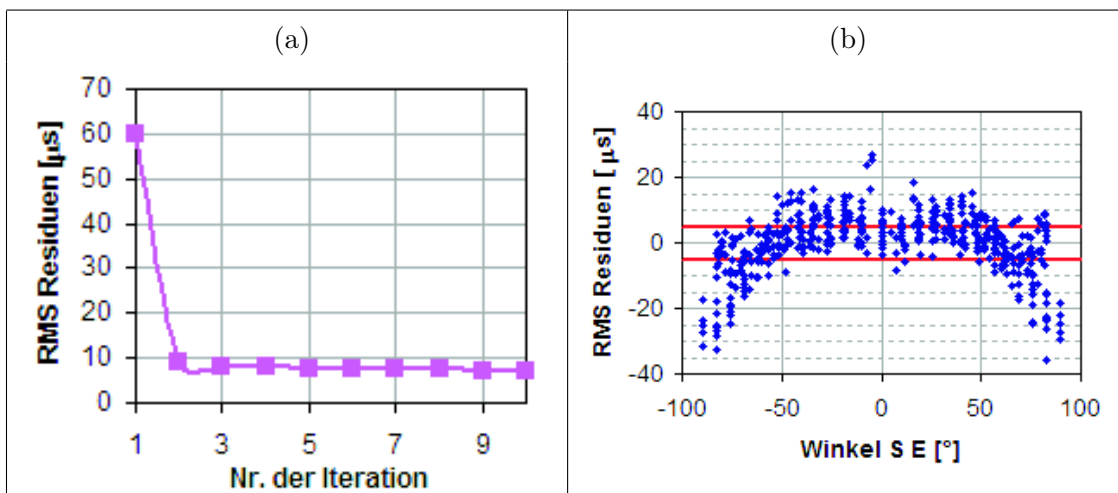
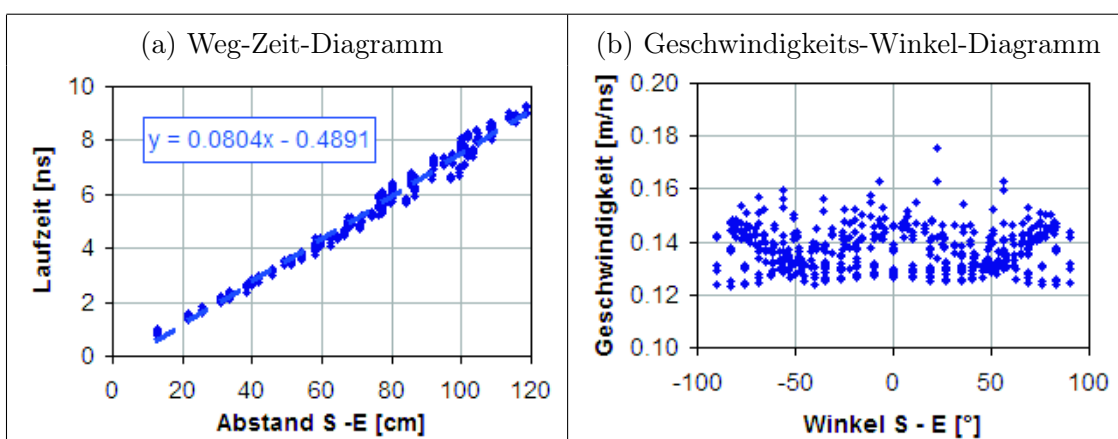


Abbildung B.18: Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt D-D; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg

