

## 9. Messergebnisse & Auswertung

Um die vorangegangenen theoretischen Überlegungen zu untermauern, sind praktische Untersuchungen unumgänglich. Eine Vielzahl an Messungen wurde im Rahmen dieser Arbeit und während des EU-Projektes “ONSITEFORMASONRY“ durchgeführt. Diese setzen sich aus Reflexions- und Transmissionsmessungen zusammen, wobei hier nur auf die Ergebnisse der Transmissionsmessungen eingegangen werden soll. Die Tab. 9.1 liefert eine Übersicht aller Messungen, die in diesem Kapitel beschrieben werden.

**Tabelle 9.1:** Übersicht aller in den folgenden Kapiteln beschriebenen Messungen

Probekörper	Position	Messverfahren	Antenne/Prüfkopf mit Messfrequenz	Anomalie	Kapitel/Seite
W2	Linie 15	Ultraschall	SO202 - 25 kHz	Hohlstelle	9.1.1/S.72
			G0,2gc - 85 kHz		9.1.2/S.82
		Radar	GSSI - 1,5 GHz		9.1.3/S.86
			MALA - 1,6 GHz		9.1.4/S.91
Asterix	A-A	Ultraschall	SO202 - 25 kHz	Hohlstelle	9.1.5/S.95
		Radar	GSSI - 1,5 GHz		9.1.6/S.99
	B-B	Ultraschall	SO202 - 25 kHz	Hohlstelle	9.1.7/S.103
		Radar	GSSI - 1,5 GHz		9.1.8/S.106
	D-D	Ultraschall	SO202 - 25 kHz	Granit	9.2.1/S.110
		Radar	GSSI - 1,5 GHz		9.2.2/S.115
	E-E	Ultraschall	SO202 - 25 kHz	Holz	9.3.1/S.118
		Radar	GSSI - 1,5 GHz		9.3.2/S.123
Altes Museum	Säule	Radar	GSSI - 1,5 GHz und 900 MHz	Mörtel	9.4.1/S.126
		Ultraschall	SO202 - 25 kHz		9.4.2/S.132

## 9.1. Hohlstellen - luftgefüllte Einschlüsse

### 9.1.1. Messungen am Prüfkörper "W2" mit Ultraschall (25 kHz)

Das erste Beispiel stellt die Messungen am Laborprobekörper "W2" dar, welcher im Kap. 8.3.1, S.66 ausführlich vorgestellt wurde. Die Untersuchungsaufgabe war die Detektion von zwei luftgefüllten Hohlstellen mit den Maßen 19 x 13 x 20 cm (H x T x B). Der untersuchte Querschnitt von ca. 0,5 m x 1,1 m ist in Abb. 9.1 dargestellt. Die Auswertung der Daten erfolgt nach dem in Kap. 7.1.4 erläuterten Ablauf.

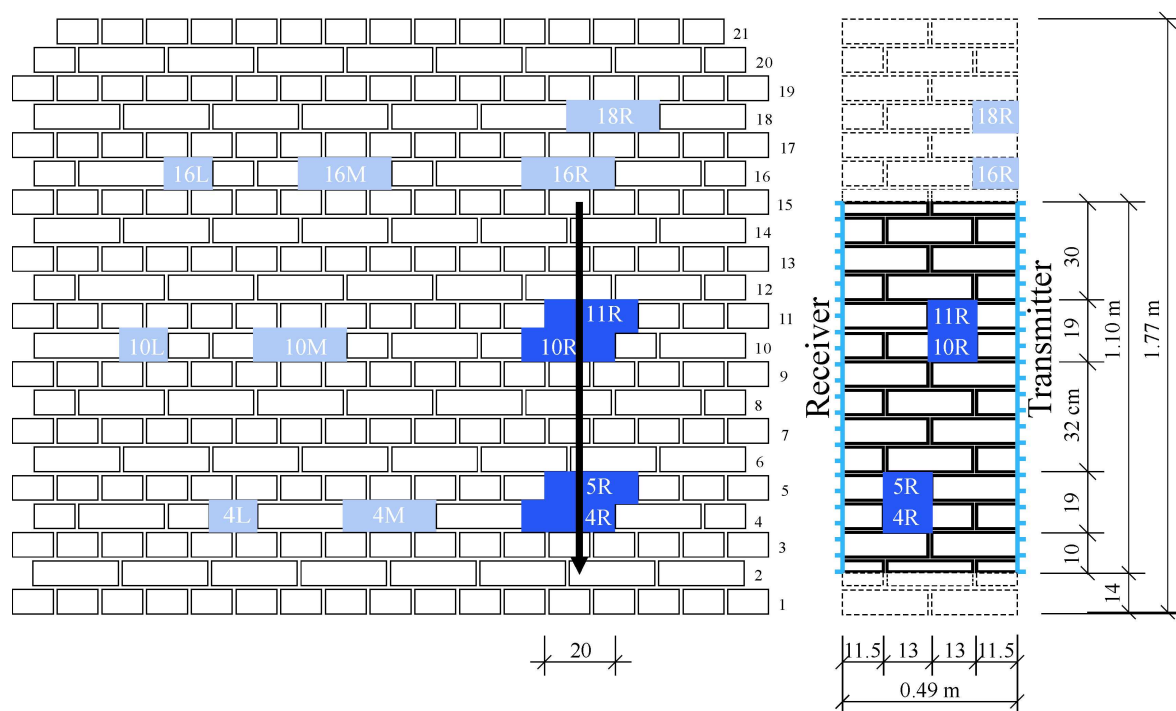


Abbildung 9.1: Probekörper W2, Ansicht und Schnitt des untersuchten Querschnitts

(a). **Simulation** Da der zu untersuchende Querschnitt bekannt war, wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. Mit dem Programm REFLEX wurden aus einem Modell mit den Angaben der Sender- und Empfängerpositionen Laufzeiten berechnet (Vorwärtsrechnung). Diese Laufzeiten wurde dann verwendet, um mit dem Programm GeoTom das ursprüngliche Modell wieder zu rekonstruieren. Die Laufzeiten wurden zum Einen für einen Querschnitt mit und zum Anderen ohne Hohlstellen berechnet.

Das verwendete Modell, die eingegebenen Parameter und das Tomogramm sind in Abb. 9.2 (a)-(b) dargestellt. Ebenfalls sind in Abb. 9.2 (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

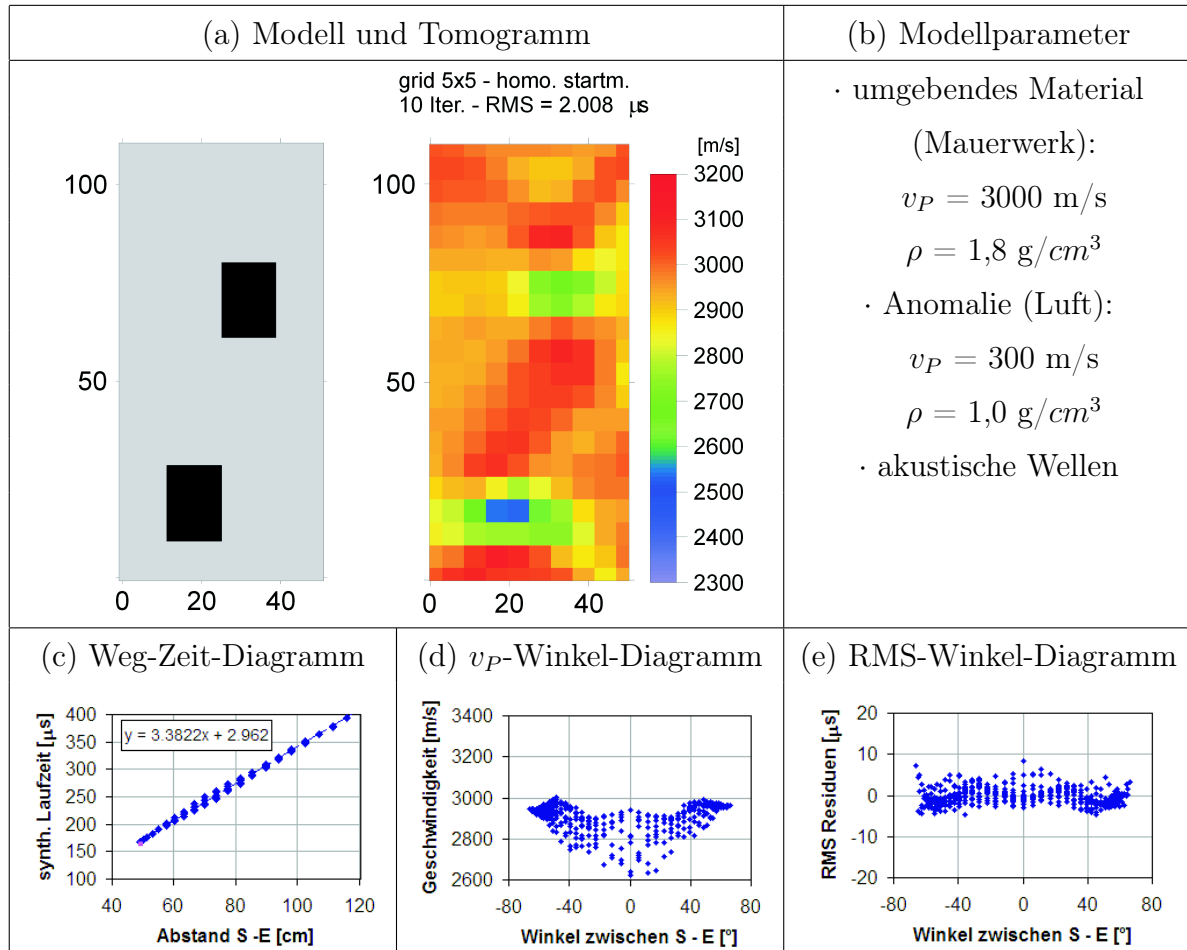
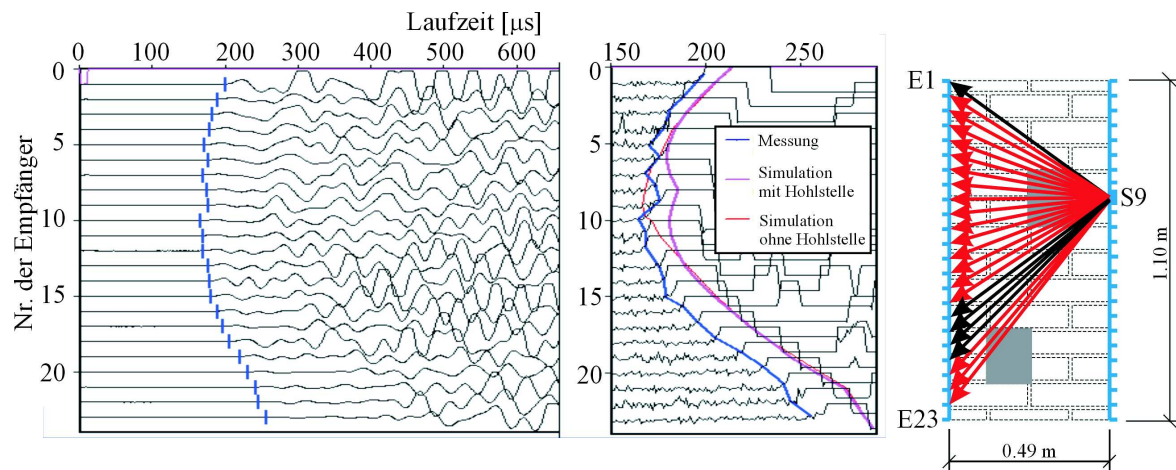


Abbildung 9.2: Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit akustischen Wellen - W2 Linie 15

Durch eine luftgefüllte Anomalie (Niedriggeschwindigkeitszone) verzögern sich die Ankunftszeiten der ersten Welle. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende Laufzeitverzögerung infolge der Anomalien von ca. 20  $\mu$ s. Diese Verzögerung ist demnach deutlich größer als der Messfehler von min. 4-5  $\mu$ s (siehe Kap. 7.4.2). Ein Prüfkopfabstand von 5 cm erwies sich als optimal, da die dafür erforderliche Messzeit noch in einem vertretbarem Rahmen lag und gleichzeitig der Abstand eng genug war, um erfolgsversprechende Ergebnisse zu liefern. Das bedeutet konkret, dass ca. 20 % der Strahlen um mehr als 4-5  $\mu$ s verzögert werden im Vergleich zu unbeeinflusste Strahlen.

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe SO202 mit Mittenfrequenz von 25 kHz durchgeführt.



**Abbildung 9.3:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 9 mit Empfängerposition Nr.1 bis 23 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

Da der Probekörper W2 Untersuchungen an Wänden unter Laborbedingungen wiedergeben soll, konnten die Prüfköpfe nur an gegenüberliegenden Seiten angebracht werden (Messprinzip wird in der Geophysik als “cross hole“ bezeichnet). Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 9 mit allen dazugehörigen Empfängerpositionen in Abb. 9.3 dargestellt. Man erkennt einen klaren Ersteinsatz, was auf ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zurückgeführt werden kann. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve sind die mit Reflex gepickten Laufzeiten der Messung. Die rote Kurve sind die simulierten Laufzeiten ohne den Einfluss von Anomalien (homogenes Medium) und die pinkfarbene Kurve stellen die simulierten Laufzeiten mit Hohlstellen dar. Der Verlauf der gemessenen Laufzeitkurve ist dem der simulierten Kurve mit Hohlstelle sehr ähnlich, jedoch um ca. 10-20  $\mu s$  verschoben. Somit muss in der Simulationsrechnung die Annahme für die Geschwindigkeit des umgebenden Materials von 3000 m/s für dieses Mauerwerk nach unten auf ca. 2700 m/s korrigiert werden. Vergleich man die simulierten Kurven, ist der Einfluss der Hohlstelle auf die Laufzeit zwischen der Empfängerposition 5 bis 12 zu erkennen. In diesem Bereich verlaufen die gemessene und die simulierte Kurve mit Hohlstelle ähnlich in Vergleich zur simulierten Kurve ohne Hohlstelle. Somit ist der Einfluss einer Laufzeitverzögerung auch in den gemessenen Daten wiederzufinden.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Im folgenden Schritt wurden die gemessenen Laufzeiten auf systematische Fehler nach dem Vorbild

von [Tronicke, 2002] überprüft. Die Abb. 9.4 zeigt das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm. Die prinzipielle Definition des Winkels  $\alpha$  ist der Abb. 9.5 zu entnehmen.

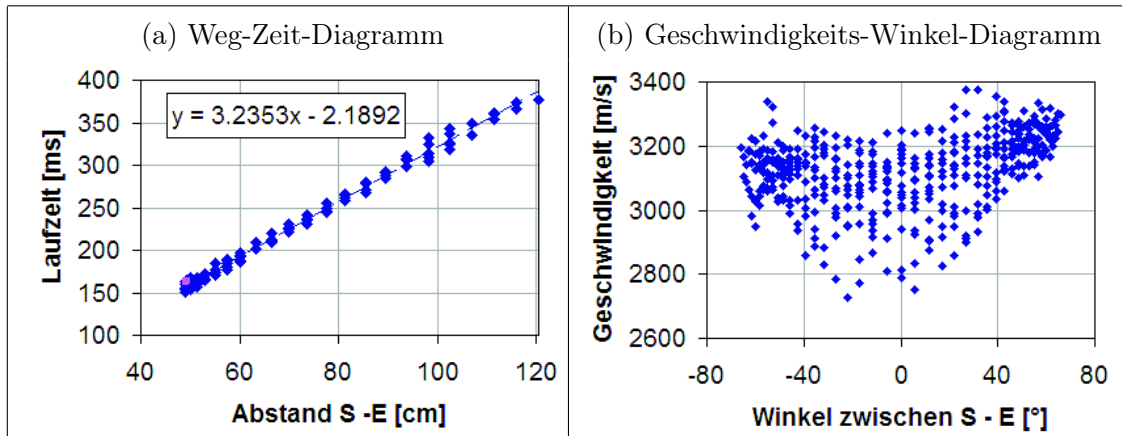


Abbildung 9.4: Prüfung der Datenqualität, Messung an W2 mit Ultraschallprüfköpfen SO202

Die Diagramme 9.4 zeigen keine systematische Fehler. Auffällig ist im Diagramm 9.4 (b) jedoch die zunehmende Streuung der Geschwindigkeiten mit kleiner werdendem Winkel zwischen Sender und Empfänger. Man könnte vermuten, dass es sich hier um eine winkelabhängigen Einfluss handelt. Ein Vergleich mit dem Diagramm 9.2 (b) der Simulationsrechnung zeigt ein ähnliches Verhalten. Der Grund dafür liegt in der Vorab-Berechnung der Geschwindigkeiten und der Laufwege. In der tomografischen Rekonstruktion werden erst die möglichen Geschwindigkeiten mit den dazugehörigen Laufwegen jedes einzelnen Strahls berechnet. Für die Prüfung der Datenqualität stehen diese Informationen jedoch noch nicht zur Verfügung. Deshalb muss auf die direkte, gradlinige Verbindung zwischen Sender und Empfänger zurückgegriffen werden. Somit ist der vorab berechnete Weg und die dazugehörige Geschwindigkeit nur eine Näherung. Diese Differenz wirkt sich (prozentual) auf kürzere Strecken stärker aus als auf längere. Ein kleiner werdendem Winkel zwischen Sender und Empfänger entspricht einer kleiner werdenden Wegstrecke zwischen beiden (siehe

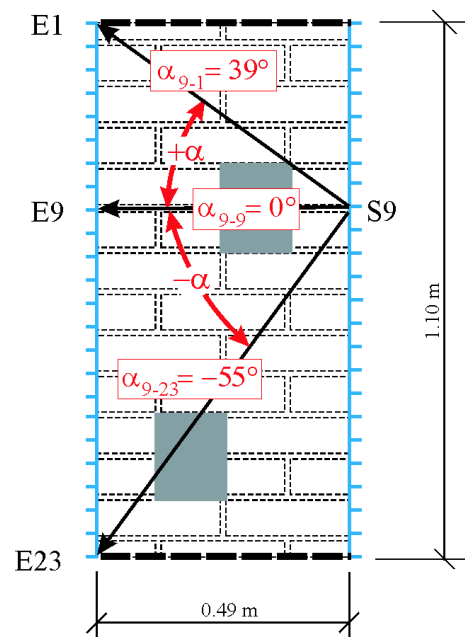
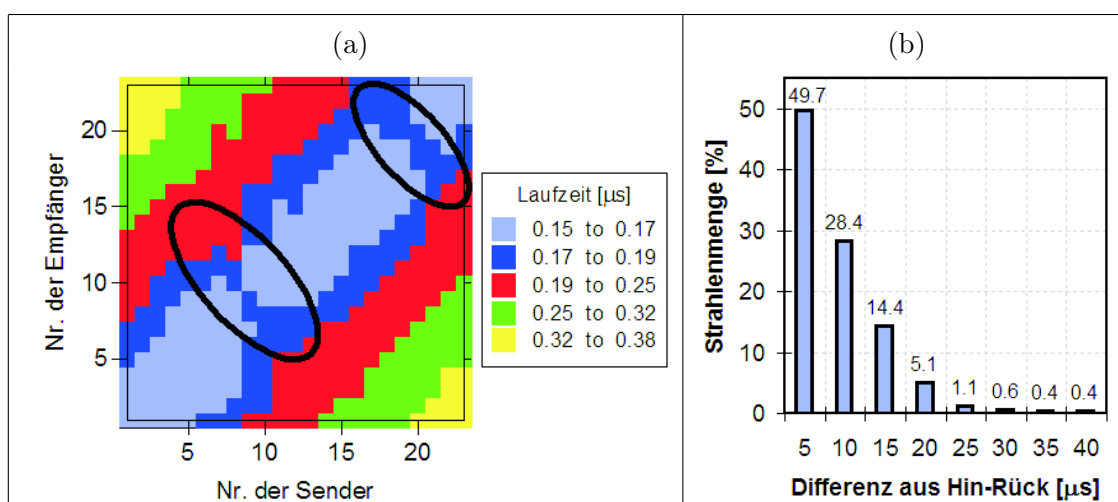


Abbildung 9.5: Definition des Winkels  $\alpha$

Abb. 9.5). Damit ist die stärkere Streuung der Geschwindigkeiten für kleinere Winkel erklärbar.

Die Darstellung 9.6 (a) zeigt die Laufzeit jeder Sender-Empfänger Kombination. Sogar der Einfluss der Anomalie ist sichtbar. Zu erkennen ist dies an den Unterbrechungen (höhere Laufzeiten) des schwarzen Bereiches (niedrigere Laufzeiten), der diagonal verläuft. Im Histogramm 9.6 (b) ist der Betrag der Differenz zwischen Hin- und Rückweg dargestellt. Die Hälfte aller Daten weichen weniger als  $5 \mu s$  (= Messfehler) voneinander ab und ca. 95 % der Daten haben eine Abweichung von weniger als  $15 \mu s$ . Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander, womit das Gesetz von Fermat (Reziprozität) erfüllt ist. Da durch die Datenchecks keine systematischen Fehler oder größere Ausreißer auffällig sind, müssen vorab keine Daten eliminiert werden.

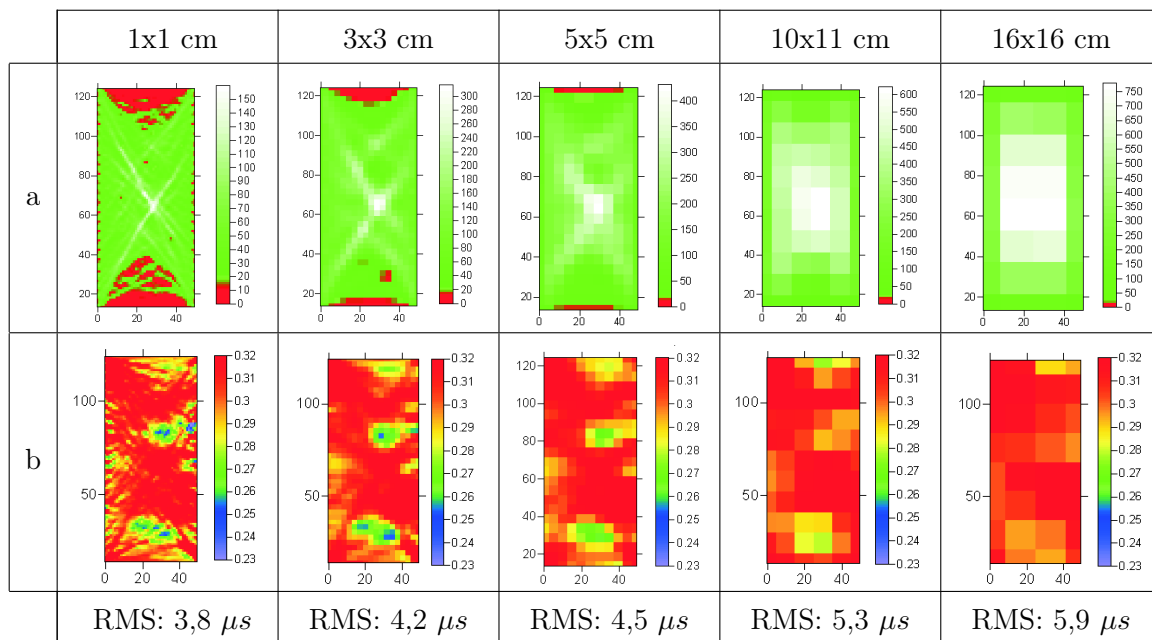


**Abbildung 9.6:** Prüfung der Datenqualität, Messung an W2 mit Ultraschallprüfköpfen SO202; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Danach wurden die Laufzeiten und deren Sender- und Empfängerpositionen mit dem Programm GeoTom rekonstruiert. Zunächst wurde als Startmodell eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 3000 m/s angenommen. Die Elementgrößen lagen bei 1x1 cm, 3x3 cm, 5x5 cm, 10x11cm und 16x16 cm. Nach 10 Iterationen wurden die Berechnungen jeweils abgebrochen, da sich nach 5-10 Iterationen die RMS-Residuen erfahrungsgemäß nicht mehr wesentlich ändern.