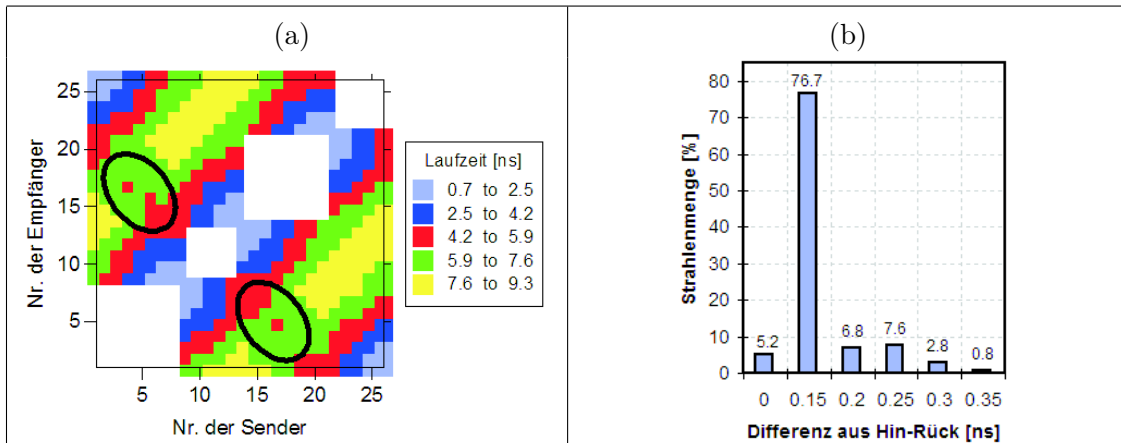


**Abbildung B.19:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Ultraschallmessung mit SO205 an Asterix, Schnitt D-D; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

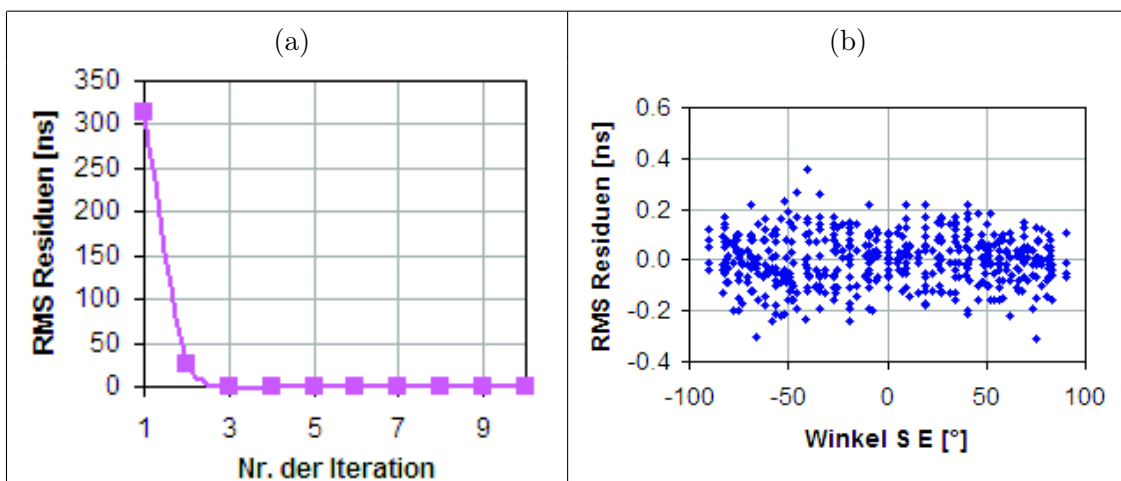


**Abbildung B.20:** Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt D-D mit 1,5 GHz





**Abbildung B.21:** Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt D-D mit 1,5 GHz; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



**Abbildung B.22:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Radarmessung an Asterix, Schnitt D-D mit 1,5 GHz; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