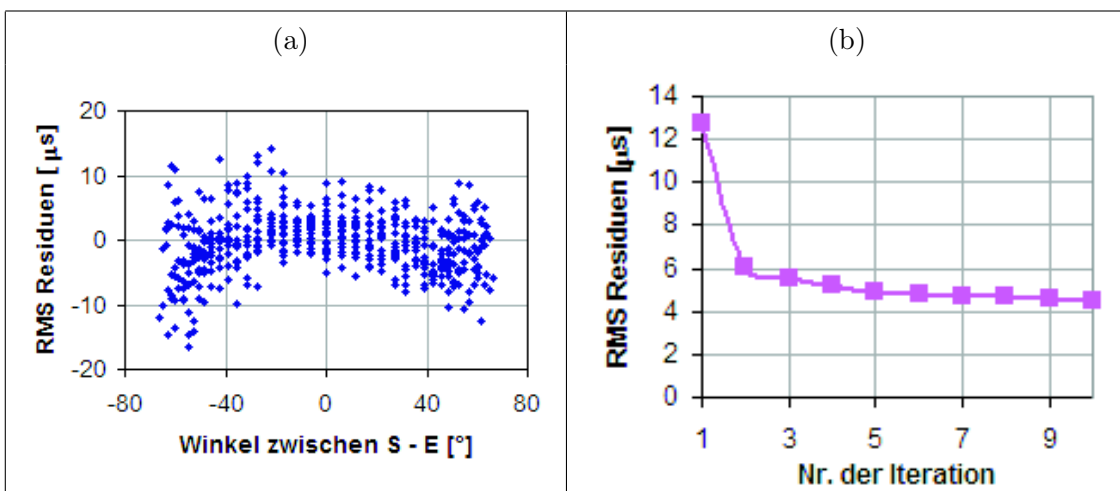
In Abb. 9.7 (a) ist die Strahlenüberdeckung (Anzahl der Strahlen je Element) für die jeweiligen Netze dargestellt. Die rot markierten Elemente werden von weniger als 10

Strahlen durchquert. Um eine solide Geschwindigkeitsangabe jedes Elementes gewährleisten zu können, ist eine Faustregel, dass wenigstens 10 verschieden geneigte Strahlen ein Element durchqueren sollten (siehe Kap. 7.1.4). Man nennt diese roten Bereiche schlecht überdeckt und die Geschwindigkeit kann nur bedingt wiedergegeben werden. Es kehren in allen Tomogrammen der Abb. 9.7 (b) zwei signifikante Anomalien wieder, die niedrigere Geschwindigkeiten aufweisen. Die Tatsache, dass sie sich nicht unmittelbar am den Rändern befinden, schließt Artefakte eher aus. Als optimales Netz wurde die Größe 5x5 cm ausgewählt. Die Netzgröße wurde aus folgenden Gründen ausgewählt: (1.) der RMS-Fehler von  $4,5 \mu s$  liegt im Größenbereich des Messfehlers von  $4-5 \mu s$ , (2.) die Strahlenüberdeckung ist für die meisten Elemente gute, bei gleichzeitig genügend großer Auflösung des Querschnitts und (3.) die Anzahl und Größe an Artefakten ist im Vergleich zu den anderen Ergebnissen reduziert.



**Abbildung 9.7:** Suche nach der optimalen Netzgrößen von 1x1, 3x3, 5x5, 10x11, 16x16; (a) Strahlenüberdeckung für verschiedene Netzgrößen; (b) dazugehöriger Rekonstruktion der Geschwindigkeitsverteilung

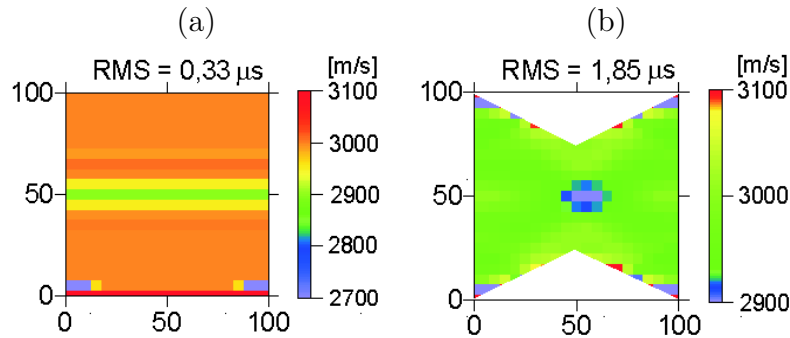
(e). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** In Abb. 9.8 (a) sind die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination des 10. Iterationsschrittes dargestellt. Sie zeigen keine wesentliche Winkelabhängigkeit. Ein Ergebnis wird als stabil bezeichnet, wenn die RMS-Residuen je Iteration divergieren und kleine Änderungen der Ausgangsdaten keine wesentlichen Änderungen des Ergebnisses bewirken. Die letzte Forderung wurde überprüft, indem zufällig ausgewählten Sender-Empfänger-Kombinationen weggelassen wurden. Die Ergebnisse dieses und des kompletten Datensatz waren sehr ähnlich. Die Abb. 9.8 (b) zeigt die Veränderung der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt. Der Verlauf ist stetig abnehmend. Somit sind die Stabilitätskriterien erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.



**Abbildung 9.8:** Messung an W2 mit Ultraschall - Diagramme zur Prüfung der Ergebnisstabilität; (a) RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes; (b) RMS-Residuen je Iterationsschritt

(f). **Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen** Man kann einen Datensatz immer in Datengruppen, sogenannte Teildatensätze, zerlegen. Diese Teildaten tragen spezielle, ihnen typische Informationen, die in einen gesamten Datensatz durch andere Informationen überlagert werden können. Durch eine gezielte Auswahl von bestimmten Datengruppen soll diese Informationen visualisiert werden, um mögliche Artefakte oder Anomalien besser erkennen zu können. In [Becht, 2004] wurde die Funktion der gezielte Auswahl von bestimmten Teildatensätzen für ein Beispiel ausführlich dargelegt. Der Nachteil der gezielte Auswahl bestimmter Datengruppen ist, dass sich die Datenmenge verringert. Man verliert andere Informationen, die Strahlendichte wird geringer, Bereiche werden weniger gut überdeckt und Artefakte treten vermehrt auf. Somit muss ein Optimum aus beiden Faktoren gefunden werden.



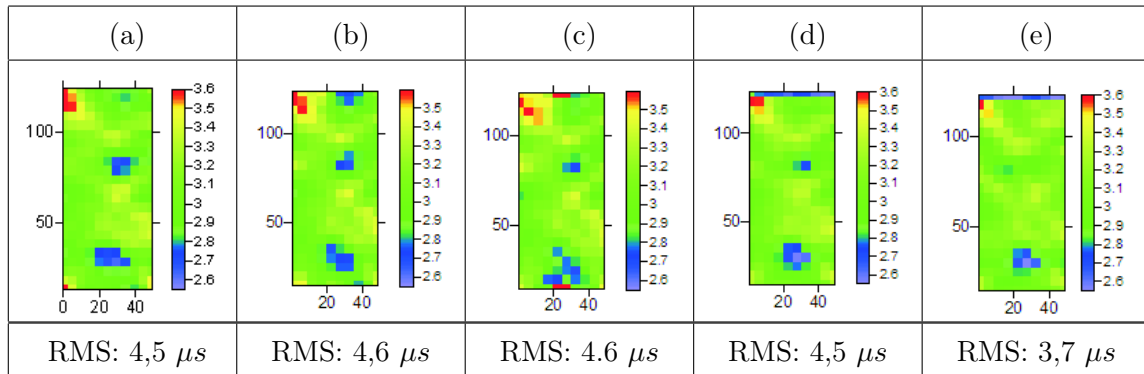


**Abbildung 9.9:** Tomogramm einer fiktiven Ultraschallmessung; (a) nur horizontale Strahlen; (b) nur geneigte Strahlen

Zum Vergleich wie sich ein veränderter Datensatz auf die Ergebnisse auswirkt ist in Abb. 9.10 (a) das Tomogramm mit dem kompletten Daten (Netz: 5x5 cm) dargestellt, wie es auch in Abb. 9.7 (b) zu finden ist. Lediglich wurde die Legenden zur bessern Vergleichbarkeit angepasst.

Hier wurden zwei Datengruppen ausgewählt:

- (1) Daten mit geneigten Strahlen. Für diesen Fall wurden nur Laufzeiten der Sender-Empfänger Kombinationen ausgewählt, deren Winkel größer als  $11^\circ$  bzw.  $22^\circ$  sind. Somit fällt die Gruppe der sich horizontal gegenüberliegender Strahlen heraus. Diese horizontalen Strahlen bewirken ein horizontales verschmieren einer abgegrenzten Anomalie, wie in Abb. 9.9 (a) zu sehen ist. Schräge Strahlen können auf Grund ihres vertikalen Anteils Anomalien auch besser vertikal auflösen wie Abb. 9.9 (b) zeigt. Durch diese Auswahl an Daten soll eine bessere Abgrenzung der Anomalien erreicht werden. Das Tomogramm in Abb. 9.10 (b) zeigt das Ergebnis des Teildatensatzes im dem alle Strahlenwinkel, die größer als  $11^\circ$  sind zusammengefasst wurden. In der Abb. 9.10 (c) ist das Ergebnis der Auswahl vom Strahlenwinkeln, die größer sind als  $22^\circ$  ersichtlich.
- (2) Daten deren Laufzeitdifferenz zwischen Hin- und Rückweg klein sind. D.h. es wurden Daten ausgewählt, die zum Einen eine Abweichung kleiner als 6 % (entspricht ca.  $20 \mu s$ ) und zum Anderen eine geringere Abweichung als 2 % (entspricht ca.  $5 \mu s$ ) besitzen. Durch diese Auswahl soll die Sicherheit erhöht werden, den richtigen Einsatzpunkt bestimmt zu haben und Ausreißer ausschließen. In Abb. 9.10 (d) ist das Ergebnis der Auswahl von Daten, die eine geringere Laufzeitdifferenz als 6 % voneinander aufweisen, dargestellt. Der Abb. 9.10 (e) liegen ein Teildatensatz zugrunde, deren Laufzeitdifferenzen kleiner 2 % sind.



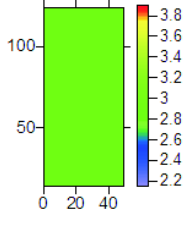
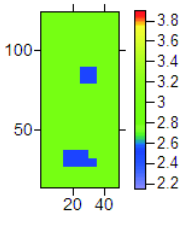
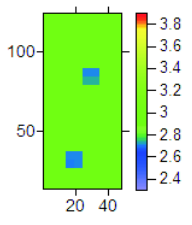
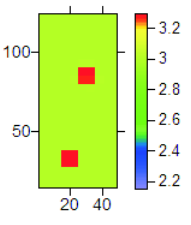
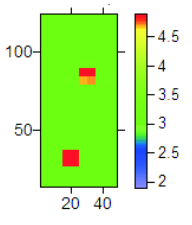
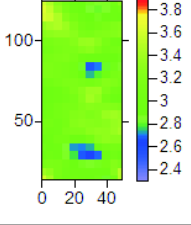
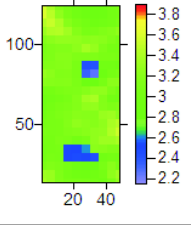
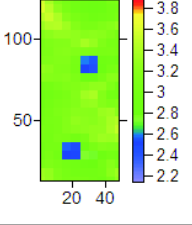
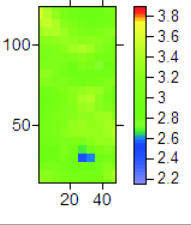
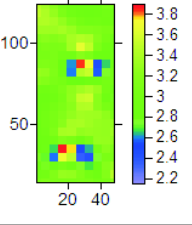
**Abbildung 9.10:** tomografische Rekonstruktion mit Teildaten; (a) Tomogramm mit allen Daten; (b) nur Daten, deren Strahlenwinkel größer als  $11^\circ$ ; (c) nur Daten, deren Strahlenwinkel größer als  $22^\circ$ ; (d) nur Daten mit einer Differenz zwischen Hin- und Rückweg kleiner als 6 %; (e) nur Daten mit einer Differenz zwischen Hin- und Rückweg kleiner als 2 %

Vergleicht man die Abb. 9.10 (b) bis (e) mit dem Ergebnis des kompletten Datensatzes in (a), sind die Anomalien nicht deutlicher erkennbar. Stattdessen wird die obere Anomalie schwächer.

Zusammenfassend kann man für diese Untersuchung sagen, dass durch die gezielte Auswahl bestimmter Daten nicht der gewünschte Erfolg einer klareren Abbildung der Anomalien erreicht werden konnte. Jedoch bilden sich in allen Tomogrammen mehr oder weniger klar und an ähnlichen Stellen Niedriggeschwindigkeitszonen aus. Sie liegen in geraumer Entfernung von Rand. Diese beiden Aspekte lassen darauf schließen, dass die Anomalien tatsächlich vorhanden sind. Auf Grund dieser Erkenntnis ist eine Anpassung des Startmodells zulässig.

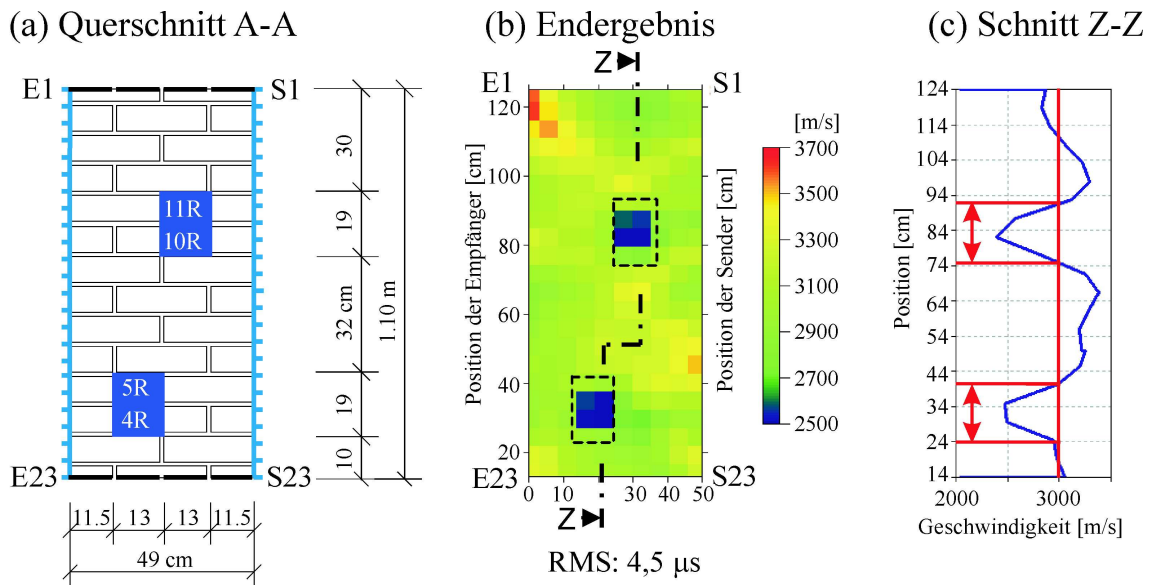
**(g). Experimentelle Untersuchung - Anpassung des Startmodells** Die Anpassung des homogenen Startmodells erfolgte durch eine Geschwindigkeitssenkung von einzelnen Elementen des Netzes. In Abb. 9.11 sind die veränderten Startmodelle und die dazugehörigen tomografischen Rekonstruktionen dargestellt. Mit dem Startmodell 4 lässt sich das klarste Ergebnis erzielen. Weiterhin wurde zur Überprüfung eine Hochstatt einer Niedriggeschwindigkeitszone an gleicher Stelle vorgegeben (Startmodell 5 und 7). Erst für sehr hohe Geschwindigkeiten von 5000 m/s bilden sich zwei Hochgeschwindigkeitszonen aus (siehe Startmodell 7). Im direkten Umfeld sind starke Niedriggeschwindigkeitszonen auffällig, die in dieser Stärke für Artefakte ungewöhnlich sind. Weiterhin steigen die RMS-Residuen an. Die Überprüfung zeigt, dass es sich an diesen Stellen nicht um Hochgeschwindigkeitszonen handeln kann.

**(h). Experimentelle Untersuchung - Das Endergebnis** Die Abb. 9.12 zeigt das gesicherte Endergebnis nach allen durchgeführten Tests. Es wurde der komplette Da-

Nr.	1	2	4	5	7
Startmodell					
$v_u$	3000 m/s	3000 m/s	3000 m/s	3000 m/s	3000 m/s
$v_a$	3000 m/s	2500 m/s	2700 m/s	3300 m/s	4900 m/s
Tomogramm					
RMS	4,5 $\mu s$	4,5 $\mu s$	4,5 $\mu s$	4,8 $\mu s$	5,1 $\mu s$

**Abbildung 9.11:** Veränderung des Startmodells mit dazugehörigen Tomogrammen und der gewählten Parameter ( $v_a$  ... Geschwindigkeit der Anomalie,  $v_u$  ... Geschwindigkeit der Umgebung und RMS-Residuen)

tensatz verwendet. Die Rekonstruktion erfolgte mit dem angepasste Startmodell Nr. 4 und einer Netzgröße von 5x5 cm. Das Ergebnis lässt sich qualitativ durch das Signal-Rausch-Verhältnis beurteilen. Dazu wurde der Schnitt A durch das Tomogramm gelegt. Die beiden Anomalien weisen eine mittlere Geschwindigkeit von 2502 m/s auf. Die durchschnittliche Geschwindigkeiten der Umgebung liegen bei 3118 m/s. Das ergibt ein Signal-Rausch-Verhältnis von  $2502/3118 \approx 0,8$ . Die Geschwindigkeit der Anomalie ist um ca. 20 % langsamer als die ihrer Umgebung (Rauschen). Somit unterscheiden sie sich signifikant von ihrer Umgebung. Die Größe der Anomalien kann mit Hilfe des Signal-Rausch-Verhältnisses, den Schnitten durch das Tomogramm und die tomografische Rekonstruktion auf ca. 10x10 cm bestimmt werden.



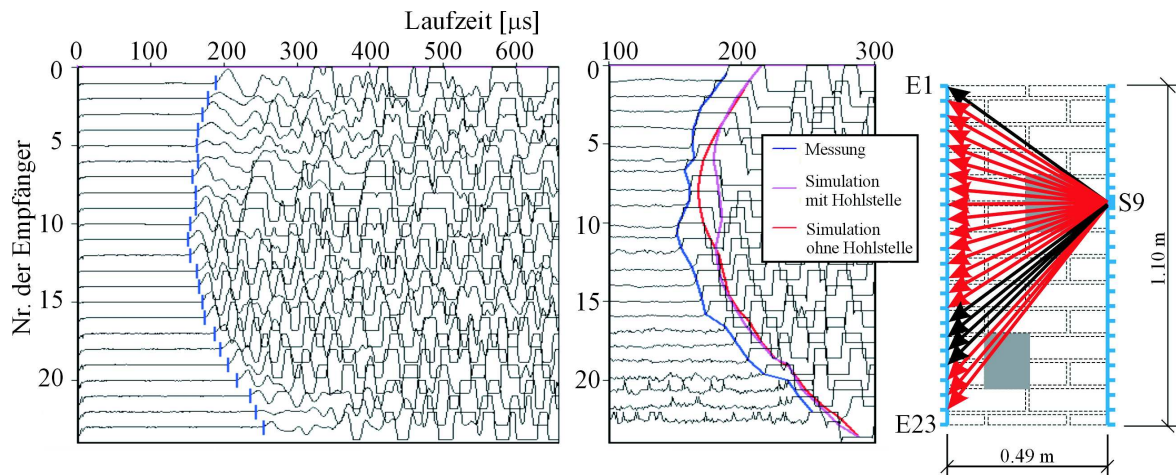
**Abbildung 9.12:** Endergebnis der Ultraschallmessung mit den Prüfköpfen SO202 (25 kHz) an W2; Startmodell Nr. 4, Netzgröße 5x5 cm, 10 Iterationen

### 9.1.2. Messungen am Prüfkörper “W2“ mit Ultraschall (85 kHz)

Die Messung erfolgte an den gleichen Positionen wie das vorangegangene Beispiel erläutert. Mit dem einzigen Unterschied, dass andere Prüfköpfe mit einer höheren Frequenz verwendet wurden. Die höhere Frequenz von 85 kHz bewirkt eine kürzere Wellenlänge, womit die Auflösung des untersuchten Querschnitts verbessert werden soll. Das hat allerdings auch zur Folge, dass diese Wellen stärker an Grenzflächen reflektiert und geschwächt werden und somit weniger transmittiert wird. Das wirkt sich auf ein schlechteres Signal-Rausch Verhältnis aus mit der Konsequenz, dass der Ersteinsatz der transmittierten Welle schlechter bis gar nicht bestimmbar wird.

**(a). Simulation** Das Programm REFLEX bietet zwei Möglichkeiten an Messungen zu simulieren. Hier wurde die zeitsparendere Variante gewählt, die auf der Annahme sehr kleiner Wellenlängen basiert. Somit spielt die Frequenz der Welle für die Simulation keine Rolle. Es unterscheidet nur zwischen akustischen, seismischen und elektromagnetischen Wellen. Deshalb liegt hier die gleiche Simulationsrechnung zugrunde wie für die vorangegangene Messung (siehe Kap. 9.1.1 (a)).

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven** Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe G0,2gc durchgeführt.



**Abbildung 9.13:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 9 mit Empfängerposition Nr.1 bis 23 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

Wie schon in der vorangegangenen Messung beschrieben, befanden sich die Prüfköpfe auf den gegenüberliegenden Seiten. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu vermitteln, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 9 mit allen dazugehörigen Empfängerpositionen in Abb. 9.13 dargestellt. Die Ersteinsätze sind erkennbar, wenn auch weniger deutlich als bei den niederfrequenten Prüfköpfen SO202. Im Vergleich dazu ist die Flanke der ersten Welle weniger steil, was eine schlechtere Bestimmung des Ersteinsatzes zur Folge hat. Das Signal-Rausch Verhältnis ist ebenfalls deutlich schlechter (ca. 10-fach stärker). Das trifft im besonderen Maße auf die letzten 4 Empfängerpositionen zu, die auch die längsten Laufwege und steilsten Winkel zwischen Sender und Empfänger im Vergleich zu den anderen Positionen aufweisen. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve sind die mit Reflex gepickten Laufzeiten der Messung. Die rote Kurve sind die simulierten Laufzeiten ohne den Einfluss von Anomalien (homogenes Medium) und die pinkfarbene Kurve stellen die simulierten Laufzeiten mit Hohlstellen dar. Der Verlauf der gemessenen Laufzeitkurve ist dem der simulierten Kurve mit Hohlstelle sehr ähnlich, jedoch um ca.  $20 \mu s$  verschoben. Besonders große Abweichungen zu den simulierten Laufzeiten ohne Hohlstelle (rote Kurve) sind im Bereich zwischen Empfängerposition Nr. 5 bis 12 erkennbar. In diesem Bereich ist der Einfluss der Hohlstelle auf die Laufzeit zu erkennen.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Die Abb. B.1 auf der Seite 175 zeigt (a) das Weg-Zeit-Diagramm und (b) das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm. Die Streuung der Geschwindigkeiten im Diagramm B.1 (b) wurde bereits in der vorangegangenen Messung (siehe Kap. 9.1.1 (c)) erläutert. Die Darstellung B.1 (c) zeigt die Laufzeit jeder Sender-Empfänger Kombination. Der Einfluss der Anomalie ist

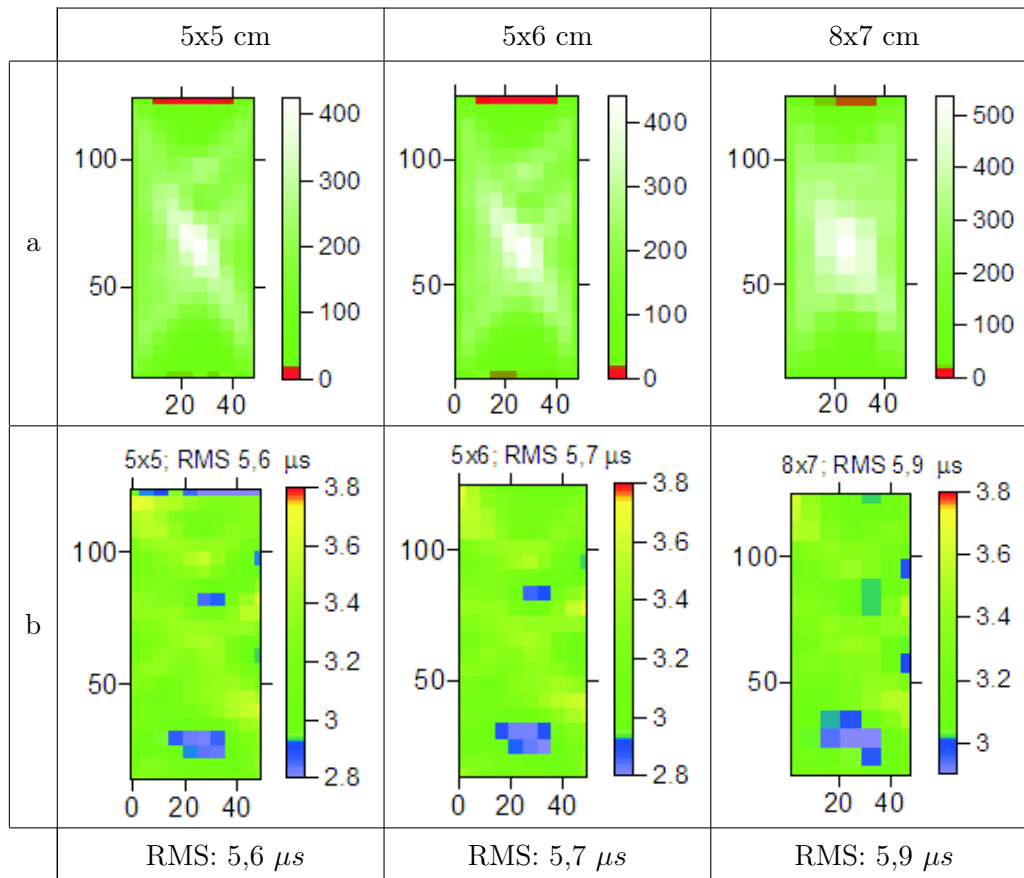
sichtbar. Zu erkennen ist dies an den Unterbrechungen (höhere Laufzeiten) des schwarzen Bereiches (niedrigere Laufzeiten), der diagonal verläuft. Für diese Messung kann die Reziprozität nicht überprüft werden, da die Prüfköpfe nicht seitenvertauscht wurden. Deshalb existiert nur der Hinweg, nicht aber der Rückweg. Die Diagramme in Abb. B.1 zeigen keine systematischen Fehler oder größeren Ausreißer. Deshalb kann mit allen gepickten Laufzeiten weitergerechnet werden.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Danach wurden die Laufzeiten und deren Sender- und Empfängerpositionen mit dem Programm GeoTom rekonstruiert. Zunächst wurde als Startmodell eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 3000 m/s angenommen. Die Elementgrößen lagen diesmal bei 5x5 cm, 5x6 cm und 8x7 cm. Alle anderen Netzgrößen wurden bereits für die vorangegangenen Messungen untersucht und liefern keine neuen Erkenntnisse, siehe Kap. 9.1.1 (d). Nach 10 Iterationen wurden die Berechnungen jeweils abgebrochen, da sich nach 5-10 Iterationen die RMS-Residuen erfahrungsgemäß nicht mehr wesentlich ändern. In Abb. 9.14 (a) ist die Strahlenüberdeckung (Anzahl der Strahlen je Element) für die jeweiligen Netze dargestellt. Die rot markierten Elemente werden von weniger als 10 Strahlen durchquert. Wie auch schon im vorigen Beispiel kehren in allen Tomogrammen der Abb. 9.14 (b) zwei signifikante Anomalien wieder, mit ähnlicher Lage und niedrigeren Geschwindigkeiten. Als optimales Netz wurde auch für diese Messung die Größe 5x5 cm ausgewählt.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend, wie in Abb. B.2 (a) zu erkennen ist. In Abb. B.2 (b) sind die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination des 10. Iterationsschrittes dargestellt. Abgesehen von ein paar Ausreißern zeigen sich keine Winkelabhängigkeit. Diese 5 Ausreißer wurden für die folgenden Rechnungen eliminiert. Daraus war ersichtlich, dass kleine Änderungen am Datensatz keine wesentlichen Änderungen des Ergebnisses bewirkten. Die RMS-Residuen nach der 10. Iteration sanken von 5,6  $\mu s$  (mit Ausreißer) auf 4,0  $\mu s$  (ohne Ausreißer) ab. Die Stabilität der tomografischen Rechnung ist erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

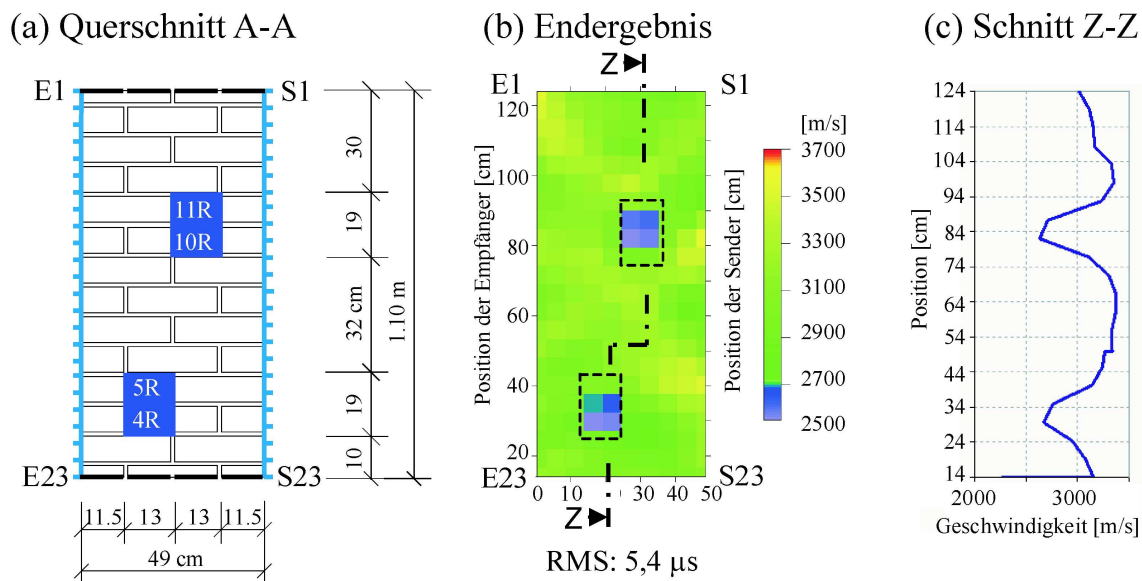
**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen** Für diese Messung wurden keine Teildatensätze ausgewählt, auf Grund der Erkenntnisse der Messung mit den Prüfköpfen SO202 (siehe Kap. 9.1.1 (f)).

**(g). Experimentelle Untersuchung - Anpassung des Startmodells und das Endergebnis** Auf Grund der Erkenntnis aus der Messung mit den Prüfköpfen SO202 ist eine Anpassung des Startmodells zulässig. In der vorangegangene Messung konnte das klarste Ergebnis mit dem Startmodell Nr. 4 (siehe Abb. 9.11) erzielt werden.



**Abbildung 9.14:** Suche nach der optimalen Netzgrößen von 5x5, 5x6, 8x7; (a) Strahlenüberdeckung für verschiedene Netzgrößen; (b) dazugehöriger Rekonstruktion der Geschwindigkeitsverteilung

Das dazugehörige endgültige Ergebnis mit Querschnitt ist in Abb. 9.15 dargestellt. Der Schnitt A verdeutlicht das Verhältnis zwischen den Anomalien und ihrer Umgebung. Die beiden Anomalien weisen eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 2684 m/s auf. Die durchschnittliche Geschwindigkeiten der Umgebung liegen bei 3234 m/s. Das ergibt ein Signal-Rausch-Verhältnis von  $2684/3234 \approx 0,83$ . Die Geschwindigkeiten der Anomalien sind um ca. 20 % langsamer als ihre Umgebung. Somit unterscheiden sich die Anomalien signifikant von ihrer Umgebung. Die Größe der Anomalien kann auf ca. 15x15 cm bestimmt werden.



**Abbildung 9.15:** Endergebnis der Ultraschallmessung mit den Prüfköpfen G0,2gc (85 kHz) an W2; angepasstes Startmodell Nr. 4, Elementgröße 5x5 cm, 10 Iterationen

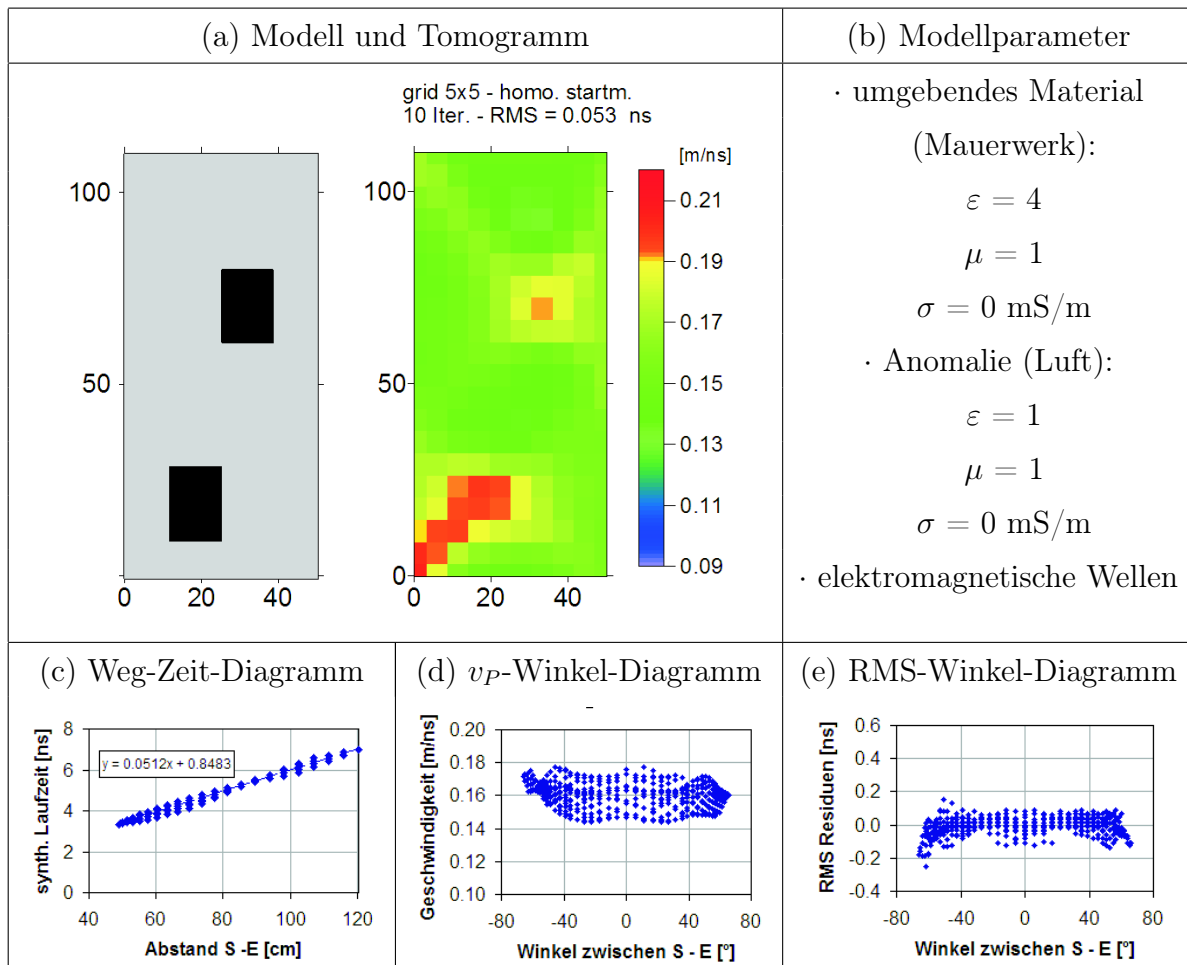
### 9.1.3. Messungen am Prüfkörper “W2“ mit Radar (1,5 GHz)

Die Messung erfolgte an den gleichen Positionen wie in den vorangegangene Beispielen erläutert. Mit dem Unterschied, dass die Messung mit der 1,5 GHz Antenne und der Radarapparatur von GSSI SIR10A (Kap. 5.3) durchgeführt wurde.

(a). **Die Simulation** erfolgte mit dem Programm REFLEX auf die gleiche Weise wie für die vorangegangenen Untersuchungen. Die daraus ermittelten Laufzeiten wurde dann verwendet, um mit dem Programm GeoTom das ursprüngliche Modell wieder zu rekonstruieren. Die Laufzeiten wurden für einen Querschnitt mit und ohne Hohlstellen berechnet. Das verwendete Modell, die eingegebenen Parameter und das Tomogramm sind in Abb. 9.16 (a)-(b) dargestellt. Ebenfalls sind in Abb. 9.16 (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

Um die Ultraschall- und Radarmessungen miteinander vergleichen zu können, wurde der Antennenabstand ebenfalls auf 5 cm festgelegt. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitdifferenz (= Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit der Welle, so dass sich die Differenz aus dem Unterschied der Laufzeiten mit und ohne Anomalie ergibt) von ca. 1,1 ns, die demnach deutlich größer als der Messfehler von min. 0,15 ns (siehe Kap. 7.4.3, S. 7.4.3) ist. Das bedeutet, dass ca. 71 % der Strahlen eine größere Laufzeitdifferenz haben als 0,15 ns und somit signifikant von der Anomalie beeinflusst werden.





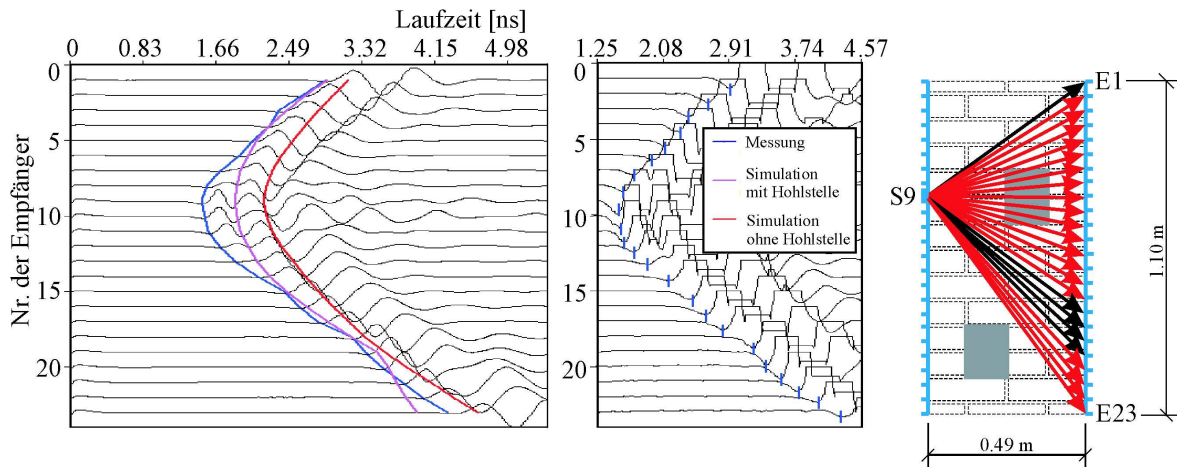
**Abbildung 9.16:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit elektromagnetischen Wellen - W2 Linie 15

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Messungen wurden mit der im Kap. 5.3 beschriebenen Apparatur und der 1,5 GHz Antenne unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Datenpunkte/Kuве: 1024
- Zeitachse (x-Achse): 8,5 ns

Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 9 mit allen dazugehörigen Empfängerpositionen in Abb. 9.17 dargestellt. Man erkennt einen klaren Ersteinsatz, was auf ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zurückgeführt werden kann. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die in blaue dargestellten Messungen sind



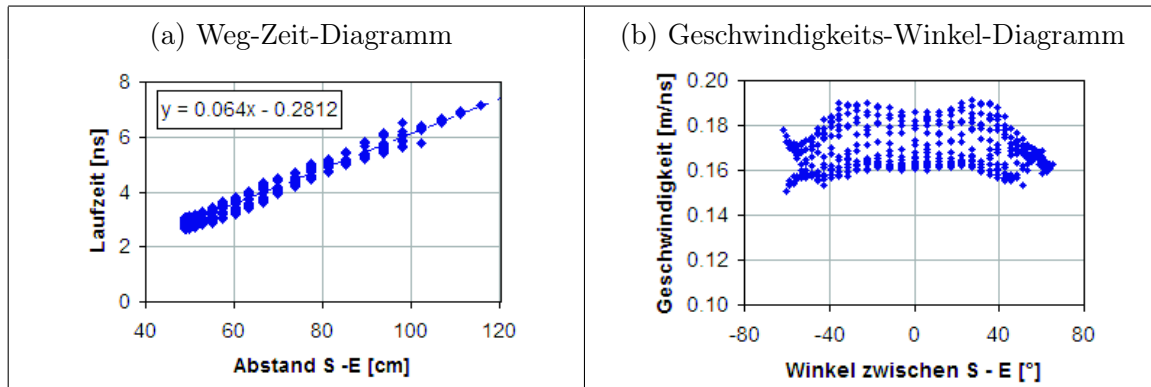
**Abbildung 9.17:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 9 mit Empfängerposition Nr.1 bis 23 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

die mit Reflex gepickten Laufzeiten. Der Verlauf der gemessenen Laufzeitkurve (blau) ist dem der simulierten Kurve mit Hohlstelle (pink) ähnlich. Größere Abweichungen zwischen beiden Kurven sind im Bereich zwischen den Empfängerpositionen 6 bis 13 zu erkennen. In diesem Bereich sind die gemessene Laufzeit schneller als die simulierten. Das lässt darauf schließen, dass die vorgegebene Geschwindigkeit für den Bereich der Anomalie größer sein muss. Im Modell wurden jedoch die Kennwerte für Luft angenommen. Da es kein Medium gibt, in dem sich elektromagnetische Wellen schneller ausbreiten können als in Luft, müssen die Ursachen dafür andere sein, welche noch zu klären ist.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Es wurden die Laufzeiten des Ersteinsatzes der Welle und ihr erstes Maximum gepickt. In diesem Fall hat sich das Picken des ersten Maximums als günstiger erwiesen. Da das erste Maximum in den meisten Fällen eindeutig bestimmbar war. Die Abb. 9.18 zeigen das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm.

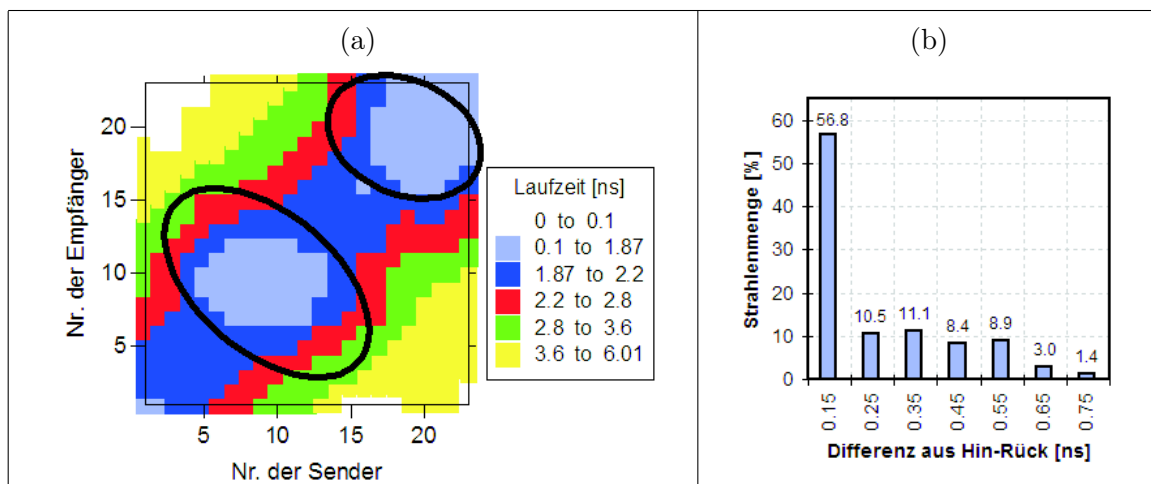
Die Streuung der Daten im Diagramm 9.18 (b) wird wahrscheinlich zwei Ursachen haben. Zum Einen die bereits in Kap. 9.1.1 (c) erwähnte Ursache und zum Anderen möglicherweise ein geräteabhängiger Einfluss, welcher noch nicht abschließend geklärt werden konnte. Wie in Kap. 7.4.3, Abb.7.16(b) schon beschrieben wurde, weist das Gerät von GSSI SIR 10A systematische Abweichungen in der Größenordnung des Messfehlers auf. Deshalb wurde für die folgenden Transmissionsmessungen nur noch die Radarapparatur SIR20 verwendet.

Die Darstellung 9.19 (a) gibt einen Eindruck der Laufzeit jeder Sender-Empfänger Kombination. Der Einfluss der Anomalie ist hier sichtbar. Zu erkennen ist dies an den zwei schwarzen Bereichen niedrigerer Laufzeiten. Im Histogramm 9.19 (b) ist die Diffe-



**Abbildung 9.18:** Prüfung der Datenqualität, Messung an W2 mit Radar, GSSI, SIR 10A und 1,5 GHz Antenne; (a) Weg-Zeit-Diagramm; (b) Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm

renz zwischen Hin- und Rückweg dargestellt. Knapp 60 % aller Daten weichen weniger als 0,15 ns (= Messungenauigkeit) voneinander ab. Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander, womit das Gesetz von Fermat (Reziprozität) erfüllt ist. Trotz der Streuung der Daten im Diagramm 9.18 (b) werden vorab keine Daten eliminiert werden, da erstens nicht geklärt ist, ob es sich um eine reale Winkelabhängigkeit handelt, zweiten wie stark sind dieser mögliche Einfluss auf die Rekonstruktion auswirkt und drittens ist bereits in der Abb. 9.19 (a) der Einfluss der Anomalie ersichtlich.



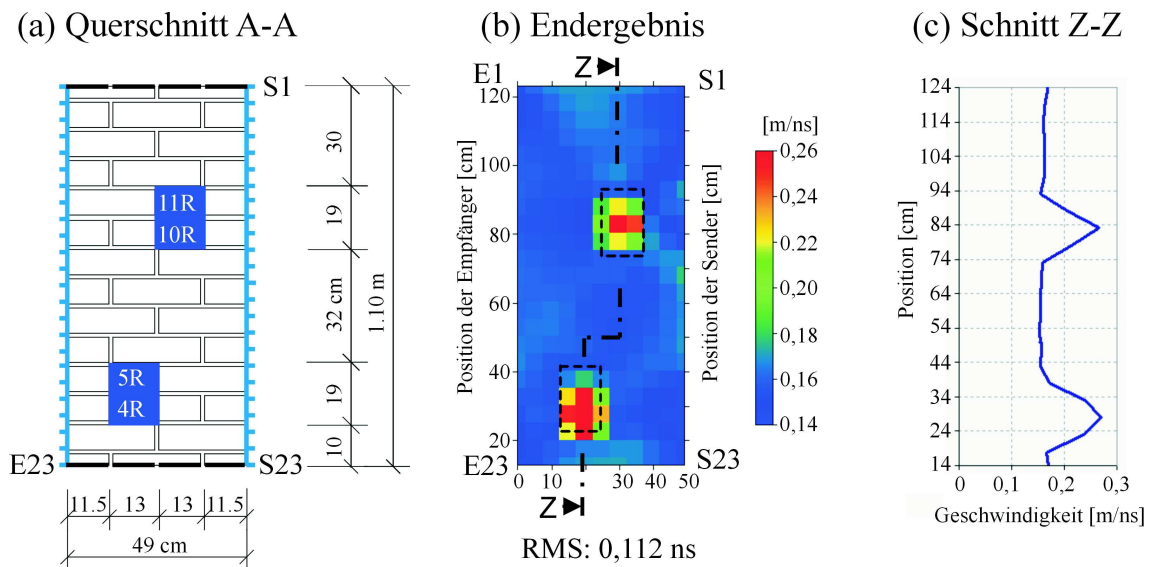
**Abbildung 9.19:** Prüfung der Datenqualität, Messung an W2 mit Radar, GSSI, SIR 10A und 1,5 GHz Antenne; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg

(d). **Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Auf Grund der vorangegangenen Auswertungen wurden die Laufzeiten zunächst mit dem homogenen Startmodell und einer Geschwindigkeitsverteilung von 0.16 m/ns vorgenommen. Das Ergebnis ist in Abb. B.3 (b) dargestellt. Die Elementgröße betrug 5x5 cm. Die Berechnungen umfasste 10 Iterationsschritte.