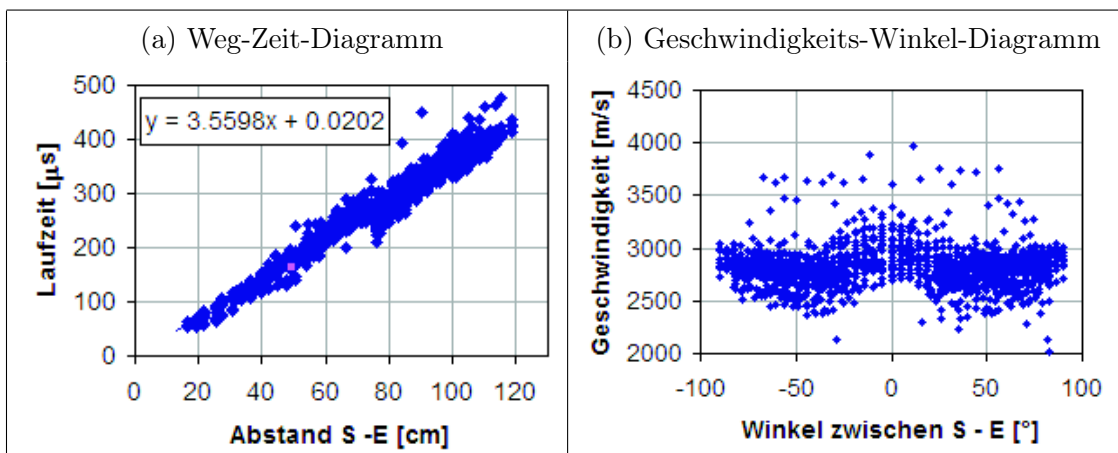


Abbildung B.23: Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt E-E

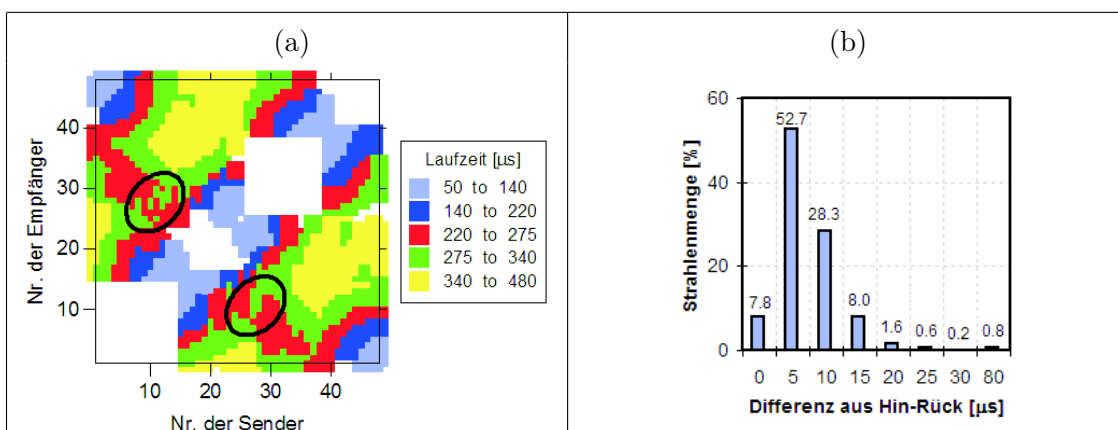
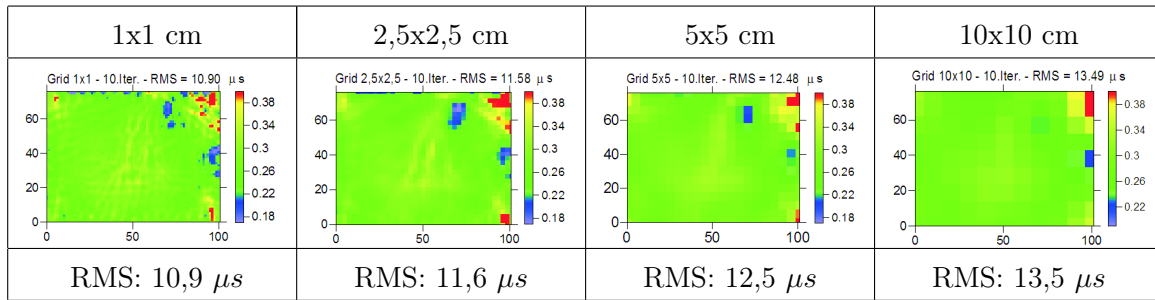
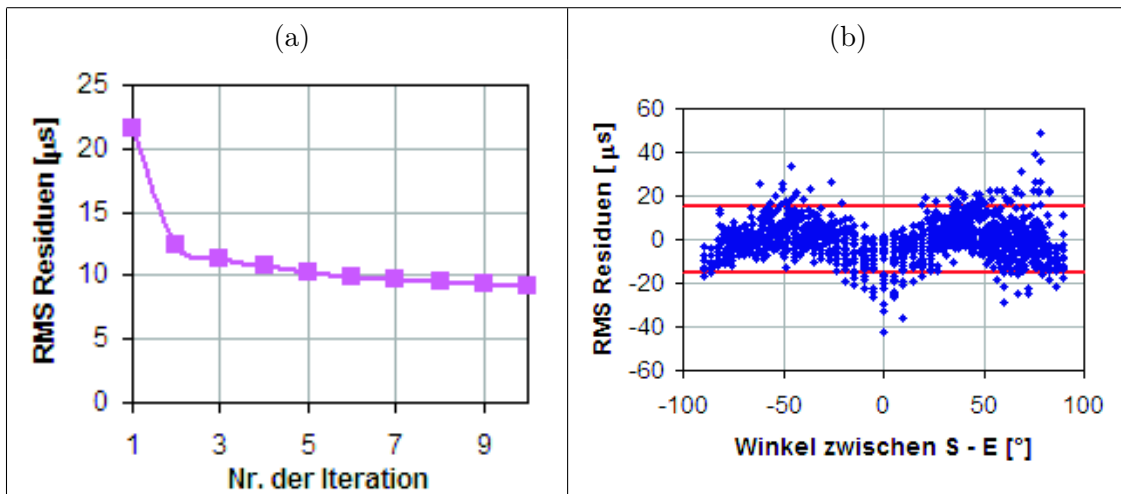