(e). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Die Abb. B.3 (d) zeigt die Veränderung der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt. Der Verlauf ist stetig abnehmend. In Abb. B.3 (e) sind die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination des 10. Iterationsschrittes dargestellt. Eine relevante Winkelabhängigkeit ist nicht zu erkennen. Die Berechnung kann als stabil bezeichnet werden, da die in Kap. 9.1.1 (e) erwähnten Kriterien erfüllt sind.

(f). **Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen** Für diese Datenauswertung wurden keine Teildatensätze ausgewählt.

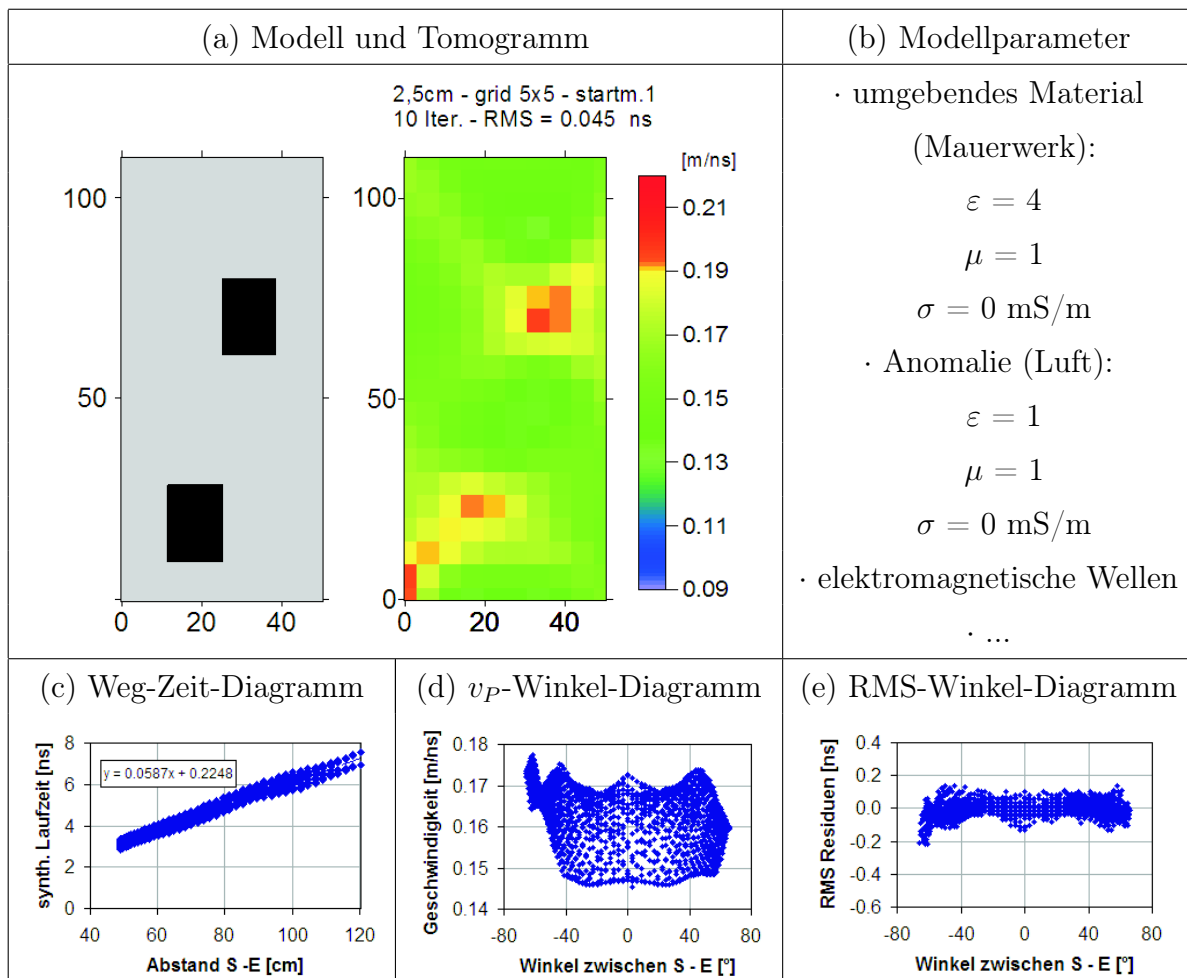
(g). **Experimentelle Untersuchung - Anpassung des Startmodells und Endergebnis** Die Ergebnisse dieser und der vorangegangenen Rekonstruktion lassen eine Anpassung des Startmodells zu. Es wurde hier das eingangs beschriebene Startmodell Nr. 4 (Abb. 9.11) mit den folgenden Geschwindigkeitsvorgaben gewählt:  $v_u = 0,16$  m/ns und  $v_a = 0,3$  m/ns. Die Abb. 9.20 (b) zeigt dieses Endergebnis.



**Abbildung 9.20:** Messung an W2 mit Radar, GSSI, SIR 10A und 1,5 GHz Antenne; angepasstes Startmodell Nr. 4, Netzgröße 5x5 cm, 10 Iterationen

Die beiden Anomalien weisen eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 29,6 m/ns auf. Die durchschnittliche Geschwindigkeiten der Umgebung liegen bei 15,8 m/ns. Die Anomalien weisen eine um ca. 1,9 mal höhere Geschwindigkeit auf als ihre Umgebung (Signal-Rausch-Verhältnis:  $29,6/15,8 \approx 1,9$ ). Somit unterscheiden sich die Anomalien signifikant von ihrer Umgebung (Rauschen). Die Größe der Anomalien kann auf ca. 15x15 cm bestimmt werden.

### 9.1.4. Messungen am Prüfkörper "W2" mit Radar (1,6 GHz)



**Abbildung 9.21:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit elektromagnetischen Wellen - W2 Linie 15

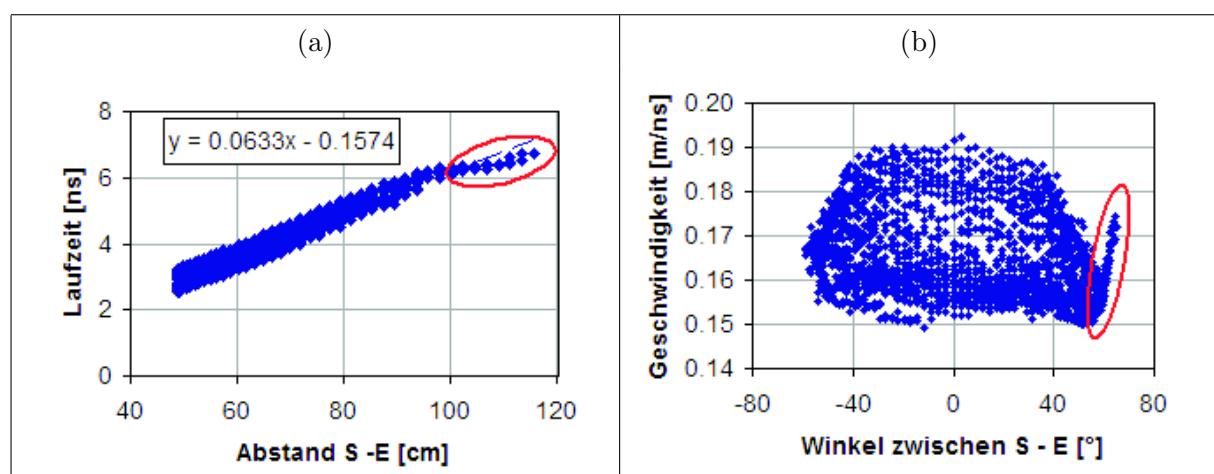
Die Messung wurden von Prof. Zanzi (Universität Politecnico di Milano) mit dem Radarsystem von MALA und deren im EU-Projekt "ONSITEFORMASONRY" neuentwickel-

ten 1,6 GHz Antenne durchgeführt. In Abweichung zu den vorangegangenen Messungen wurde hier der halbe Antennenabstand von 2,5 cm gewählt. Die Messdurchführung und Laufzeitbestimmung erfolgte durch Prof. Zanzi.

**(a). Die Simulation** erfolgte mit dem Programm REFLEX auf die gleiche Weise wie für die vorangegangenen Untersuchungen. Die daraus ermittelten Laufzeiten wurde dann verwendet, um mit dem Programm GeoTom das ursprüngliche Modell wieder zu rekonstruieren. Die Laufzeiten wurden für einen Querschnitt mit und ohne Hohlstellen berechnet.

Das verwendete Modell, die eingegebenen Parameter und das Tomogramm sind in Abb. 9.21 (a)-(b) dargestellt. Ebenfalls sind in Abb. 9.21 (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

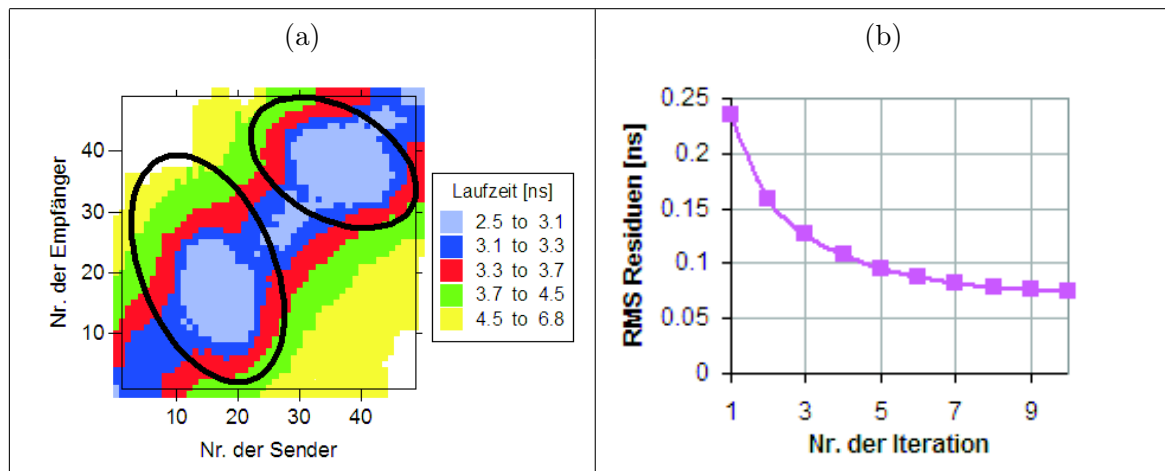
Es wurde ein Antennenabstand von 2,5 cm gewählt. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitdifferenz (= Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit der Welle, so dass sich die Differenz aus dem Unterschied der Laufzeiten mit und ohne Anomalie ergibt) von ca. 1,1 ns. Es wird davon ausgegangen, dass der Messfehler der MALA Apparatur in ähnlicher Größenordnung liegt wie für das GSSI Radarsystem. Somit beeinflusst die Anomalie das Ergebnis signifikant.



**Abbildung 9.22:** Prüfung der Datenqualität, Messung an W2 mit dem Radarsystem von MALA und 1,6 GHz Antenne; (a) Weg-Zeit-Diagramm; (b) Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm

**(b). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Es wurden die Laufzeiten des ersten Maximums der P-Welle gepickt, da das erste Maximum in den meisten Fällen eindeutig bestimmbar war. Die Abb. 9.22 zeigen das Weg-Zeit-Diagramm (a) und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm (b). Die Darstellung 9.23 (a) gibt einen

Eindruck der Laufzeit jeder Sender-Empfänger Kombination. Der Einfluss der Anomalie ist hier sichtbar. Zu erkennen ist dies an den zwei schwarzen Bereichen niedrigerer Laufzeiten. Das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm zeigen in den rot markierten Bereichen leichte Abweichungen zum zu erwartenden Ergebnis. In wie weit diese das Ergebnis beeinflussen ist im Weiteren noch zu klären. Aus diesem Grund werden alle Daten für die erste Rekonstruktion herangezogen.

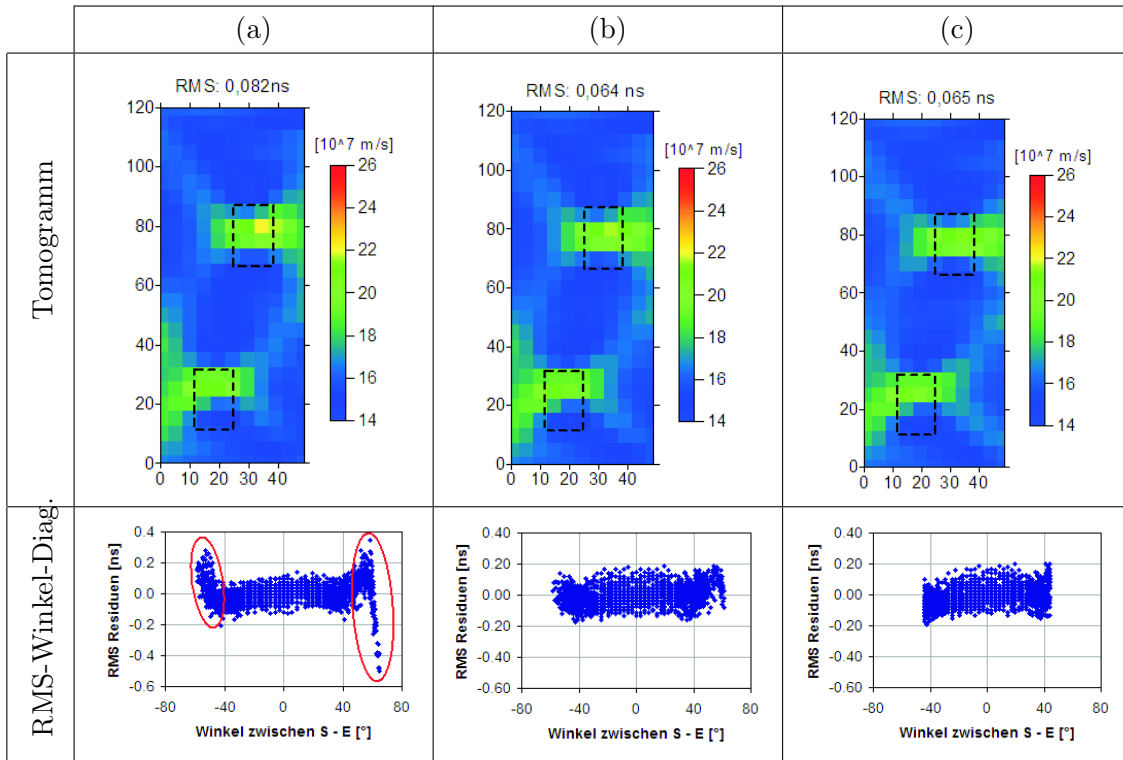


**Abbildung 9.23:** Prüfung der Datenqualität, Messung an W2 mit dem Radarsystem von MALA und 1,6 GHz Antenne; (a) farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; (b) RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt mit homogenem Startmodell und allen Daten

**(c). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Auf Grund der vorangegangenen Auswertungen wurden die Laufzeiten zunächst mit dem homogenen Startmodell und einer Geschwindigkeitsverteilung von 0.16 m/ns vorgenommen. Das Ergebnis ist in Abb. 9.24 (a) dargestellt. Die Elementgröße betrug 5x5 cm. Die Berechnungen umfasste 10 Iterationsschritte.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität und Rekonstruktion von Teildatensätzen** Die Abb. 9.23 (b) zeigt die Veränderung der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt. Der Verlauf ist stetig abnehmend.

In der Abb. 9.24 (a) ist das Ergebnis der ersten Rekonstruktion und die dazugehörigen Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination des 10. Iterationsschrittes dargestellt. Eine größere Streuung der Residuen ist für Winkel größer als  $\pm 45^\circ$  gut erkennbar. Die Ursache wird eine Winkelabhängigkeit sein. Diese Streuung muss berücksichtigt werden. Es wurden zwei Teildatensätze erzeugt, aus denen nach unterschiedlichen Kriterien Daten entfernt wurden. Der erste enthält nur Strahlen, deren RMS-Residuen kleiner als  $\pm$



**Abbildung 9.24:** Messung an W2 mit dem Radarsystem von MALA und 1,6 GHz Antenne; (a) Berechnung mit allen Daten; (b) ohne winkelabhängige Daten; (c) nur Daten, deren Strahlenwinkel kleiner  $45^\circ$  sind

0,16 ns sind und für Neigung größer als  $\pm 45^\circ$  die RMS-Residuen kleiner als  $\pm 0,08$  ns sind. Der zweite Datensatz enthält nur Strahlen, deren Neigung kleiner als  $45^\circ$  ist. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Abb. 9.24 (b) und (c) dargestellt. Vergleich man diese mit dem Ergebnis der noch nicht korrigierten Daten, stellt man fest, dass die RMS-Residuen nach dem 10. Iterationsschritt etwas gesunken sind, jedoch keine erkennbaren Unterschied in den Tomogrammen. Demnach beeinflussen die fehlerhaften Daten nur unwesentlich das Ergebnis der Rekonstruktion. Außerdem kann die Berechnung als stabil bezeichnet werden, da die in Kap. 9.1.1 (e) erwähnten Kriterien erfüllt sind.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Anpassung des Startmodells** Die Ergebnisse dieser und der vorangegangenen Rekonstruktion lassen eine Anpassung des Startmodells zu. Es wurde hier das eingangs beschriebene Startmodell Nr. 4 (Abb. 9.11) mit den folgenden Geschwindigkeitsvorgaben gewählt:  $v_u = 0,16$  m/ns und  $v_a = 0,3$  m/ns. Die Abb. 9.25 zeigt dieses Endergebnis. Das Verhältnis der Anomalien zu ihrer Umgebung liegt bei  $29,4/15,9 \approx 1,8$ . Somit unterscheiden sich die Anomalien signifikant von ihrer Umgebung. Die Größe der Anomalien kann auf ca.  $15 \times 15$  cm bestimmt werden.



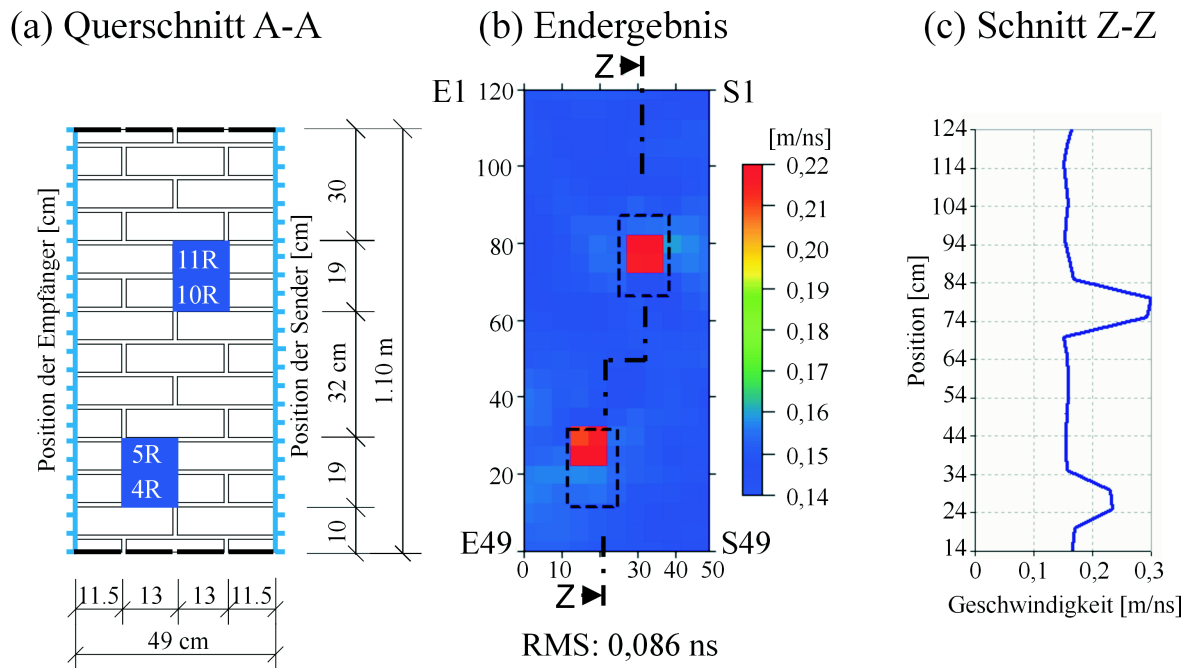


Abbildung 9.25: Messung an W2 mit der MALA Radarapparatur und 1,6 GHz Antenne; angepasstes Startmodell Nr. 4, Netzgröße 5x5 cm, 10 Iterationen

### 9.1.5. Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt A mit Ultraschall

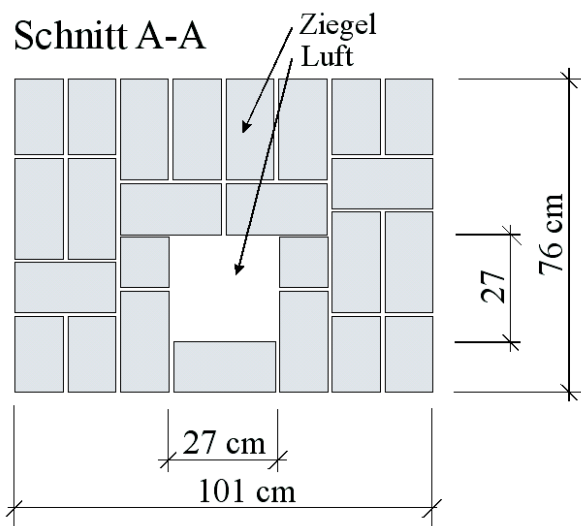


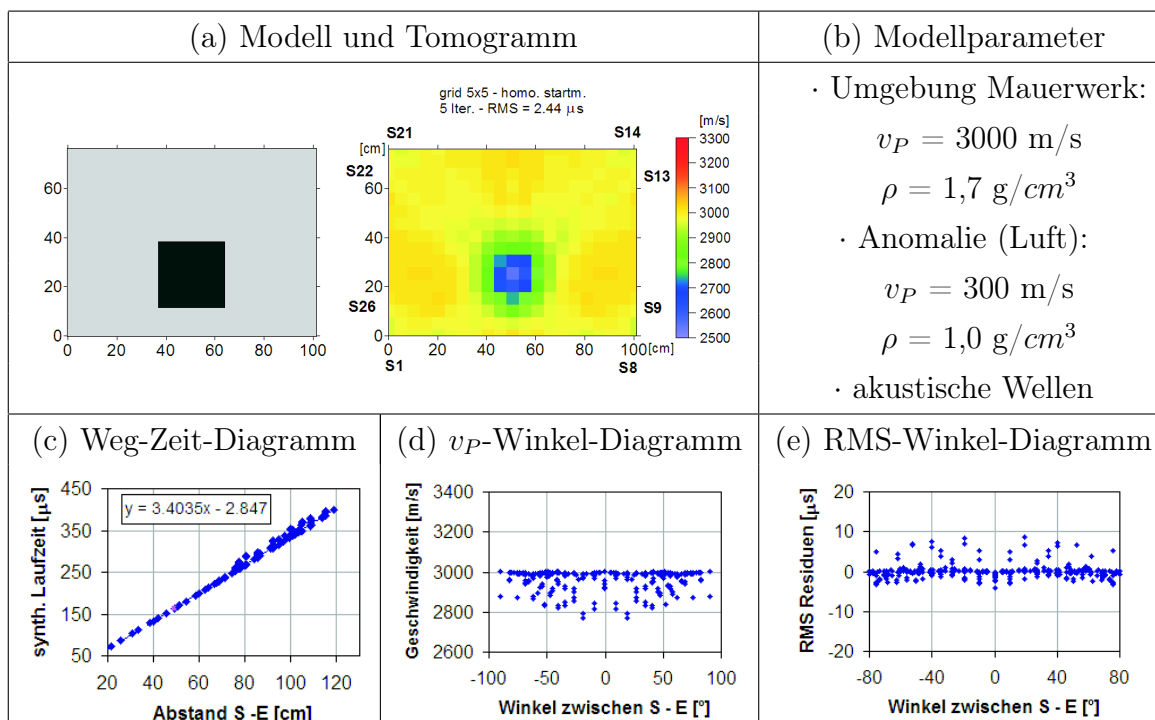
Abbildung 9.26: Probekörper Asterix, Ansicht und Schnitt A

## 9. Messergebnisse & Auswertung

Die nächste Messung erfolgte am Laborprobekörper "Asterix". Die Untersuchungsaufgabe war die Detektion der luftgefüllten Hohlstelle mit den Maßen 27 x 27 x 62 cm (B x T x H). Im Kap. 8.3.1, S.67 ist eine detaillierte Beschreibung des Probekörpers zu finden. Der untersuchte Querschnitt von ca. 0,76 m x 1,01 m ist in Abb. 9.26 dargestellt. Die Auswertung der Daten erfolgt nach dem in Kap. 7.1.4 erläuterten Ablauf.

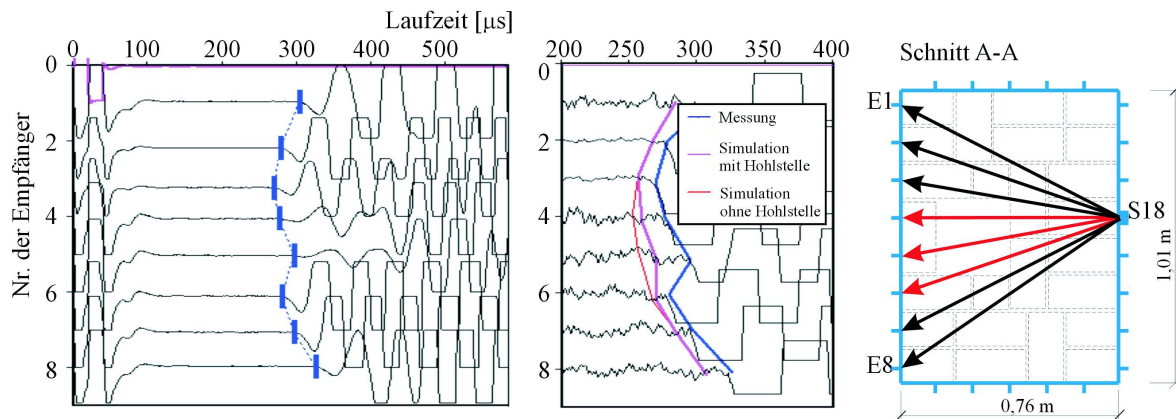
**(a). Simulation** Auch für diese Messungen konnten Simulationsrechnungen mit und ohne Anomalie mit dem Programm REFLEX durchgeführt werden. Die ermittelten Laufzeiten wurde dann mit GeoTom wieder rekonstruieren. Das verwendete Modell, die eingegebenen Parameter und das Tomogramm sind in Abb. 9.27 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitverzögerung infolge der Anomalien von ca. 36  $\mu\text{s}$ . Diese Verzögerung ist demnach deutlich größer als der Messfehler von min. 4-5  $\mu\text{s}$  (siehe Kap. 7.4.2). Ein Prüfkopfabstand von 13 cm erwies sich als praktikabel. Ca. 86 % der Strahlen werden infolge der Laufzeitverzögerung durch die Anomalie um mehr als 4  $\mu\text{s}$  verzögert im Vergleich zu unbeeinflusste Strahlen.



**Abbildung 9.27:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit akustischen Wellen - Asterix, Schnitt A

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**  
Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe SO202.



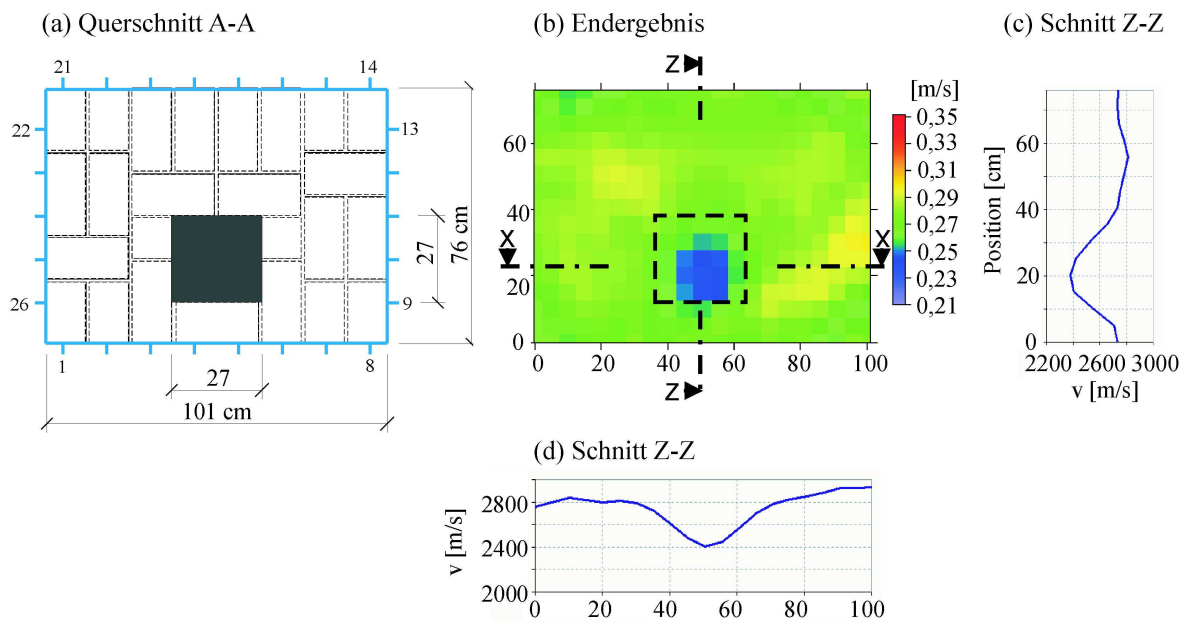
**Abbildung 9.28:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit Empfängerposition Nr. 1 bis 8 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

Da der Probekörper Asterix Untersuchungen an Pfeilern unter Laborbedingungen wiedergeben soll, konnten die Prüfköpfe an allen vier Seiten angebracht werden. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 1 bis 8 in Abb. 9.28 dargestellt. Die Ersteinsätze sind erkennbar. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve sind die mit Reflex gepickten Laufzeiten der Messung. Die rote Kurve sind die simulierten Laufzeiten ohne den Einfluss von Anomalien (homogenes Medium) und die pinkfarbene Kurve stellen die simulierten Laufzeiten mit Hohlstellen dar. Der Verlauf der gemessenen Laufzeitkurve ist dem der simulierten Kurve mit Hohlstelle sehr ähnlich, jedoch um ca.  $20 \mu\text{s}$  verschoben. Somit muss in der Simulationsrechnung die Annahme für die Geschwindigkeit des umgebenden Materials von  $3000 \text{ m/s}$  für dieses Mauerwerk nach unten auf ca.  $2800 \text{ m/s}$  korrigiert werden. Vergleich man die simulierten Kurven, ist der Einfluss der Hohlstelle auf die Laufzeit zwischen der Empfängerposition 4 bis 6 deutlich zu erkennen. In diesem Bereich verlaufen die gemessene und die simulierte Kurve mit Hohlstelle ähnlich in Vergleich zur simulierten Kurve ohne Hohlstelle (rote Kurve). Somit ist der Einfluss einer Laufzeitverzögerung auch in den gemessenen Daten wiederzufinden.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Die Abb. B.4 zeigen das Weg-Zeit-Diagramm (a) und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm (b). Die Darstellung B.5 (a) gibt einen Eindruck der Laufzeit jeder Sender-Empfänger Kombination. Der Einfluss der Anomalie ist für diese Messung ohne die Gegenüberstellung der simulierten Laufzeiten mit und ohne Hohlstelle schwer erkennbar.

Im Histogramm B.5 (b) ist die Differenz zwischen Hin- und Rückweg dargestellt. Über 60 % aller Daten weichen weniger als  $5 \mu\text{s}$  (= Messungenauigkeit) voneinander ab. Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander, womit das Gesetz von Fermat (Reziprozität) erfüllt ist. Durch die Überprüfung der gemessenen Laufzeiten sind keine systematischen Fehler oder größeren Ausreißer ersichtlich. Deshalb kann mit allen gepickten Laufzeiten weitergerechnet werden.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 3000 m/s angenommen. Die Elementgrößen wurde auf  $5 \times 5 \text{ cm}$  festgelegt. Ein Vergleich der Ergebnisse nach jedem Iterationsschritt ergab, dass nach 3 Iterationen die Berechnung abgebrochen werden kann. Dieses Ergebnis ist in Abb. 9.29 zu sehen.



**Abbildung 9.29:** Asterix Querschnitt A-A und Tomogramm der Ultraschallmessung mit SO202 (25 kHz); homogenes Startmodell; Elementgröße  $5 \times 5 \text{ cm}$ ; 3 Iterationen

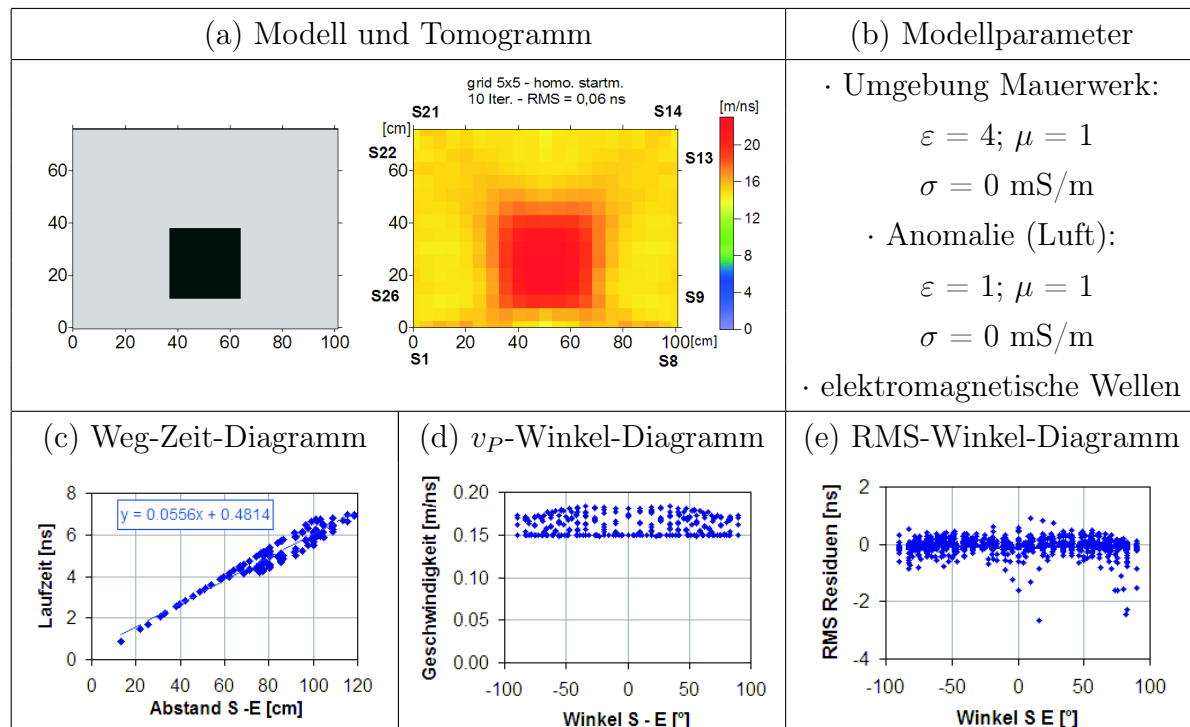
**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.6 (a)). Abgesehen von ein paar Ausreißern, die das Ergebnis nur unwesentlich beeinflussen, zeigen sich keine Winkelabhängigkeit (siehe Abb. B.6 (b)). Es war aus den Berechnungen ersichtlich, dass kleine Änderungen am Datensatz keine wesentlichen Änderungen

des Ergebnisses bewirkten. Die Stabilität der tomografischen Rechnung ist erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Für diese Messung wurden keine Teildatensätze ausgewählt, da sich durch die Rekonstruktion keine Artefakte zeigten und sich die Anomalie relativ stark von der Umgebung abhebt. Eine Anpassung des Startmodells war nach den klaren Ergebnissen nicht notwendig. Das Endergebnis wurde bereits in 9.29 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $2370/2757 \approx 0,87$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie zwischen 20x20 cm und 30x30 cm.

### 9.1.6. Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt A mit Radar

Die Messung erfolgte an den gleichen Positionen wie in den vorangegangene Beispielen erläutert. Mit dem Unterschied, dass die Messung mit der 1,5 GHz Antenne und der Radarapparatur von GSSI SIR 20 (Kap. 5.3) durchgeführt wurde.



**Abbildung 9.30:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit elektromagnetischen Wellen - Asterix, Schnitt A

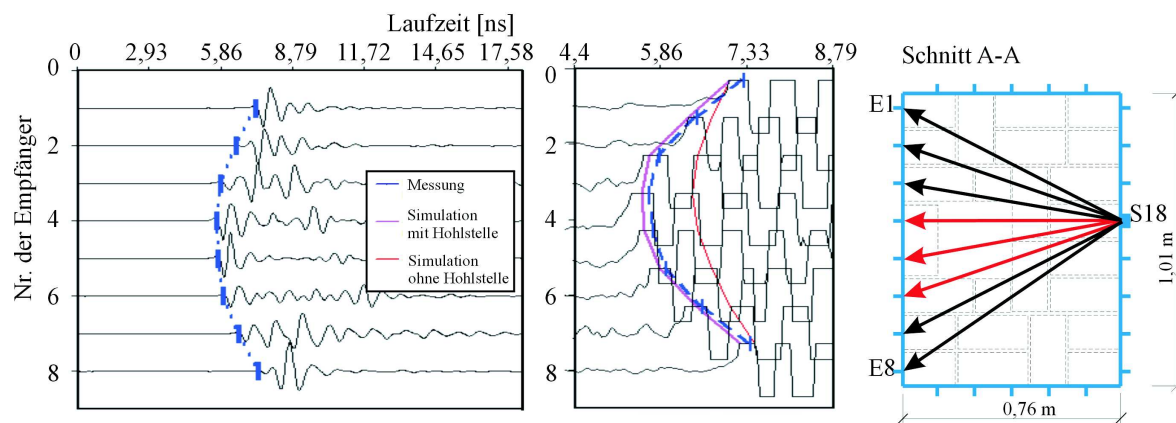
(a). **Die Simulation** erfolgte auf die gleiche Weise wie für die vorangegangenen Untersuchungen. Das verwendete Modell, die eingegebenen Parameter und das Tomogramm der Simulationsrechnungen sind in Abb. 9.30 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

Um die Ultraschall- und Radarmessungen miteinander vergleichen zu können, wurde der Antennenabstand ebenfalls auf 13 cm festgelegt. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitdifferenz (= Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit der Welle, so dass sich die Differenz aus dem Unterschied der Laufzeiten mit und ohne Anomalie ergibt) von ca. 1,2 ns, die demnach deutlich größer als der Messfehler von min. 0,15 ns (siehe Kap. 7.4.3, S. 7.4.3) ist. Das bedeutet, dass ca. 50 % der Strahlen eine größere Laufzeitdifferenz haben als 0,15 ns und somit signifikant von der Anomalie beeinflusst werden.

(b). **Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Messungen wurden mit der im Kap. 5.3 beschriebenen Apparatur und der 1,5 GHz Antenne unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Datenpunkte/Kurve: 1024
- Zeitachse (x-Achse): 30 ns



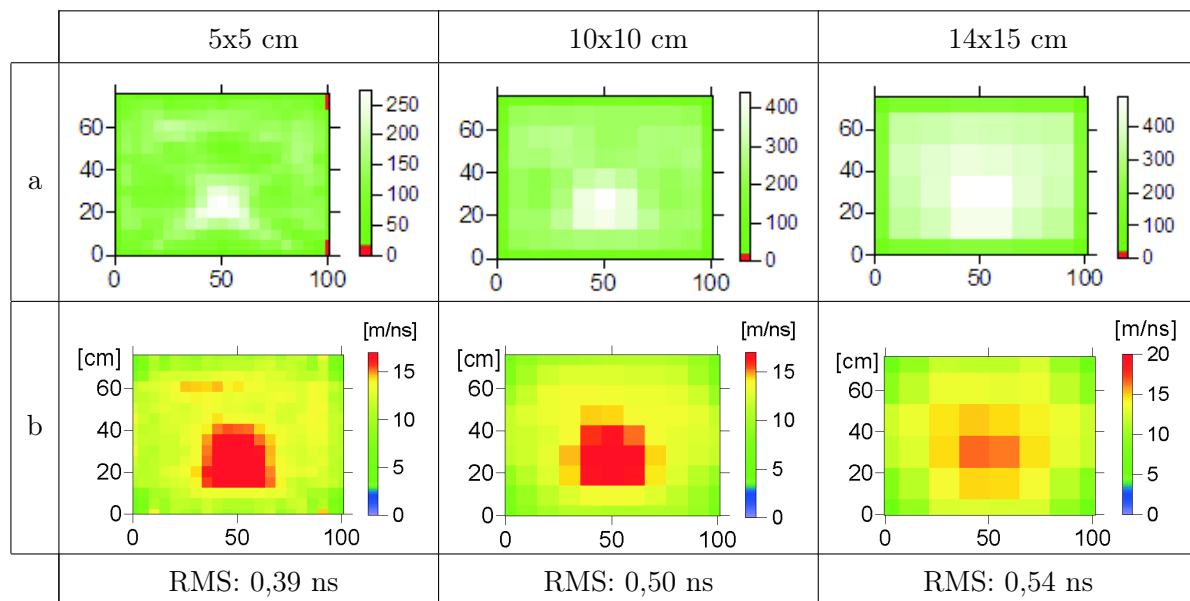
**Abbildung 9.31:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit Empfängerposition Nr.1 bis 8 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 1 bis 8 in Abb. 9.31 dargestellt. Die Ersteinsätze sind erkennbar. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Der Verlauf der gemessenen Laufzeitkurve (blaue Kurve) ist dem der simulierten Kurve mit Hohlstelle

(pinkfarbene Kurve) sehr ähnlich. Somit ist die Erhöhung der Laufzeit infolge der Anomalie auch in den gemessenen Daten wiederzufinden. Die beiden Kurven sind um etwa 0,15 ns verschoben. Das lässt darauf schließen, dass die angenommene Dielektrizitätszahl für dieses Mauerwerk von  $\epsilon \approx 4$  zutrifft.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Es wurden die Laufzeiten des ersten Maximums der Welle gepickt. Die Abb. B.7 zeigen das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm.

Die Darstellung B.8 (a) gibt einen Eindruck der Laufzeit jeder Sender-Empfänger Kombination. Der mit schwarz markierte Bereich zeigt den Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit. Im Histogramm B.8 (b) ist die Differenz zwischen Hin- und Rückweg dargestellt. Ca. 87 % aller Daten weichen weniger als 0,15 ns (= Messungenauigkeit) voneinander ab. Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander, womit das Gesetz von Fermat (Reziprozität) erfüllt ist. Durch die Überprüfung der gemessenen Laufzeiten sind keine systematischen Fehler oder größeren Ausreißer ersichtlich. Deshalb kann mit allen gepickten Laufzeiten weitergerechnet werden.

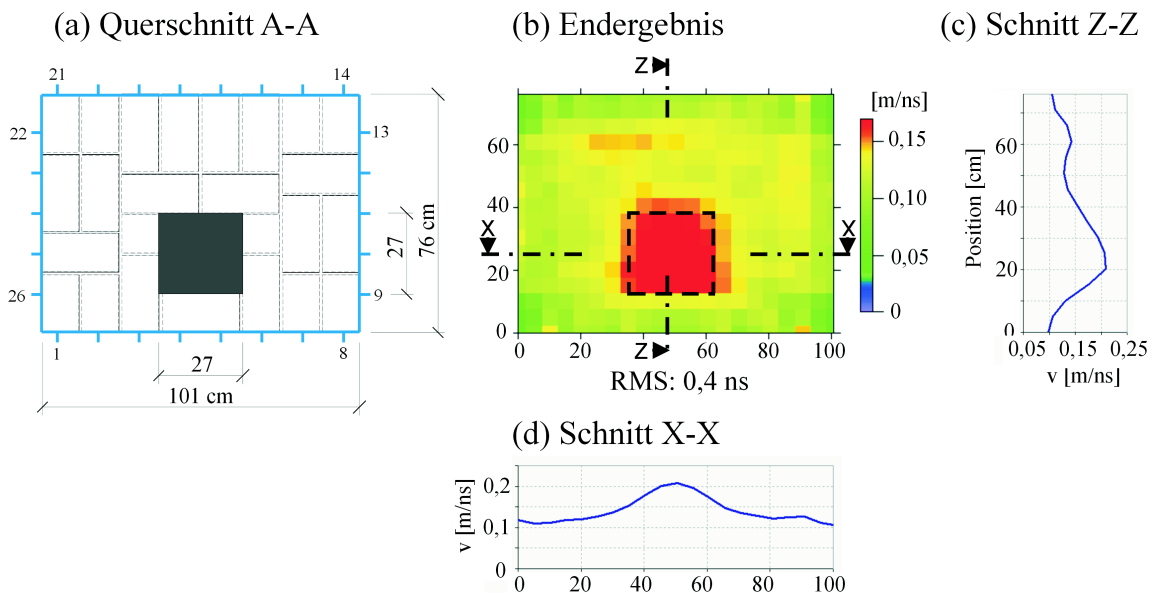


**Abbildung 9.32:** Suche nach der optimalen Netzgrößen von 5x5, 10x10, 14x15; (a) Strahlenüberdeckung für verschiedene Netzgrößen; (b) dazugehöriger Rekonstruktion der Geschwindigkeitsverteilung

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 0,16 m/ns angenommen. Es wurden Netze in drei verschiedenen Größen getestet: 14x15 cm, 10x10 und 5x5. Die Ergebnisse sind in Abb. 9.32 dargestellt. Das beste Ergebnis wurde mit der Elementgröße von 5x5 cm erzielt.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Die Abb. B.9 (a) zeigt die Veränderung der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt. Der Verlauf ist stetig fallend. In Abb. B.9 (b) sind die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination des 10. Iterationsschrittes dargestellt. Abgesehen von ein paar Ausreißern, die das Ergebnis nur unwesentlich beeinflussen, zeigen sich keine Winkelabhängigkeit. Es war aus den Berechnungen ersichtlich, dass kleine Änderungen am Datensatz keine wesentlichen Änderungen des Ergebnisses bewirkten. Die Stabilität der tomografischen Rechnung ist gegeben.

**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Für diese Messung wurden keine Teildatensätze ausgewählt, da sich durch die Rekonstruktion keine wesentlichen Artefakte zeigten und sich die Anomalie relativ stark von der Umgebung abhebt. Eine Anpassung des Startmodells war nach den klaren Ergebnissen nicht notwendig. Das Endergebnis mit dem homo-



**Abbildung 9.33:** Endergebnis der Radarmessung mit 1,5 GHz an Asterix, Schnitt A; homogenes Startmodell, Elementgröße 5x5 cm; 10 Iterationen

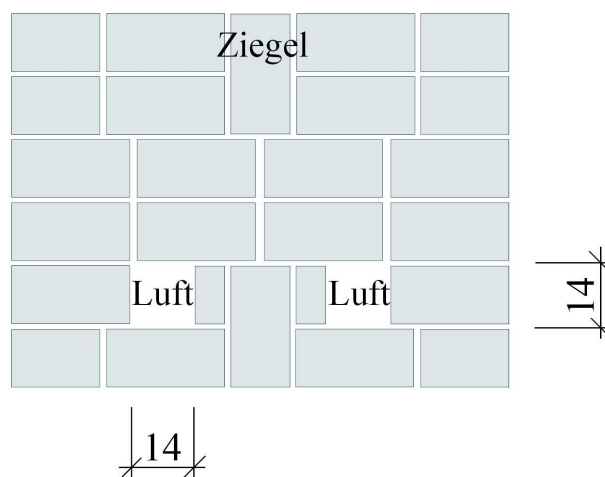


genen Startmodell und einer Netzgröße von 5x5 cm ist in Abb. 9.33 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $21/11,8 \approx 1,8$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie zwischen 20x20 cm und 30x30 cm.

### 9.1.7. Messungen an “Asterix“, Schnitt B mit Ultraschall

Die nächste Messung erfolgte am Laborprobekörper “Asterix“. Die Untersuchungsaufgabe war die Detektion von luftgefüllten Hohlstellen mit den Maßen 14 x 14 x 28 cm (B x T x H). Der untersuchte Querschnitt von ca. 0,76 m x 1,01 m ist in Abb. 9.34 dargestellt. Im Kap. 8.3.1, S.67 ist eine detaillierte Beschreibung des Probekörpers zu finden. Die Auswertung der Daten erfolgt nach dem in Kap. 7.1.4 erläuterten Ablauf.