Abbildung B.24: Prüfung der Datenqualität, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt E-E; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



**Abbildung B.25:** Tomogramme mit unterschiedlichen Netzgrößen von 1x1 2,5x2,5, 5x5, 10x10 cm, Ultraschallmessung mit SO202 an Asterix, Schnitt E-E



**Abbildung B.26:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Ultraschallmessung mit SO205 an Asterix, Schnitt E-E; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

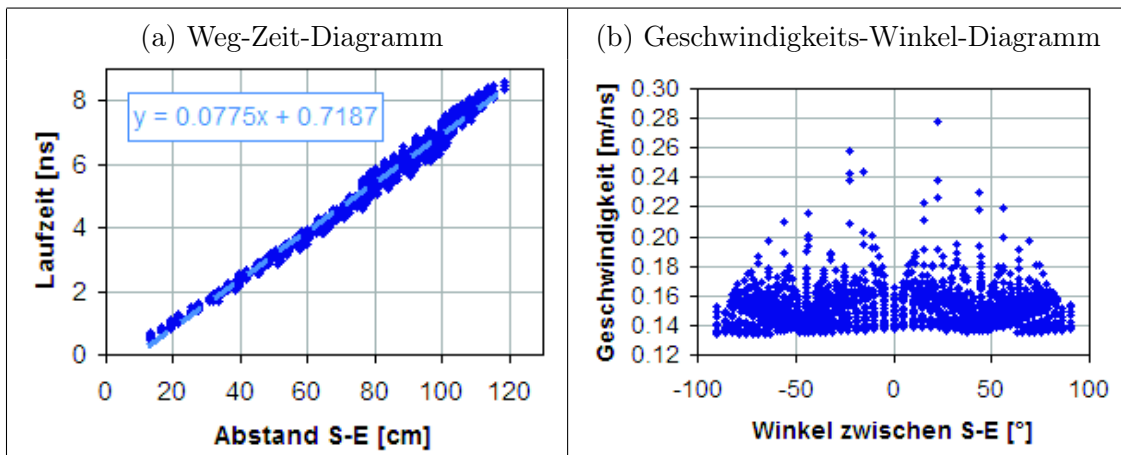


Abbildung B.27: Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt E-E mit 1,5 GHz