#### Schnitt B-B



**Abbildung 9.34:** Probekörper Asterix, Ansicht und Schnitt B

(a). **Simulation** Das Ergebnis der Simulationsrechnung, das verwendete Modell und die eingegebenen Parameter sind in Abb. 9.35 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende Laufzeitverzögerung infolge der Anomalien von ca.  $8,7 \mu s$ . Diese Verzögerung ist demnach etwas größer als der Messfehler von min.  $4-5 \mu s$  (siehe Kap. 7.4.2). Da die Hohlstellen 14x14 cm groß sind, musste ein Prüfkopfabstand von 6,5 cm gewählt werden. Nur ca. 8 % der Strahlen werden

infolge der Laufzeitverzögerung durch die Anomalie um mehr als  $4 \mu\text{s}$  verzögert im Vergleich zu unbeeinflusste Strahlen.

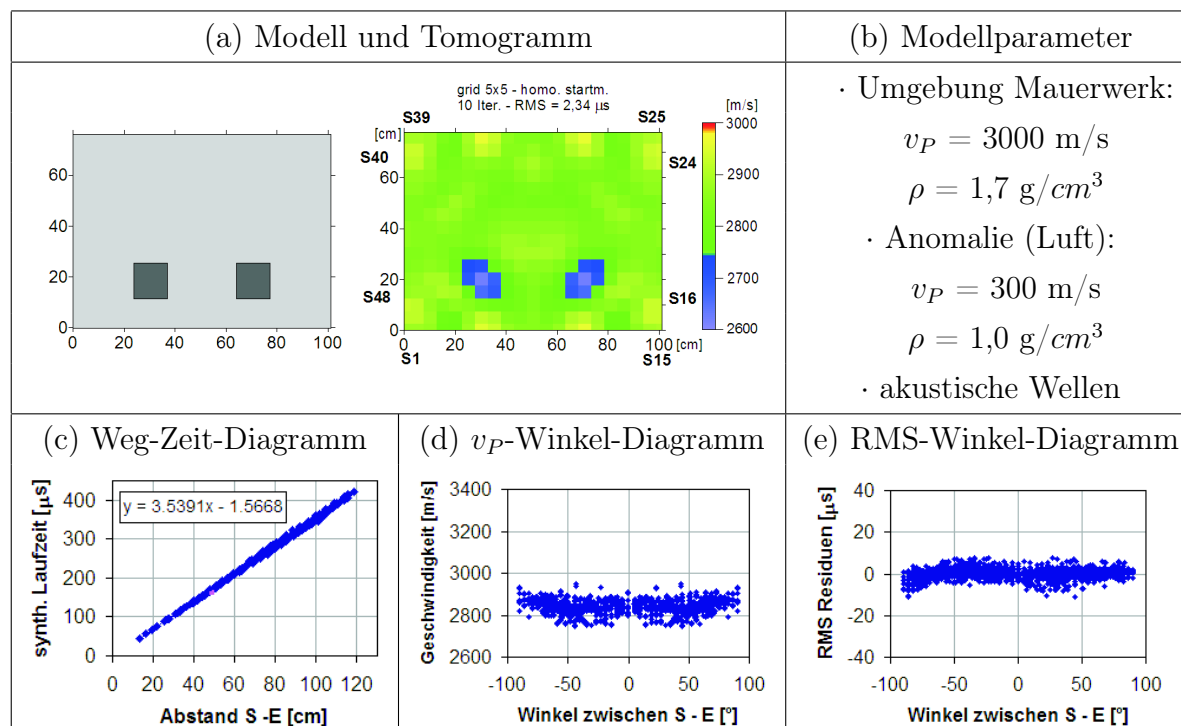
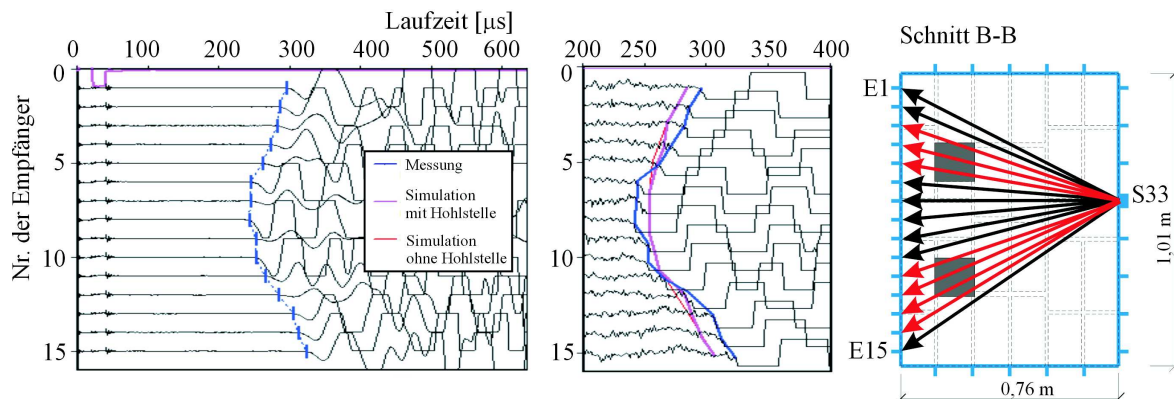


Abbildung 9.35: Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit akustischen Wellen - Asterix, Schnitt B

### (b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven

Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe SO205 (Nachfolger des Prototypen SO202).

Die Prüfköpfe wurden an allen vier Seiten positioniert. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 33 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 1 bis 15 in Abb. 9.36 dargestellt. Die Ersteinsätze sind erkennbar. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve entspricht den gemessenen, die pinkfarbene Kurve den simulierten mit Hohlstelle und die rote Kurve den simulierten Laufzeiten ohne Hohlstelle. Ein geringer Einfluss der Hohlstelle auf die Laufzeit ist zwischen den Empfängerposition 3-6 und 11-13 zu erkennen



**Abbildung 9.36:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 33 mit Empfängerposition Nr.1 bis 15 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

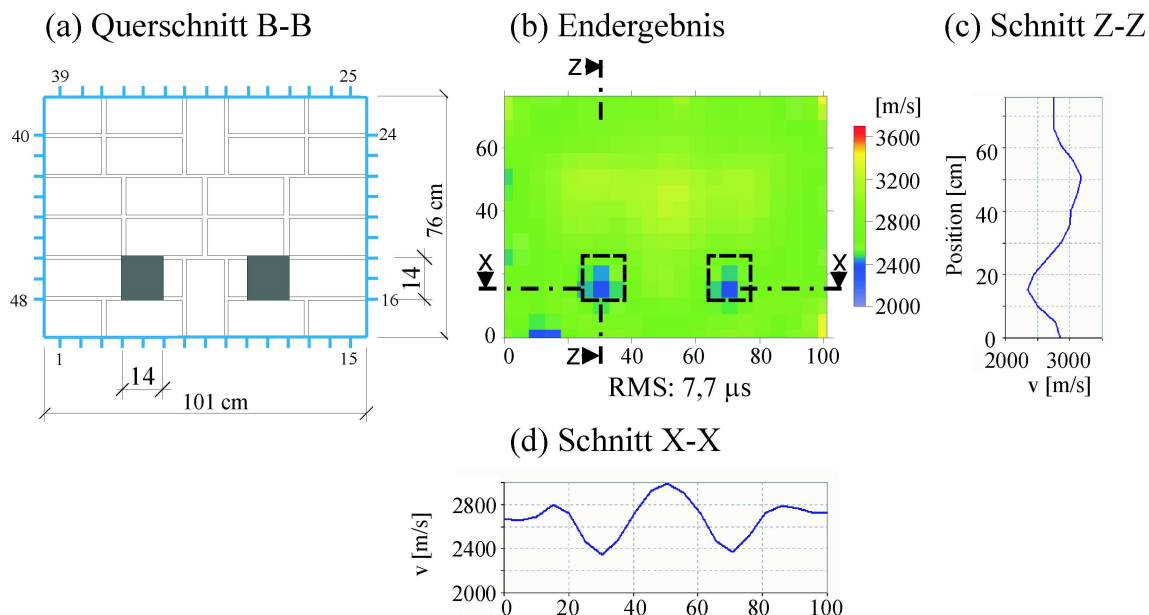
(c). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Die Überprüfung der gemessenen Laufzeiten zeigt im Geschwindigkeits-Winkel Diagramm einen Winkeleinfluss (siehe Abb. B.10b). Jedoch ist in der Darstellung in der Abb. B.11 (a) der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit immer noch erkennbar (schwarz markierte Bereich). Deshalb kann davon ausgegangen werden dass der Einfluss des Winkels das Ergebnis nur unwesentlich verändern wird.

Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander. Über 78 % aller Daten weichen weniger als  $5 \mu s$  (= Messungenauigkeit) voneinander ab (Abb. B.11b). Somit ist das Gesetz von Fermat erfüllt. Da kein wesentlicher systematischer Fehler erkennbar ist, wurde mit allen gepickten Laufzeiten weitergerechnet.

(d). **Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von  $3000 \text{ m/s}$  angenommen. Um das optimale Netz zu finden, wurden die Elementgrößen von  $1 \times 1 \text{ cm}$ ,  $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$ ,  $5 \times 5 \text{ cm}$  bis  $10 \times 10 \text{ cm}$  variiert. Die Iterationen wurde jeweils nach 10 Schritten abgebrochen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. B.12 dargestellt. In allen Tomogrammen kehren zwei signifikante Anomalien wieder. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um tatsächlich vorhandene Anomalien handelt und nicht um Artefakte. Als optimales Netz wurde auch für diese Messung die Größe  $5 \times 5 \text{ cm}$  ausgewählt, da diese Größe im Bereich des Prüfkopfabstandes von  $6,5 \text{ cm}$  liegt und noch eine akzeptable Strahlenüberdeckung erreicht wird.

(e). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.13a).

Die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination nach dem 10. Iterationsschritt zeigen abgesehen von der erwähnten Winkelabhängigkeit (beeinflusst Ergebnis unwesentlich) keine weiteren Einflüsse (siehe Abb. B.13b). Die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung sind erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

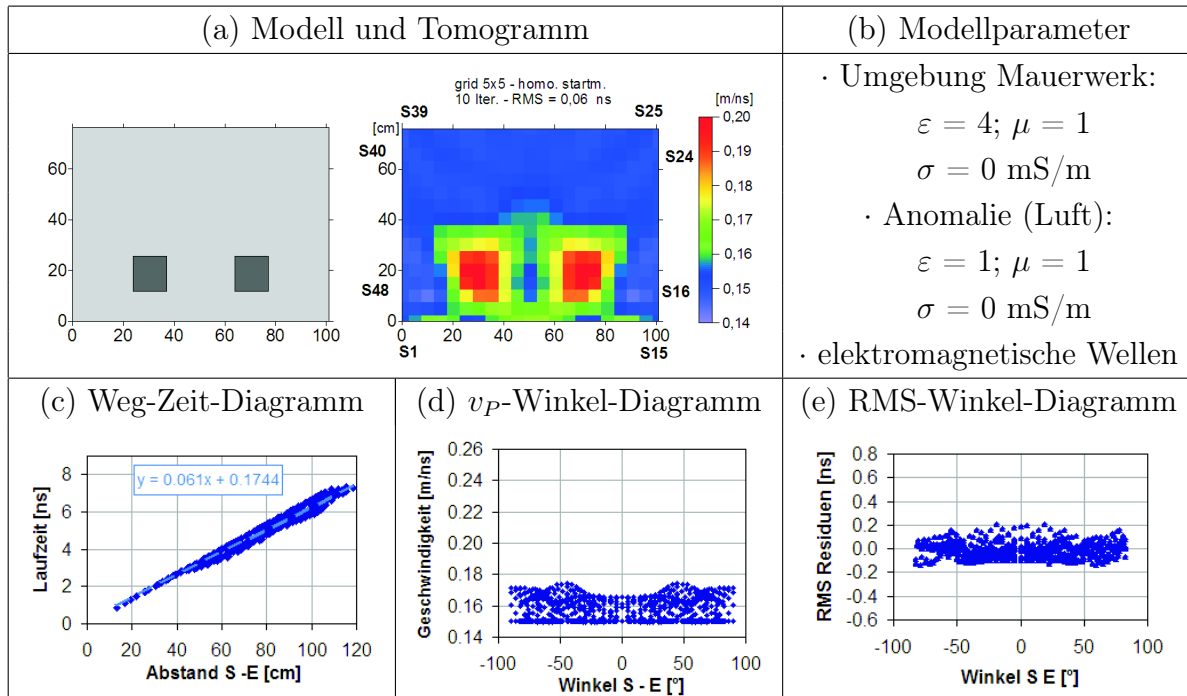


**Abbildung 9.37:** Endergebnis der Ultraschallmessung mit den Prüfköpfen SO205 (25 kHz) an Asterix, Schnitt B; homogenes Startmodell, Elementgröße 5x5 cm; 10 Iterationen

**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Für diese Messung wurden keine Teildatensätze ausgewählt, da sich die Anomalie relativ stark von der Umgebung abhebt. Eine Anpassung des Startmodells war aus diesen Gründen ebenfalls nicht notwendig. Das Endergebnis mit dem homogenen Startmodell und einer Netzgröße von 5x5 cm ist in Abb. 9.37 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $2355/2840 \approx 0,83$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie zwischen 5x5 cm und 15x15 cm.

### 9.1.8. Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt B mit Radar

Die Messung erfolgte an den gleichen Positionen wie in den vorangegangene Beispielen erläutert. Mit dem Unterschied, dass die Messung mit der 1,5 GHz Antenne und der Radarapparatur von GSSI SIR 20 (Kap. 5.3) durchgeführt wurde.



**Abbildung 9.38:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit elektromagnetischen Wellen - Asterix, Schnitt B

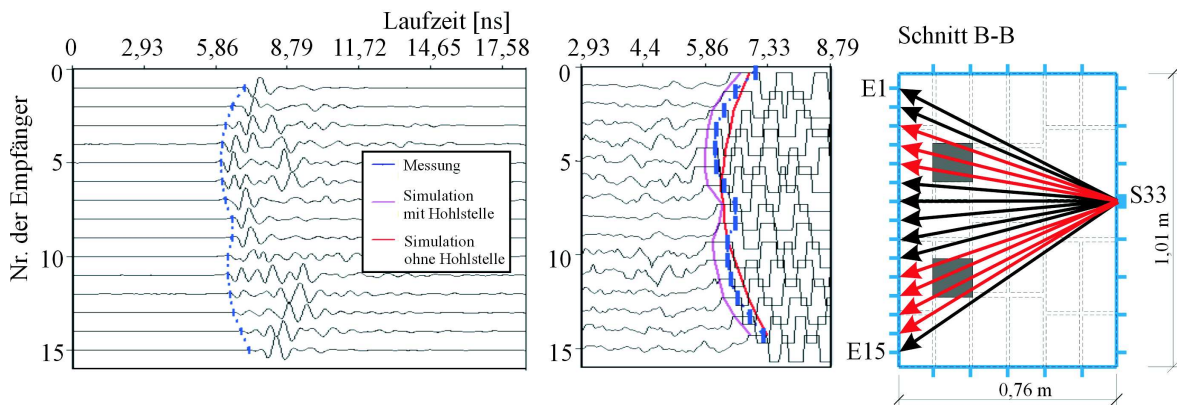
**(a). Die Simulation** Das Ergebnis der Simulationsrechnung, das verwendete Modell und die eingegebenen Parameter sind in Abb. 9.38 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitdifferenz von ca. 0,86 ns, die demnach deutlich größer als der Messfehler von min. 0,15 ns (siehe Kap. 7.4.3, S. 7.4.3) ist. Das bedeutet, dass ca. 53 % der Strahlen eine größere Laufzeitdifferenz haben als 0,15 ns und somit signifikant von der Anomalie beeinflusst werden.

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven** Die Messungen wurden mit der im Kap. 5.3 beschriebenen Apparatur und der 1,5 GHz Antenne unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Datenpunkte/Kurve: 1024
- Zeitachse (x-Achse): 30 ns

Die Antennen wurden an allen vier Seiten positioniert. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 33 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 1 bis 15 in Abb. 9.39 dargestellt. Die

Bestimmung der Laufzeit erfolgte jeweils über das Picken des ersten Maximums. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Der Verlauf der gemessenen Laufzeitkurve (blaue Kurve) ist dem der simulierten Kurve mit Hohlstelle (pinkfarbene Kurve) sehr ähnlich. Somit ist die Senkung der Laufzeit infolge der Anomalie auch in den gemessenen Daten wiederzufinden. Die beiden Kurven sind um etwa 0,3 ns verschoben. Das lässt darauf schließen, dass die angenommene Dielektrizitätszahl für dieses Mauerwerk von  $\epsilon \approx 4$  zutrifft.



**Abbildung 9.39:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 33 mit Empfängerposition Nr.1 bis 15 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

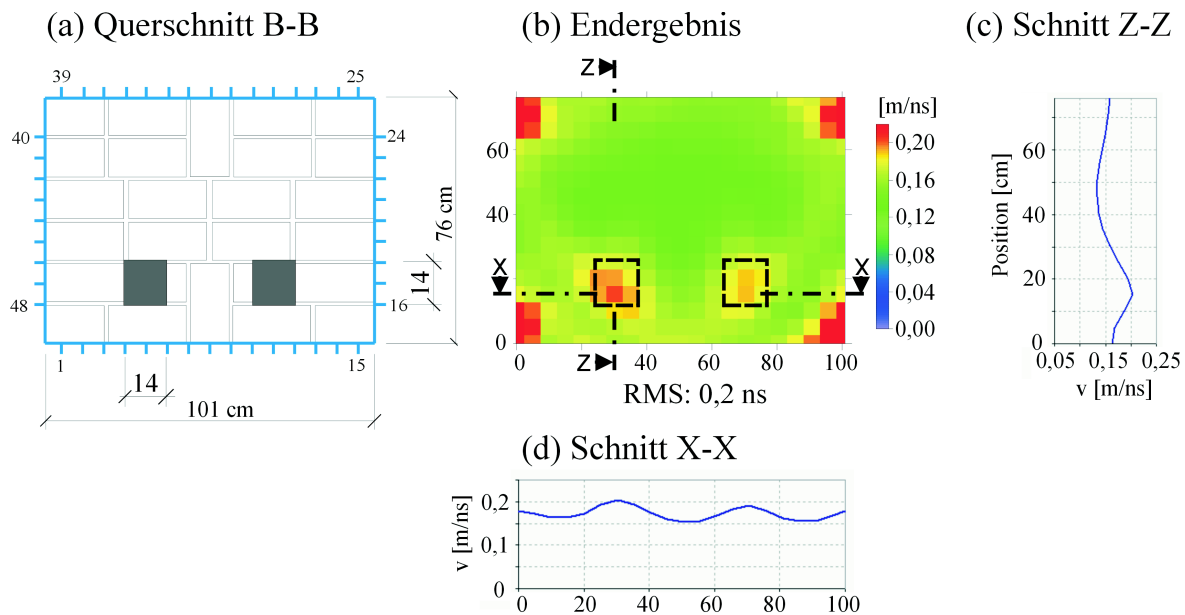
**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm in Abb. B.14 (b) zeigt keine auffälligen systematischen Fehler jedoch einige Ausreißer. Durch die erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell muss nun untersucht werden, wie stark dieser Einfluss auf das Ergebnis ist. Der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit ist in der Darstellung B.15 (a) erkennbar (schwarz markierte Bereich). Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander. Über 84 % aller Daten weichen weniger als 0,15 ns (= Messungenauigkeit) voneinander ab (Abb. B.15b). Somit ist das Gesetz von Fermat erfüllt.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 0,16 m/ns angenommen. Es wurden zwei verschiedene Netze getestet: 10x10 cm und 5x5. Das beste Ergebnis wurde mit der Elementgröße von 5x5 cm erzielt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 9.40 dargestellt. In den vier Ecken der tomografischen Darstellung bilden sich relativ starke Artefakte aus. Das lässt zum einen auf eine geringe

gere Strahlenüberdeckung schließen und zum anderen auf eine Winkelabhängigkeit. Da die Anomalien trotz dessen sichtbar sind werden keine Daten eliminiert.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.16a). Die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination nach dem 10. Iterationsschritt zeigen einen winkelabhängigen systematischen Fehler (siehe Abb. B.16b). Somit bestätigt sich die oben genannte Vermutung, dass die Artefakte eine winkelabhängige Ursache haben könnten. Die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung sind erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Für diese Messung wurden keine Teildatensätze ausgewählt. Es folgte keine Anpassung des Startmodells. Das Endergebnis mit dem homogenen Startmodell und einer Netzgröße von  $5 \times 5$  cm ist in Abb. 9.40 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $19,7/15,9 \approx 1,24$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie zwischen  $10 \times 10$  cm und  $15 \times 15$  cm.



**Abbildung 9.40:** Endergebnis der Radarmessung an Asterix, Schnitt B mit 1,5 GHz; homogenes Startmodell, Elementgröße  $5 \times 5$  cm; 10 Iterationen

## 9.2. Anomalie aus Granit

### 9.2.1. Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt D mit Ultraschall

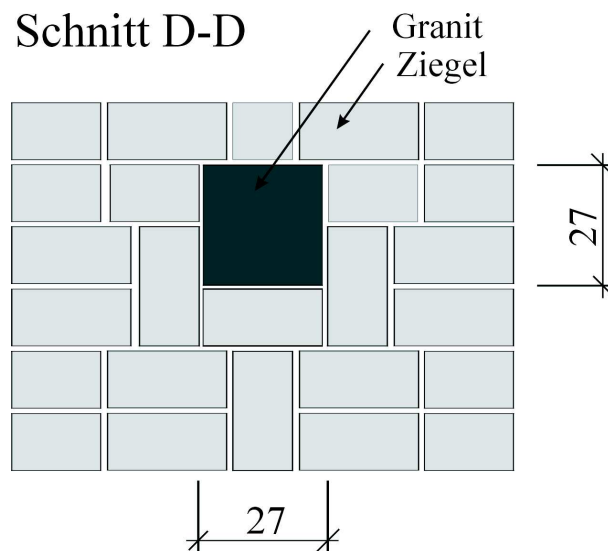


Abbildung 9.41: Asterix, Ansicht und Schnitt D-D

Die Messung erfolgte am Laborprobekörper "Asterix", Schnitt B. Die Untersuchungsaufgabe war die Detektion eines Granitblocks mit den Maßen 25 x 25 x 60 cm (B x T x H). Der untersuchte Querschnitt von ca. 0,76 m x 1,01 m ist in Abb. 9.41 dargestellt. Im Kap. 8.3.1, S.67 ist eine detaillierte Beschreibung des Probekörpers zu finden. Die Auswertung der Daten erfolgt nach dem in Kap. 7.1.4 erläuterten Ablauf.

**(a). Simulation** Das Ergebnis der Simulationsrechnung, das verwendete Modell und die eingegebenen Parameter sind in Abb. 9.42 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitdifferenz (= Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit der Welle, so dass sich die Differenz aus dem Unterschied der Laufzeiten mit und ohne Anomalie ergibt) von ca. 21,6  $\mu s$ , die demnach deutlich größer als der Messfehler von min. 4-5  $\mu s$  (siehe Kap. 7.4.2, S. 7.4.2) ist. Ein Prüfkopfabstand von 13 cm erwies sich als praktikabel. Ca. 85 % der Strahlen haben eine größere Laufzeitdifferenz als 4-5  $\mu s$  und werden somit signifikant von der Anomalie beeinflusst.