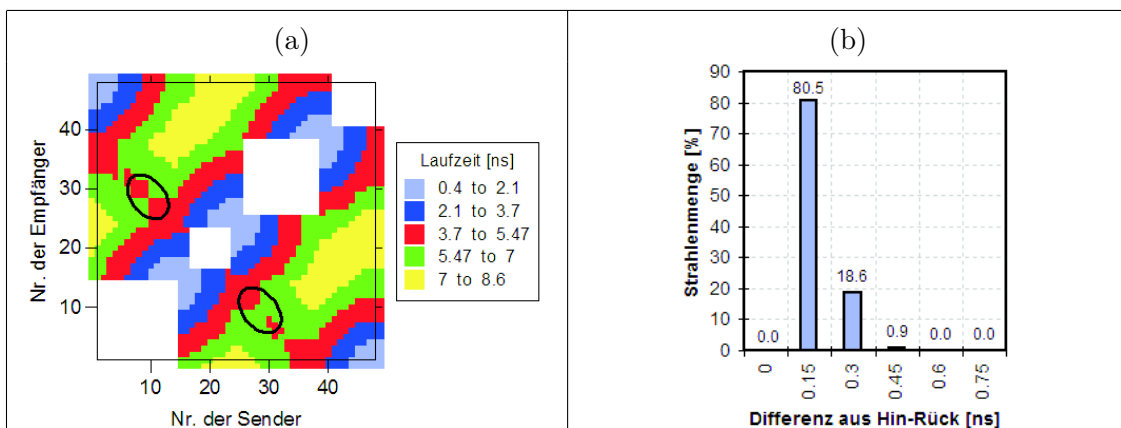
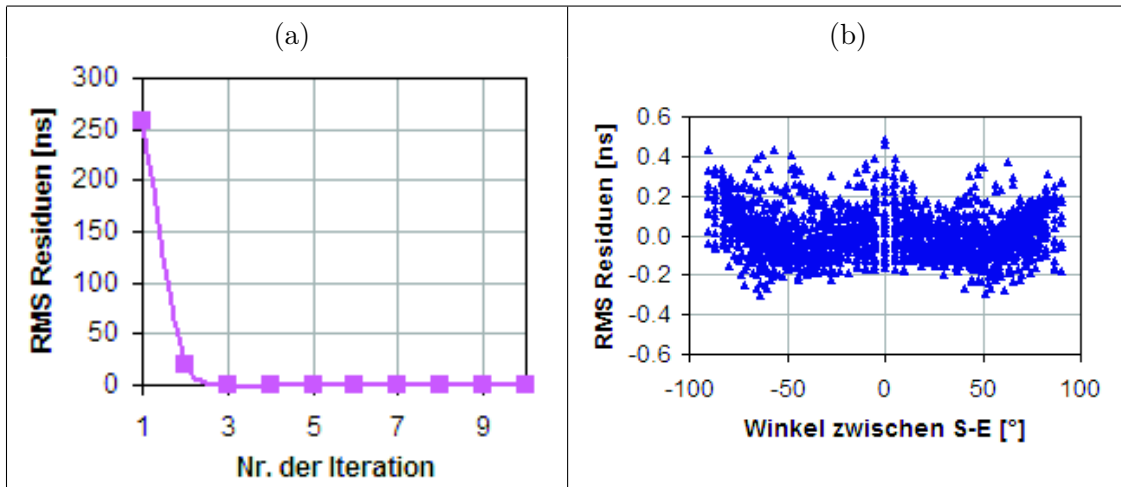
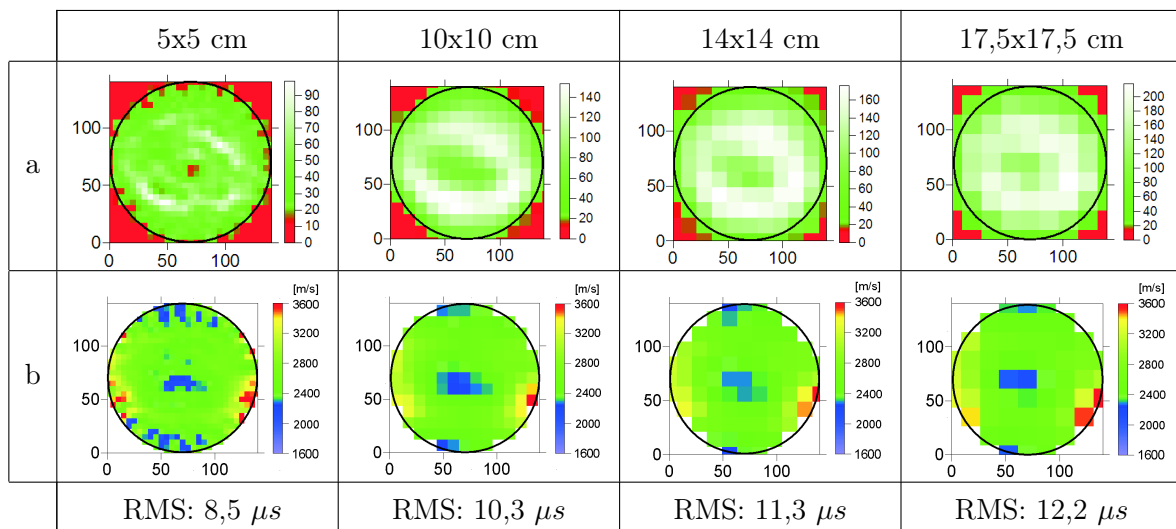


Abbildung B.28: Prüfung der Datenqualität, Radarmessung an Asterix, Schnitt E-E mit 1,5 GHz; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg



**Abbildung B.29:** Prüfung der Ergebnisstabilität - Radarmessung an Asterix, Schnitt E-E mit 1,5 GHz; (a) RMS-Residuen je Iterationsschritt; (b) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes



**Abbildung B.30:** Ultraschallmessung an Säule des Alten Museums mit SO202 - Suche nach der optimalen Netzgrößen von 5x5, 10x10, 14x14, 17x17; (a) Strahlenüberdeckung für verschiedene Netzgrößen; (b) dazugehöriger Rekonstruktion der Geschwindigkeitsverteilung



# Danksagung

Als erstes möchte ich meinen Eltern danken, die mir diesen Weg ermöglichten und mich bestärkt haben. Ein ganz großen Dank an Heide und Rolf Wendrich, die mich tatkräftig unterstützt haben und an Alexander, der jeder Zeit da war, mir den Rücken freigehalten und mich auch, wenn es nötig war, angetrieben und ermuntert hat.

Die Dissertation wurde betreut von Herrn Professor Kurt Kießl. Ich möchte ihm ganz besonders danken für die Begleitung der Arbeit und die nützlichen Diskussionen. Weiterhin möchte ich mich für die fruchtbare und herzliche Zusammenarbeit Herrn Professor Werner Leschnik bedanken, der durch seine sehr menschliche Art und analytischen Fähigkeiten wertvolle Unterstützung geleistet hat. Ich bin sehr dankbar über die Möglichkeit der Zusammenarbeit mit Herrn Professor Jens Tronicke, von dessen Fachkompetenz ich lernen und profitieren durfte. Es wäre sehr schön gewesen ihn von Anfang an als Betreuer dabei zu haben.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). An dieser Stelle ein ganz herzliches Dankeschön an meinen Fachgruppenleiter, Herrn Dr. Herbert Wiggerhauser und an alle meine Kollegen, die mich durch ihre Hilfs- und Diskussionsbereitschaft unterstützt haben und für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre. In dem Zusammenhang möchte ich Dr. Christiane Trela, Dr. Trond Ryberg, Dr. Peter Dietrich und Christian Köpp hervorheben, die die Arbeit gegengelesen, mein Wissen auf dem Gebiet der Geophysik erweitert und sich viel Zeit zu fachlichen Diskussionen genommen haben.





# Lebenslauf

Name: Astrid Wendrich, geb. Ziebolz  
Geburtsdatum: 25.07.1974  
Geburtsort: Leipzig

## AUSBILDUNG

09/90 - 08/93 Gymnasium in Leipzig, Abschluss: Abitur  
10/93 - 09/94 Praktika in Restauratoren-, Architektur- und Ingenieurbüros sowie einen Tonbaustoffhersteller  
10/94 - 02/00 Technischen Universität Dresden, Bauingenieurwesen, Konstruktiver Ingenieurbau, Abschluss: Diplom  
09/98 - 12/98 Auslandsstudium an der North Carolina State University, Raleigh, USA

## BERUFLICHER WERDEGANG

04/00 - 02/02 SIG Sachverständigen und Ingenieurgesellschaft  
03/02 - 01/09 BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
03/02 - 07/07 Promovend an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung



# Liste der Veröffentlichungen

- (1) Falci, M. (Vortragender), Maierhofer, Ch., Köpp, Ch., Wendrich, A.: Onsiteformasonry - Tecniche di indagine in situ per la valutazione strutturale degli edifici storici in muratura Vortrag: Restauro Ferrara, Italien, 25.03. - 28.03.2004
- (2) Kalisch, U., Wendrich, A., Maierhofer, Ch., Kuritz, M., Köpp, Ch., Hennen, Ch. (Vortragender): Konzeption, Aufbau und Untersuchung eines Mauerwerksprobekörpers Vortrag: Feuchtetag 2004 mit Workshop ONSITEFORMASONRY Berlin, 18.11. - 19.11.2004 (DGZfP-Berichtsband 91-CD) (2004) 91-CD; DGZfP; Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin ISBN 3-931381-59-5; 978-3-931381-59-2
- (3) Köpp, Ch., Maierhofer, Ch., Wendrich, A.: Entwicklung zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Untersuchung historischen Mauerwerks Zeitschriftenartikel: Das Mauerwerk 9 (2005) 3, 102-107; Ernst ISSN 1432-3427, 1437-1022
- (4) Köpp, Ch., Maierhofer, Ch., Wendrich, A.: ONSITEFORMASONRY - Ein Europäisches Projekt - Entwicklung zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Untersuchung und Bewertung historischen Mauerwerks Beitrag zu einem Sammelwerk: Feuchtetag 2004 mit Workshop Onsiteformasonry (DGZfP-Berichtsband 91-CD) (2004) 91-CD, 245-255; DGZfP; Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin ISBN 3-931381-59-5
- (5) Köpp, Ch., Maierhofer, Ch., Wendrich, A.: ONSITEFORMASONRY - Ein Europäisches Projekt, Entwicklung zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Untersuchung und Bewertung historischen Mauerwerks Poster: Feuchtetag 2004 mit Workshop ONSITEFORMASONRY Berlin, 18.11. - 19.11.2004 (DGZfP-Berichtsband 91-CD) (2004) 91-CD; DGZfP; Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin ISBN 3-931381-59-5
- (6) Maierhofer, Ch., Köpp, Ch., Wendrich, A.: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings - a European research project Beitrag zu einem Sammelwerk: Proceedings of the 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions (2004), 313-320; Taylor & Francis; Hrsg.: Lourenco & Roca, Modena ISBN 04-1536-379-9

- (7) Maierhofer, Ch. (Vortragender), Köpp, Ch., Wendrich, A.: Application of NDT and MDT methods to the assessment of historical structures - case studies of the EC project ONSITEFORMASONRY Vortrag: EC Clustering Workshop "Protecting Europe's Cultural Heritage through EU technological research" Brüssel, Belgien, 01.09. - 06.09.2004
- (8) Maierhofer, Ch. (Vortragender), Köpp, Ch., Wendrich, A.: Entwicklung zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Untersuchung und Bewertung historischen Mauerwerks Vortrag: 4. rescon, Erfurter Fachtagung für Konservierung und Restaurierung Erfurt, 28.11. - 30.11.2002
- (9) Maierhofer, Ch. (Vortragender), Köpp, Ch., Wendrich, A.: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings - a European research project Vortrag: Structural Analysis of Historical Constructions / 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions Padua, Italien, 10.11. - 13.11.2004
- (10) Maierhofer, Ch. (Vortragender), Köpp, Ch., Wendrich, A.: Verborgene Türen und vergessene Kaminschächte: Europäisches Projekt entwickelt neue Strategien zur zerstörungsfreien Untersuchung an Baudenkmalen Vortrag: BAM-Kolloquium Berlin, 26.01.2005
- (11) Maierhofer, Ch. (Vortragender), Wendrich, A., Köpp, Ch.: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings (EC-Project in the Environment and Sustainable Development Programme (EESD) Vortrag: 6th International Masonry Conference (6IMC) London, Großbritannien, 04.11. - 06.11.2002
- (12) Maierhofer, Ch. (Vortragender), Wendrich, A., Köpp, Ch.: ONSITEFORMASONRY - A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry Vortrag: NDT-CE 2003, International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering Berlin, 16.09. - 19.09.2003; (DGZfP-Berichtsband 85-CD) (2003) 85-CD; DGZfP; ISBN 3-931381-49-8
- (13) Maierhofer, Ch., Wendrich, A., Köpp, Ch.: ONSITEFORMASONRY - A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry Beitrag zu einem Tagungsband: ITECOM European Conference (2003); Hrsg.: National Technical University of Athens; 16.-17. Dezember 2003, Athen, Griechenland, im Druck
- (14) Maierhofer, Ch., Wendrich, A., Köpp, Ch., Falci, M.: Onsiteformasonry - Tecniche di indagine in situ per la valutazione strutturale degli edifici storici in muratura Beitrag zu einem Tagungsband: Catalogue Restauro (2004), 218-223; Hrsg.: Regione Toscana - Direzione generale delle Politiche formative, dei beni e delle attività culturali
- (15) Maierhofer, Ch., Ziebolz, A., Köpp, Ch.: On-site investigation techniques for the