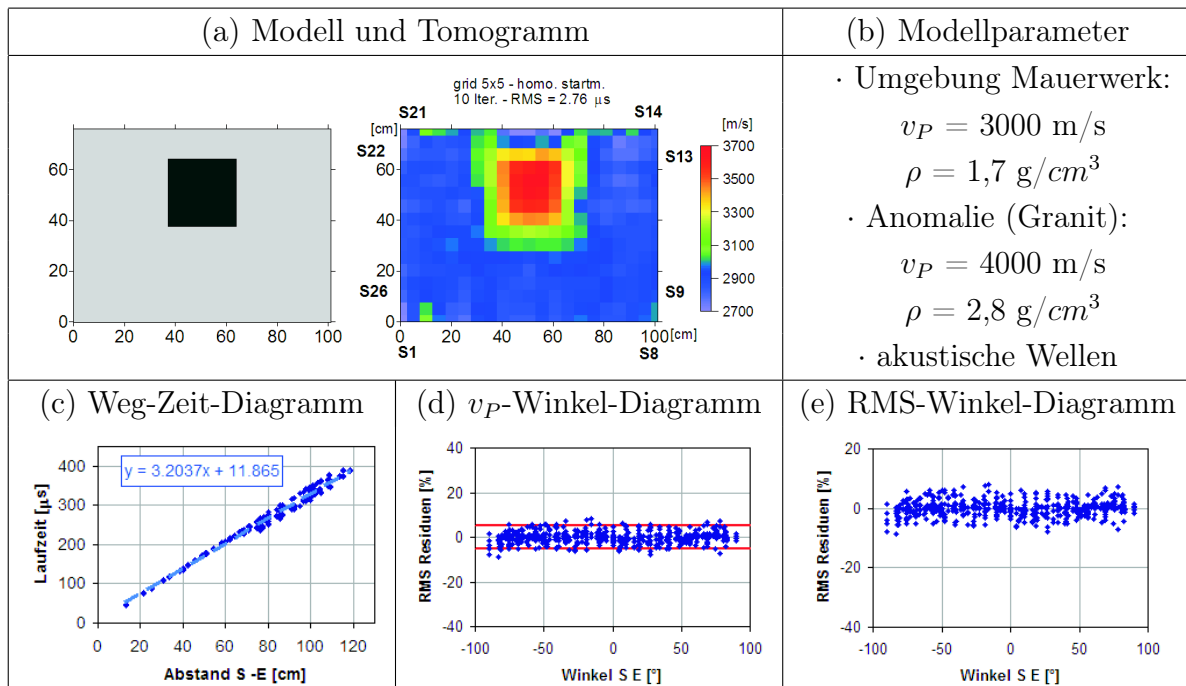


Abbildung 9.42: Simulation des zu untersuchenden Querschnitts Asterix Schnitt D mit Ultraschall

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe SO205. Die Prüfköpfe wurden an allen vier Seiten positioniert. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 1 bis 8 in Abb. 9.43 dargestellt. Die Ersteinsätze sind erkennbar. In den Darstellungen der A-scans

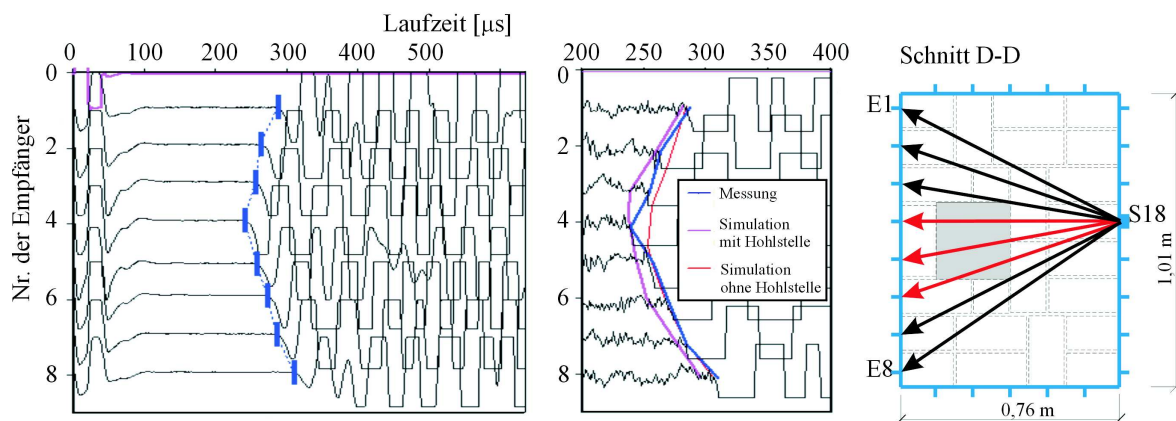
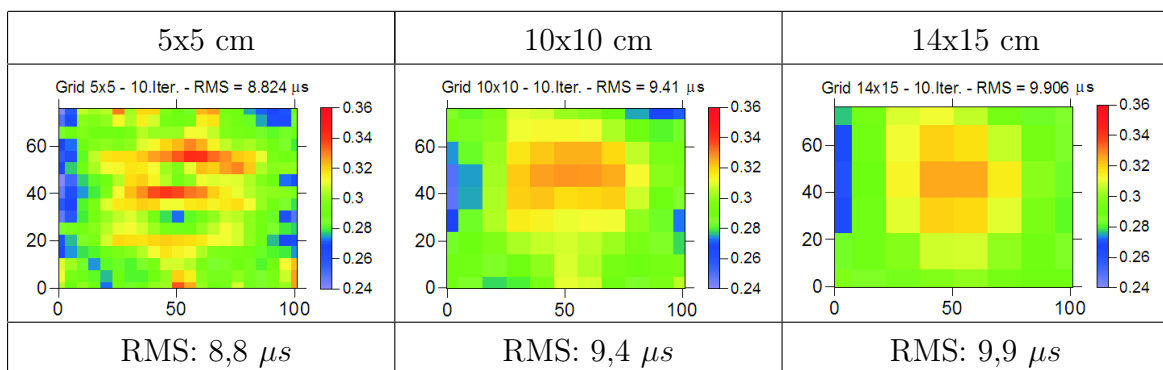


Abbildung 9.43: Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit Empfängerposition Nr.1 bis 8 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve entspricht den gemessenen, die pinkfarbene Kurve den simulierten mit Anomalie und die rote Kurve den simulierten Laufzeiten ohne Anomalie. Der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit ist nicht besonders deutlich, jedoch an der Empfängerposition Nr. 4 zu erkennen.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Die Überprüfung der gemessenen Laufzeiten zeigt im Geschwindigkeits-Winkel Diagramm einen Winkeleinfluss (siehe Abb. B.17b). Jedoch ist in der Darstellung in der Abb. B.18 (a) der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit immer noch erkennbar (schwarz markierte Bereich). Deshalb kann davon ausgegangen werden dass dieser Einfluss das Ergebnis nur unwesentlich verändern wird. Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander. Über 59 % aller Daten weichen weniger als  $5 \mu\text{s}$  (= Messungenauigkeit) voneinander ab (Abb. B.18b). Somit ist das Gesetz von Fermat erfüllt.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 3000 m/s angenommen. Um das optimale Netz zu finden, wurden die Elementgrößen von 5x5 cm, 10x10 cm bis 14x15 cm variiert. Die Iterationen wurde jeweils nach 10 Schritten abgebrochen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 9.44 dargestellt. In den Tomogrammen der Netzgröße 10x10 cm und 14x15 cm ist jeweils eine



**Abbildung 9.44:** Tomogramme mit unterschiedlichen Netzgrößen von 5x5, 10x10, 14x15 cm

Hochgeschwindigkeitszone sichtbar. Im Vergleich dazu unterscheidet sich das Ergebnis, für welches die Elementgröße von 5x5 cm verwendet wurde. In dieser Rekonstruktion zeigen sich sehr viele Artefakte, was auf eine zu geringe Strahlenüberdeckung hindeutet.

Aus diesem Grund ist die Diskretisierung des Querschnitts in Elemente der Größe von 10x10 cm optimal.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.19a). Die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination nach dem 10. Iterationsschritt zeigen eine deutliche Winkelabhängigkeit, die sich jedoch kaum im Tomogramm wieder spiegelt (siehe Abb. B.19b). Die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung sind erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Da sich die Anomalie nur geringfügig hervorhebt und wenig abgrenzt, ist die Auswertung von Teildatensätzen sinnvoll. Es wurden insgesamt 49 verschiedene Teildatensätze gebildet und rekonstruiert. Ausgewählte Ergebnisse sind in der Abb. 9.45 zusammengestellt. In der nachfolgenden Auflistung sind alle verwendeten Kriterien zur Auswahl von Teildaten aufgeführt. Jeweils ein Beispiel-Tomogramm ist in Abb. 9.45 zu finden.

1. Die Laufzeiten wurden mit zwei unterschiedlichen Programmen von Hand bestimmt (Reflex und ein mit "Wave" selbstgeschriebenes Programm)
2. Der Hin- und Rückweg wurde verglichen und es wurden nur Daten ausgewählt, deren Differenz nicht größer als  $10 \mu s$ ,  $5 \mu s$  bzw.  $3 \mu s$  waren.
3. Die RMS-Residuen jedes einzelnen Strahls sagen aus, wie gut die berechnete mit der gemessenen Laufzeit übereinstimmt. Deshalb wurden die RMS-Residuen der ersten Rekonstruktion mit homogenen Startmodell als nächstes Kriterium herangezogen. Es wurden nur Strahlen gewählt, deren RMS-Residuen kleiner als  $\pm 5 \mu s$  waren (entspricht der Streubreite der simulierten RMS-Residuen). Durch diese Auswahl werden ebenfalls die winkelabhängigen Laufzeiten entfernt.
4. Für die nächsten Teildatensätze wurden nur Daten ausgewählt, deren Hin- und Rückweg sowie deren RMS-Residuen die oben genannten Kriterien unterschreiten.
5. Um eine bessere vertikale bzw. horizontale Auslösung zu erreichen wurden nur Laufzeiten von speziellen Sender- und Empfängerkombinationen ausgewählt, z.B. Prüfköpfe auf gegenüberliegenden Seiten.
6. Ein weiteres Kriterium ist die Länge des Strahlenweges. Es wurden zum Einen nur Strahlen ausgewählt, deren Länge größer war als 100 cm, 101 cm, 105 cm und Zum Anderen, deren Länge kleiner als 76 cm waren.
7. Die RMS-Residuen jedes einzelnen Senders bzw. Empfängers gibt Auskunft über deren Qualität und Glaubwürdigkeit. Einige Positionen zeigten größere Abweichungen, die aus dem gesamten Datensatz entfernt wurden.

## 9. Messergebnisse & Auswertung

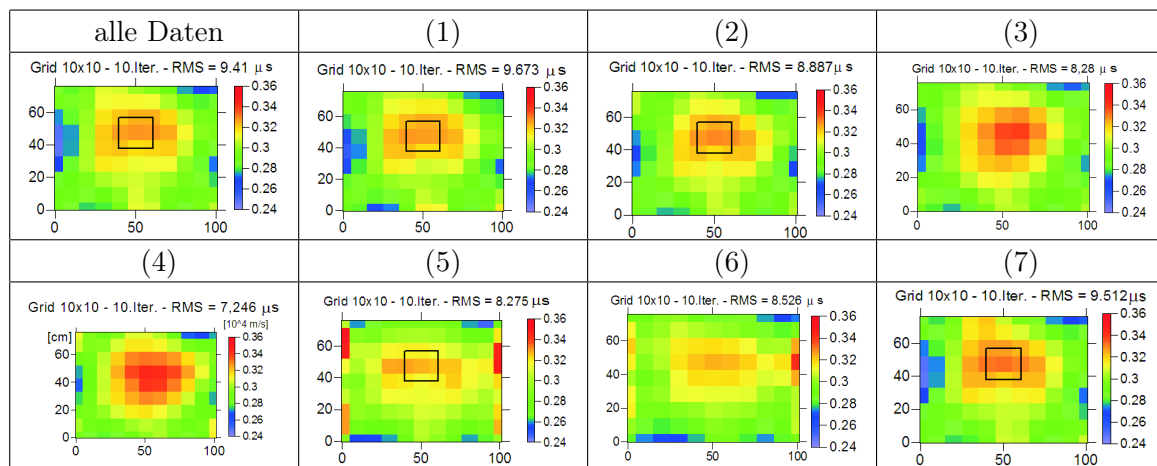


Abbildung 9.45: Tomogramme aus unterschiedlichen Teildaten

Weiterhin wurde getestet, ob die Rückrechnung aus einer Rekonstruktion mit homogenen Startmodell wieder dieses homogene Modell ergibt. Dafür wurden die geraden Strahlenweg dividiert mit den rekonstruierten Geschwindigkeiten der ersten tomografischen Berechnung mit homogenen Startmodell. Daraus ergaben sich Laufzeiten. Das Tomogramm der ersten Rekonstruktion war das Modell für diese Berechnung. Zusammen mit den Laufzeiten ergab sich wieder das homogene Startmodell der ersten Rekonstruktion.

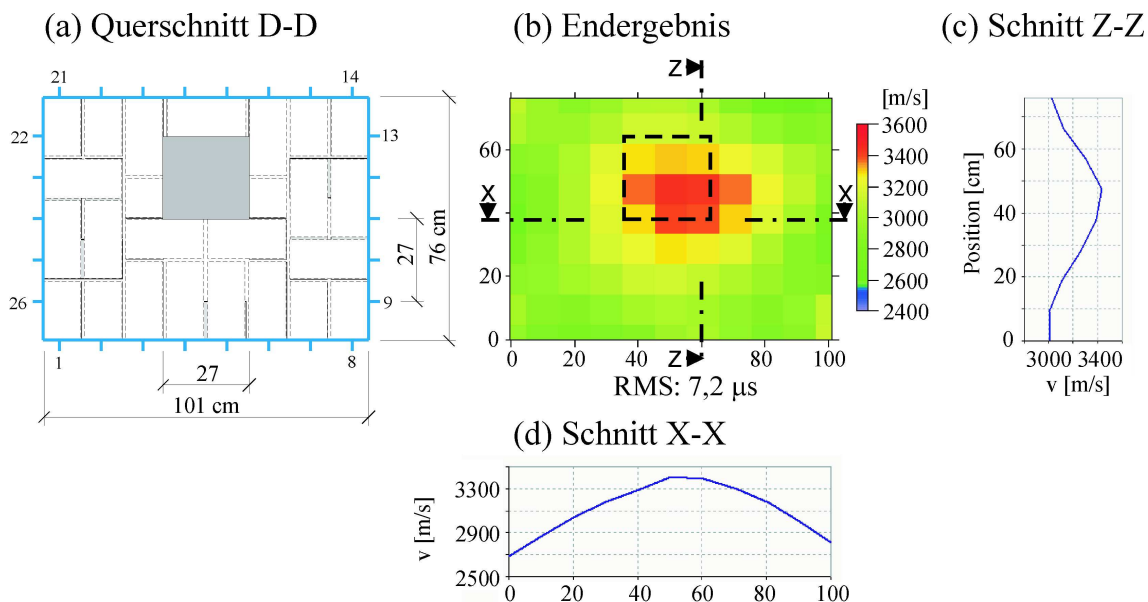


Abbildung 9.46: Endergebnis der Ultraschallmessung mit den Prüfköpfen SO205 (25 kHz) an Asterix, Schnitt D; homogenes Startmodell, Elementgröße 10x10 cm; 10 Iterationen

Eine Anpassung des Startmodells wurde nicht vorgenommen. Das beste Ergebnis wurde mit Daten erzielt, deren Differenz zwischen Hin- und Rückweg kleiner als  $10 \mu s$  und deren RMS-Residuen kleiner als  $5 \mu s$  waren. Das Endergebnis mit dem homogenen Startmodell und einer Netzgröße von  $10 \times 10$  cm ist in Abb. 9.46 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $3428/3007 \approx 1,14$ . Die Größe der Anomalie kann in diesem Fall nur als grobe Näherung bestimmen werden, da keine klare Trennung zwischen der erhöhten Geschwindigkeit der Anomalie und ihrer Umgebung erkennbar ist. Sie könnte ungefähr  $20 \times 20$  cm groß sein.

### 9.2.2. Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt D mit Radar

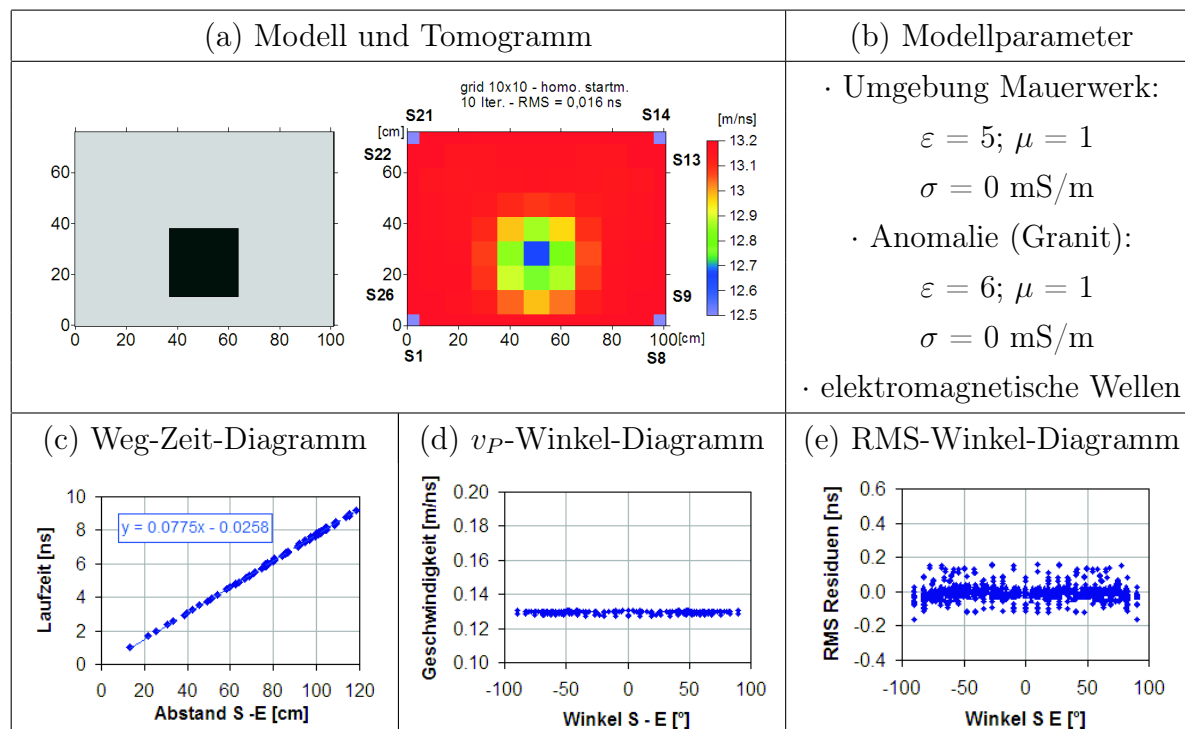
Die Messung erfolgte an den gleichen Positionen wie in den vorangegangene Beispielen erläutert. Mit dem Unterschied, dass die Messung mit der 1,5 GHz Antenne und der Radarapparatur von GSSI SIR 20 (Kap. 5.3) durchgeführt wurde.

**(a). Die Simulation** In der Literatur werden für Ziegel ebenso für Granit Dielektrizitätszahlen von  $\epsilon = 4 - 8$  angegeben (siehe Tab. 5.1, S. 26). Demnach besitzen die beiden Materialien sehr ähnliche dielektrische Eigenschaften. Deshalb wurden in der Simulation die dielektrischen Eigenschaften der zwei Materialien variiert. Für Mauerwerk wurde eine Dielektrizitätszahl von  $\epsilon = 4.0, 4.5, 5.0, 5.3$  und  $6.0$  und für Granit  $\epsilon = 5.5, 6.0$  und  $7.0$  angenommen. Ein Vergleich mit den gemessenen Laufzeiten zeigt, dass das Mauerwerk eine Dielektrizitätszahl von  $\epsilon \approx 5$  und Granit von  $\epsilon \approx 6$  haben müssen. Das Ergebnis der Simulationsrechnung, das verwendete Modell und die eingegebenen Parameter sind in Abb. 9.47 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende maximale Laufzeitdifferenz von ca.  $0,16$  ns, die demnach im Bereich des Messfehler von min.  $0,15$  ns (siehe Kap. 7.4.3, S. 7.4.3) ist. Das bedeutet, dass nur ca.  $3 \%$  der Strahlen eine größere Laufzeitdifferenz haben als  $0,15$  ns und somit nicht signifikant von der Anomalie beeinflusst werden. Die Wahrscheinlichkeit den Granitblock mit diesem Verfahren zu detektieren ist gering. Die Ursache sind die sehr ähnlichen elektromagnetischen Kennwerte der beiden Materialien.

#### **(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Messungen wurden mit der im Kap. 5.3 beschriebenen Apparatur und der 1,5 GHz Antenne unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Datenpunkte/Kurve: 1024
- Zeitachse (x-Achse): 30 ns



**Abbildung 9.47:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit elektromagnetischen Wellen - Asterix, Schnitt D

Die Antennen wurden an allen vier Seiten positioniert. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 18 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 1 bis 8 in Abb. 9.48 dargestellt. Die Bestimmung der Laufzeit erfolgte jeweils über das Picken des ersten Maximums. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Da die elektromagnetischen Eigenschaften von Mauerwerk und Granit für diesen Probekörper wiedererwartend sehr ähnlich sind, ist kaum ein Unterschied zwischen der gemessenen Laufzeit (blau) und den simulierten Laufzeiten mit (pink) und ohne (rot) Anomalie ersichtlich. Warum die elektromagnetischen Kennwerte des Mauerwerks von Asterix I und II sich von einander unterscheiden ist unklar. Die beiden Probekörper wurden im gleichen Zeitraum, aus dem gleichen Mörtel und der gleichen Ziegelart, jedoch an 2 unterschiedlichen Tagen gekauft, hergestellt. Die Probekörper wurden im Mai 2005 errichtet. Die Messung erfolgte ungefähr  $1\frac{1}{2}$  Jahre später. Die Ausgleichsfeuchte, die ebenfalls die Dielektrizitätszahl beeinflussen könnte, müsste die gleiche sein.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm in Abb. B.20 (b) zeigen keine systematischen Fehler. Der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit ist nur sehr

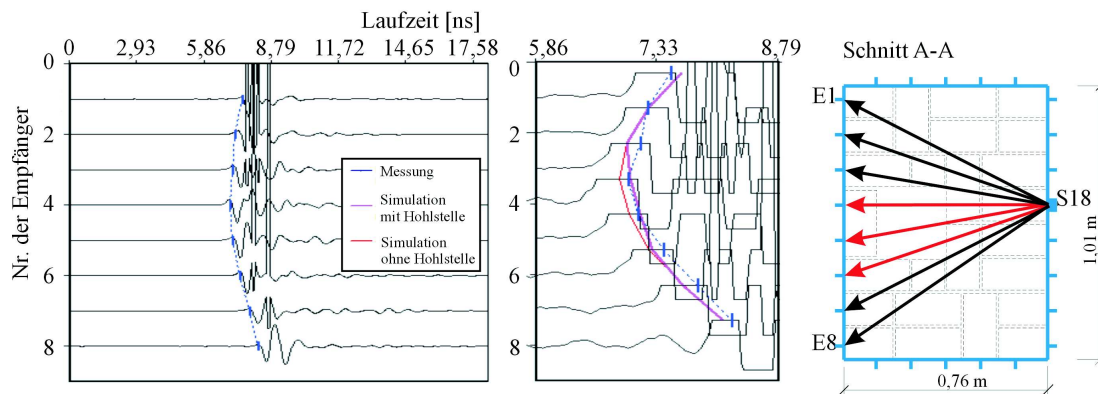


Abbildung 9.48: A-scans und Querschnitt des Senders Nr. 18 mit Empfängerposition Nr.1 bis 8

schwach in der Darstellung B.21 (a) erkennbar (schwarz markierte Bereich). Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander. Ca. 82 % aller Daten weichen weniger als 0,15 ns (= Messungenauigkeit) voneinander ab (Abb. B.21b). Somit ist das Gesetz von Fermat erfüllt.