- structural evaluation of historic masonry buildings (EC-Project in the Environment and Sustainable Development Programme (EESD) Beitrag zu einem Tagungsband: 6th International Masonry Conference 6 (2002)
- (16) Wendrich, A., Maierhofer, Ch., Hamann, M., Hennen, Ch., Knupfer, B., Marchisio, M., da Porto, F., Binda, L., Zanzi, L.: Zerstörungsfreie Struktur- und Feuchteuntersuchungen im Alten Museum in Berlin im Rahmen des EU-Projektes ONSITEFOR-MASONRY Beitrag zu einem Sammelwerk: Aktuelles zur Fassadeninstandsetzung - 15. Hanseatische Sanierungstage im November 2004 in Rostock-Warnemünde (2004), 10 Seiten; Huss-Medien ISBN 3-345-00876-9
- (17) Wendrich, A., Maierhofer, Ch., Kuritz, M., Köpp, Ch.: Aufbau eines historischen Mauerwerkskörpers ("Obelix") zur Bewertung von zerstörungsfreien Verfahren Poster: DACH-Jahrestagung 2004: ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung Salzburg, Österreich, 17.05. - 19.05.2004 (DGZfP-Berichtsband 89-CD) ISBN 3-931381-55-2
- (18) Wendrich, A., Maierhofer, Ch., Kuritz, M., Köpp, Ch.: Aufbau eines historischen Mauerwerkskörpers ("Obelix") zur Bewertung von zerstörungsfreien Verfahren Beitrag zu einem Sammelwerk: ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung (Berichtsband / Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. 89-CD) (2004) 89; DGZfP; Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung ISBN 3-931381-55-2
- (19) Wendrich, A., Maierhofer, Ch., Kuritz, M., Köpp, Ch., Kalisch, U.: Konzeption, Aufbau und Untersuchung eines Mauerwerksprobekörpers Beitrag zu einem Sammelwerk: Feuchtetag 2004 mit Workshop Onsiteformasonry (DGZfP-Berichtsband 91-CD) (2004) 91-CD, 107-116; DGZfP; Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin ISBN 3-931381-59-5
- (20) Wendrich, A., Trela, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch., Effner, U. A., Wöstmann, J.: Location of voids in masonry structures by using radar and ultrasonic traveltime tomography Beitrag zu einem Sammelwerk: 9th European Conference on NDT : ECNDT Berlin 2006 (DGZfP-Proceedings BB 103-CD) (2006) 103-CD; European Federation for Non-Destructive Testing ISBN 3-931381-86-2
- (21) Wendrich, A., Trela, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., Milmann, B.: Application of Ultrasonic and Radar Tomography for the Investigation of the Internal Structure of Masonry Beitrag zu einem Sammelwerk: NDT in progress : Meeting of NDT-Experts (2005), 299-313; Hrsg.: Ceska Spolecnost pro Nedestruktivní Testování ISBN 80-2387263-X
- (22) Wendrich, A., Trela, Ch. (Vortragender), Krause, M., Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., Milmann, B.: Application of ultrasonic and radar tomography for the investigation of the internal structure of masonry Vortrag: IIIrd Workshop of NDT in ProgressPrag, Tschechische Republik, 10.10. - 12.10.2005

- (23) Wendrich, A. (Vortragender), Maierhofer, Ch., Hamann, M., Hennen, Ch., Knupfer, B., Marchisio, M., da Porto, Binda, L., Zanzi, L.: Zerstörungsfreie Struktur- und Feuchteuntersuchungen im Alten Museum in Berlin im Rahmen des EU-Projektes ONSITEFORMASONRY Vortrag: 15. Hanseatische Sanierungstage: Aktuelle Entwicklungen zur Fassaden-Instandsetzung Rostock, 11.11. - 13.11.2004; Huss-Medien GmbH Verlag Bauwesen, Berlin, ISBN: 3-345-00876-9
- (24) Wendrich, A. (Vortragender), Trela, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch., Effner, U. A., Wöstmann, J.: Location of voids in masonry structures by using radar and ultrasonic traveltime tomography Vortrag: 9th European Conference on NDT Berlin, Germany, 25.09. - 29.09.2006; ISBN 3-931381-86-2
- (25) Wiggenhauser, H. (Vortragender), Helmerich, R., Niederleithinger, E., Maierhofer, Ch., Wendrich, A., Köpp, Ch.: A European research project for the condition assessment of railway bridges, on-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings Vortrag: Advanced Course on Non-Destructive Testing and Evaluation of Concrete Structures Chennai, India, 15.02.2007 Projekt-Nr.: 0211-IV-0498