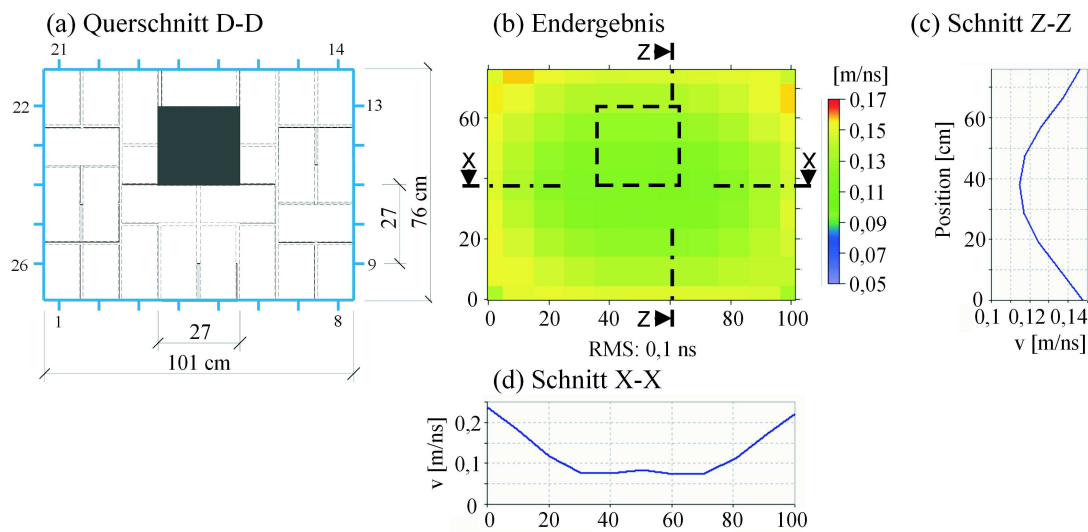


Abbildung 9.49: Ergebnis der Radarmessung an Asterix, Schnitt D mit 1,5 GHz

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 0,16 m/ns und eine Netzgröße von 10x10 cm angenommen. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 9.49 dargestellt.

(e). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.22a). Die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination nach dem 10. Iterationsschritt zeigen keine systematischen Fehler (siehe Abb. B.22b). Die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung sind erfüllt und das Ergebnis kann als stabil betrachtet werden.

(f). **Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Da die Simulation gezeigt hat, dass die elektromagnetischen Kenngrößen für Mauerwerk und Granit sehr eng beieinander liegen ( $\varepsilon_{Mauerwerk} \approx 5$  und  $\varepsilon_{Granit} \approx 6$ ) sowie die vorab durchgeführten Tests keine deutliche Laufzeitverzögerung infolge der Anomalie zeigten, ist es nicht sinnvoll weitere Auswertungen durchzuführen. Die Laufzeitdifferenz zwischen Anomalie und Umgebung liegt im Größenbereich des Messfehlers, da die elektromagnetischen Eigenschaften sich zu ähnlich sind. Deshalb konnte der Granitblock in dieser Messung nicht geortet werden.

### 9.3. Anomalie aus Holz

#### 9.3.1. Messungen am Prüfkörper "Asterix", Schnitt E mit Ultraschall

Die nächste Messung erfolgte am Laborprobekörper "Asterix", Schnitt E. Die Untersuchungsaufgabe war die Detektion einer Holzstütze mit den Maßen 10 x 10 x 30 cm (B x T x H). Der untersuchte Querschnitt von ca. 0,76 m x 1,01 m ist in Abb. 9.50 dargestellt. Im Kap. 8.3.1, S.67 ist eine detaillierte Beschreibung des Probekörpers zu finden. Die Auswertung der Daten erfolgt nach dem in Kap. 7.1.4 erläuterten Ablauf.

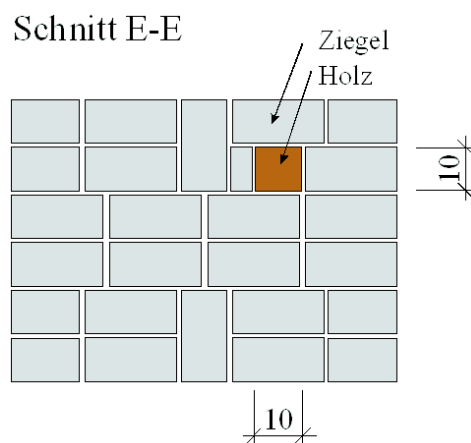


Abbildung 9.50: Asterix, Ansicht und Schnitt E



(a). **Simulation** Das Ergebnis der Simulationsrechnung, das verwendete Modell und die eingegebenen Parameter sind in Abb. 9.51 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben.

Da die Holzstütze 10x10 cm groß ist, musste ein Prüfkopfabstand von wenigstens 6,5 cm gewählt werden. Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende Laufzeitverzögerung infolge der Anomalien von ca.  $4,5 \mu\text{s}$ . Diese Verzögerung ist demnach im Größenbereich des Messfehlers von min.  $4\text{-}5 \mu\text{s}$  (siehe Kap. 7.4.2). Falls die angenommenen Materialkennwerte auch für diesen speziellen Fall zutreffen sollten, ist die Wahrscheinlichkeit gering die Holzstütze zu detektieren.

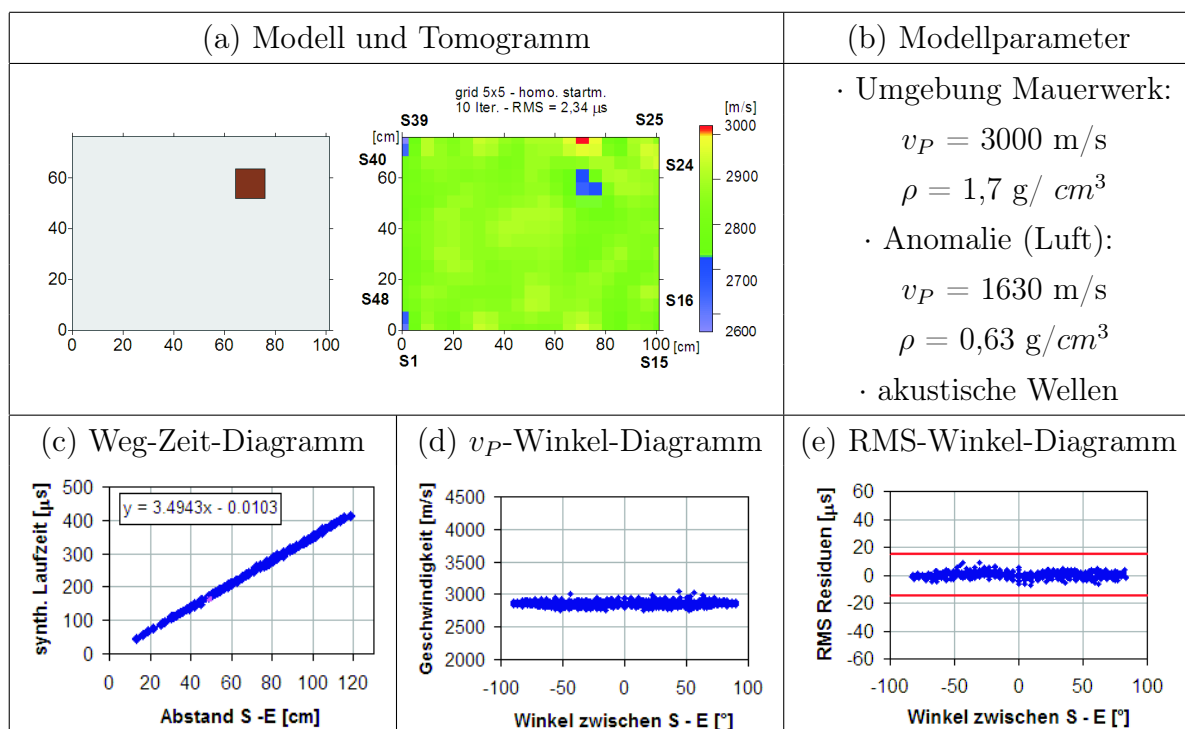
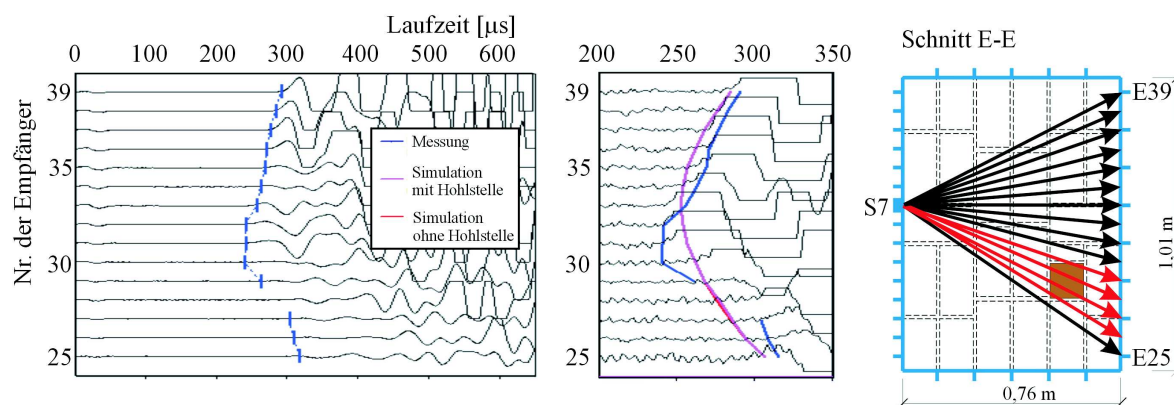


Abbildung 9.51: Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit akustischen Wellen - Asterix, Schnitt E

### (b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven

Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe SO205. Die Prüfköpfe wurden an allen vier Seiten positioniert. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 7 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 25 bis 39 in Abb. 9.52 dargestellt. Die Ersteinsätze sind recht verrauscht und deshalb schlecht be-

stimmbar. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve entspricht den gemessenen, die pinkfarbene Kurve den simulierten mit Holzstütze und die rote Kurve den simulierten Laufzeiten ohne Hohlstelle. Der Einfluss der Holzstütze auf die Laufzeit ist nicht erkennbar.



**Abbildung 9.52:** A-scans Senderposition 7 und Empfängerposition 25 bis 39 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

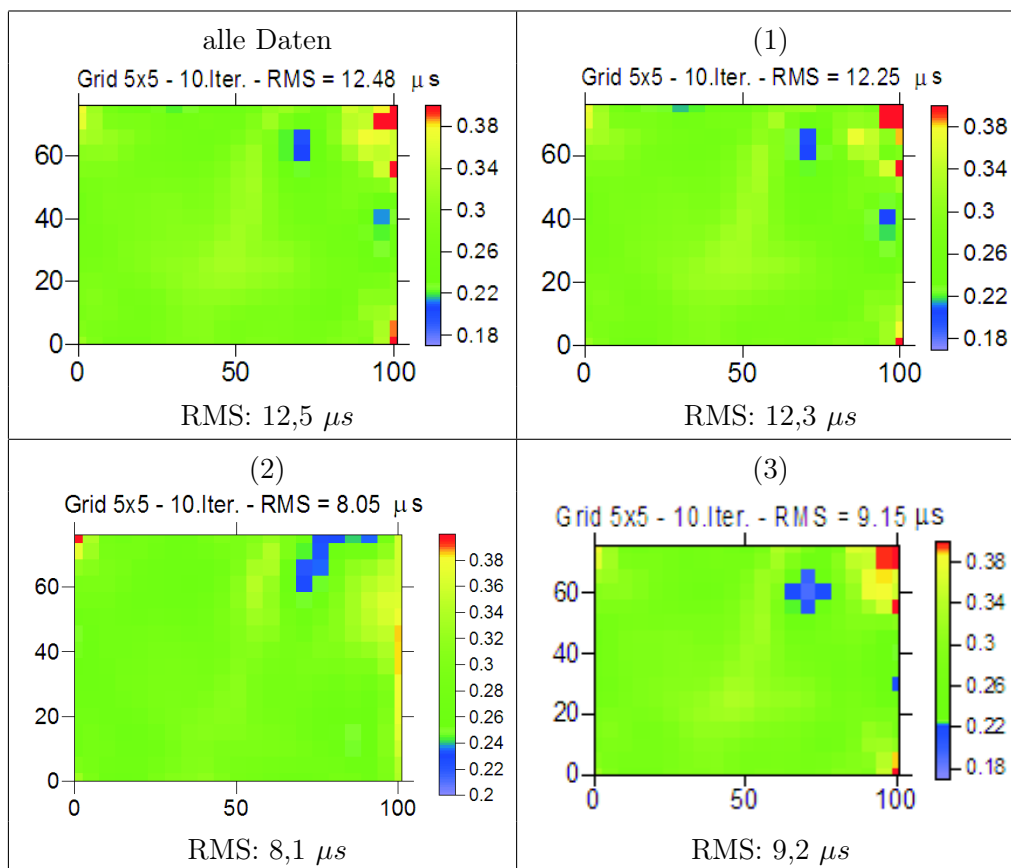
**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Die Überprüfung der gemessenen Laufzeiten zeigt im Geschwindigkeits-Winkel Diagramm einige Ausreißer und einen schwachen Winkelinfluss (siehe Abb. B.23b). In der Abb. B.24 (a) ist der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit ohne Kenntnis der Simulation schwer erkennbar (schwarz markierte Bereich).

Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander. Über 60 % aller Daten weichen weniger als  $5 \mu s$  (= Messungenauigkeit) voneinander ab (Abb. B.24b). Somit ist das Gesetz von Fermat erfüllt. Da kein wesentlicher systematischer Fehler erkennbar ist, wurde mit allen gepickten Laufzeiten weitergerechnet.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von  $3000 \text{ m/s}$  angenommen. Um das optimale Netz zu finden, wurden die Elementgrößen von  $1 \times 1 \text{ cm}$ ,  $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$ ,  $5 \times 5 \text{ cm}$  bis  $10 \times 10 \text{ cm}$  variiert. Die Iterationen wurde jeweils nach 10 Schritten abgebrochen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. B.25 dargestellt. Als optimales Netz wurde die Größe  $5 \times 5 \text{ cm}$  ausgewählt, da diese Größe im Bereich des Prüfkopfabstandes von  $6,5 \text{ cm}$  liegt und noch eine akzeptable Strahlenüberdeckung erreicht wird.

In den Tomogrammen ist die Holzstütze sichtbar. Ebenfalls fallen in der zur Holzstütze am nächsten gelegenen Ecke Artefakte auf. Der Grund dafür ist, dass kurz nach der Erstellung des Probekörpers Asterix II dieser verschoben wurde. Dabei brachen die oberen 30-40 cm zwischen den Position 19 bis 26 heraus und musste nachträglich wieder eingefügt werden. Die Ursache dafür waren Spannungen infolge des Quellens der Holzstütze während der Einmörtelung. Dieses nachträgliche Einfügen hatte zur Folge, dass für diese Positionen die Laufzeiten sehr schlecht bestimmbar war.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.26a). Die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination nach dem 10. Iterationsschritt zeigen abgesehen von der bereits erwähnten Winkelabhängigkeit, die das Ergebnis nur unwesentlich beeinflusst, keine weiteren Einflüsse (siehe Abb. B.26b). Die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung sind erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

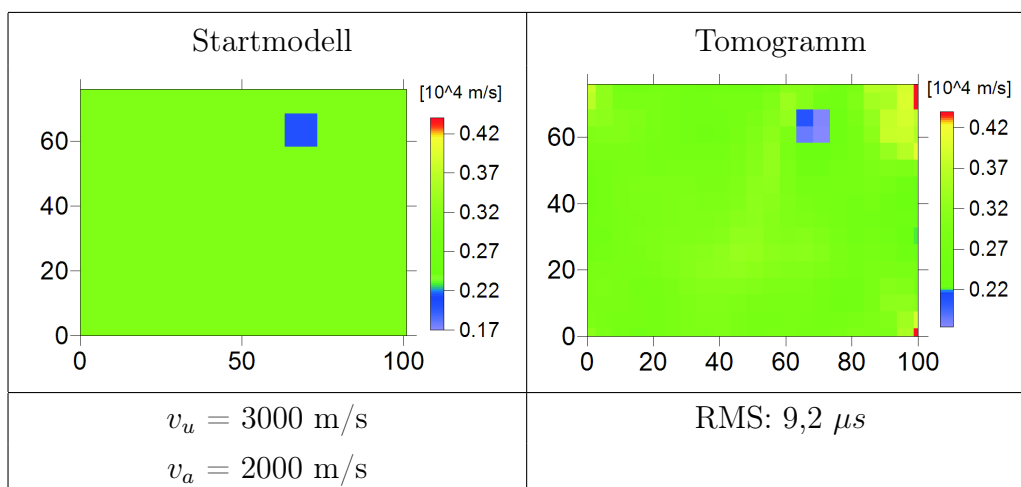


**Abbildung 9.53:** Tomogramme aus unterschiedlichen Teildaten

**(f). Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Da sich die Anomalie nur geringfügig hervorhebt und wenig abgrenzt, ist die Auswertung von Teildatensätzen sinnvoll. Es wurden insgesamt 11 verschiedene Teildatensätze gebildet und rekonstruiert. Ausgewählte Ergebnisse sind in der Abb. 9.53 zusammengestellt. In der nachfolgenden Auflistung sind alle verwendeten Kriterien zur Auswahl von Teildaten aufgeführt. Jeweils ein Beispiel-Tomogramm ist in Abb. 9.53 zu finden.

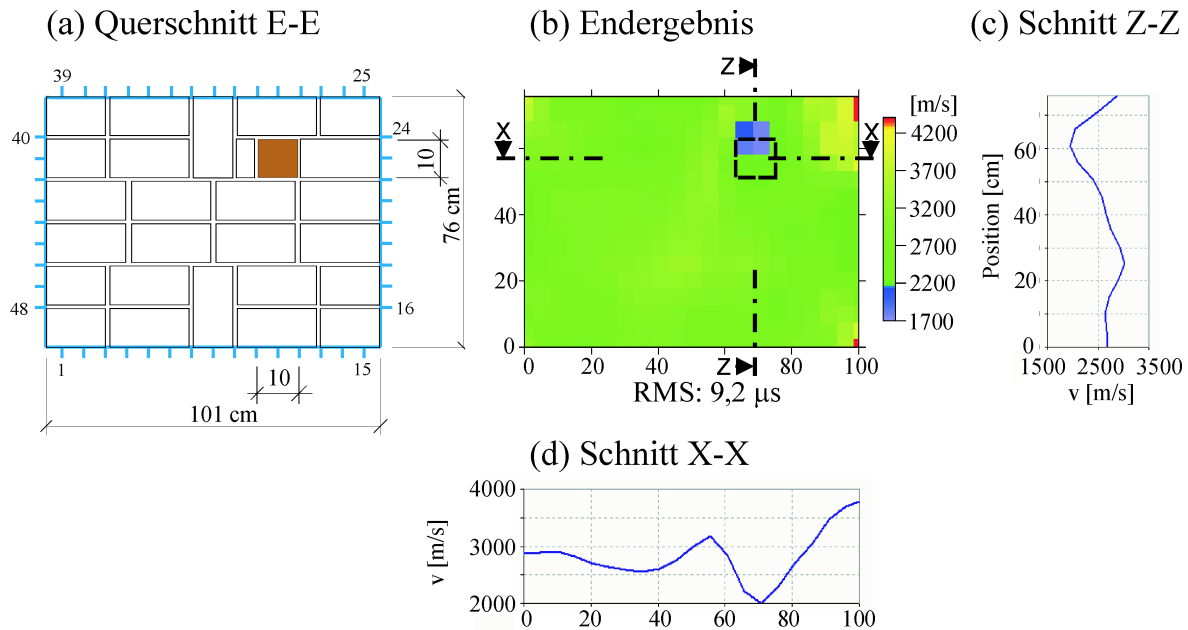
1. Bestimmte Prüfkopfpositionen wurden eliminiert (zwischen Nr. 16 bis 28).
2. Nur die Laufzeiten von speziellen Sender- und Empfängerkombinationen wurden ausgewählt, z.B. Prüfköpfe auf gegenüberliegenden Seiten.
3. Der Hin- und Rückweg wurde verglichen und es wurden nur Daten ausgewählt, deren Differenz nicht größer als  $15 \mu s$  beträgt.

**(g). Experimentelle Untersuchung - Anpassung des Startmodells** Die Anpassung des homogenen Startmodells erfolgte durch eine Geschwindigkeitssenkung von einzelnen Elementen des Netzes. In Abb. 9.54 ist das veränderte Startmodell und das dazugehörige Tomogramm dargestellt.



**Abbildung 9.54:** Veränderung des Startmodells mit dazugehörigen Tomogrammen und der gewählten Parameter ( $v_a$  ... Geschwindigkeit der Anomalie,  $v_u$  ... Geschwindigkeit der Umgebung und RMS-Residuum)

Das beste Ergebnis wurde mit Daten erzielt, deren Differenz zwischen Hin- und Rückweg kleiner als  $15 \mu s$  sind. Das Endergebnis mit dem angepassten Startmodell und einer Netzgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}$  ist in Abb. 9.55 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $1780/2870 \approx 0,62$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie bei ca.  $10 \times 10 \text{ cm}$ .



**Abbildung 9.55:** Endergebnis der Ultraschallmessung mit den Prüfköpfen SO205 (25 kHz) an Asterix, Schnitt E; angepasstes Startmodell, Elementgröße 5x5 cm; 10 Iterationen

### 9.3.2. Messungen am Prüfkörper “Asterix“, Schnitt E mit Radar

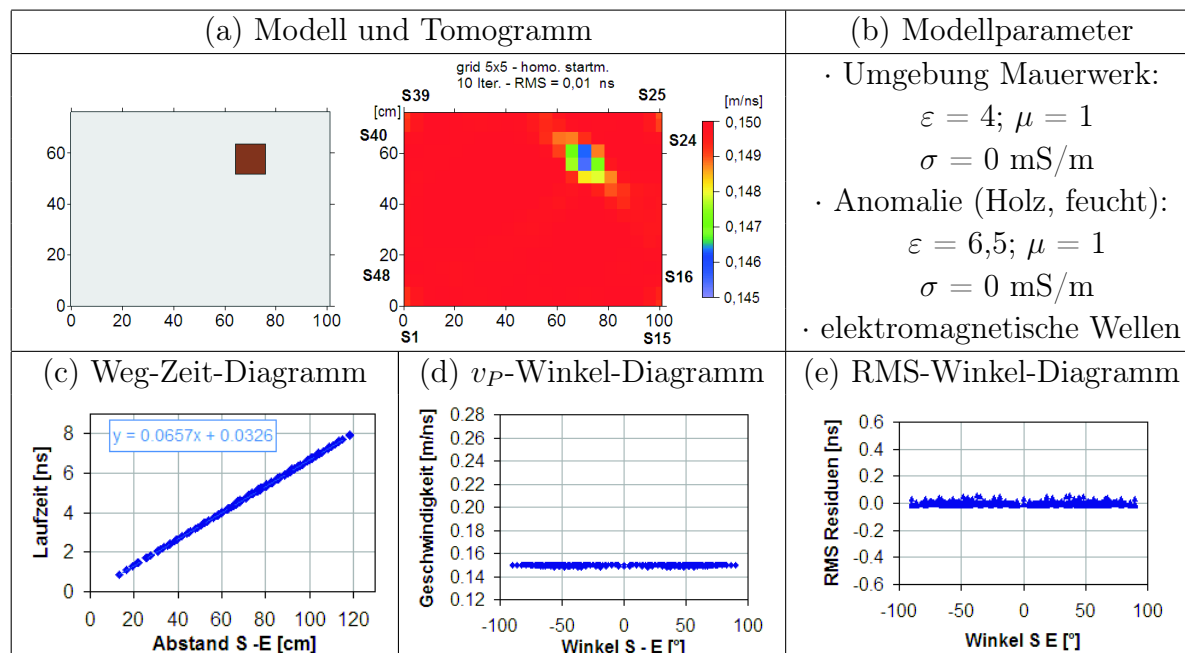
Die Messung erfolgte an den gleichen Positionen wie in den vorangegangene Beispielen erläutert. Mit dem Unterschied, dass die Messung mit der 1,5 GHz Antenne und der Radarapparatur von GSSI SIR 20 (Kap. 5.3) durchgeführt wurde.

**(a). Die Simulation** Das Ergebnis der Simulationsrechnung, das verwendete Modell und die eingegebenen Parameter sind in Abb. 9.56 (a) und (b) dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung (c)-(e) die dazugehörigen Weg-Zeit-, Geschwindigkeits-Winkel- und RMS-Winkel-Diagramme angegeben. Für das dargestellte Ergebnis wurde eine feuchte Holzstütze angenommen (lt. Literatur  $\varepsilon = 2 - 7$ , siehe Tab. 5.1, S. 26). Die Simulation des Querschnitts ergab eine zu erwartende Laufzeitdifferenz von ca. 0,1 ns, die demnach im Größenbereich des Messfehler von min. 0,15 ns (siehe Kap. 7.4.3) liegt.

#### **(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Messungen wurden mit der im Kap. 5.3 beschriebenen Apparatur und der 1,5 GHz Antenne unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

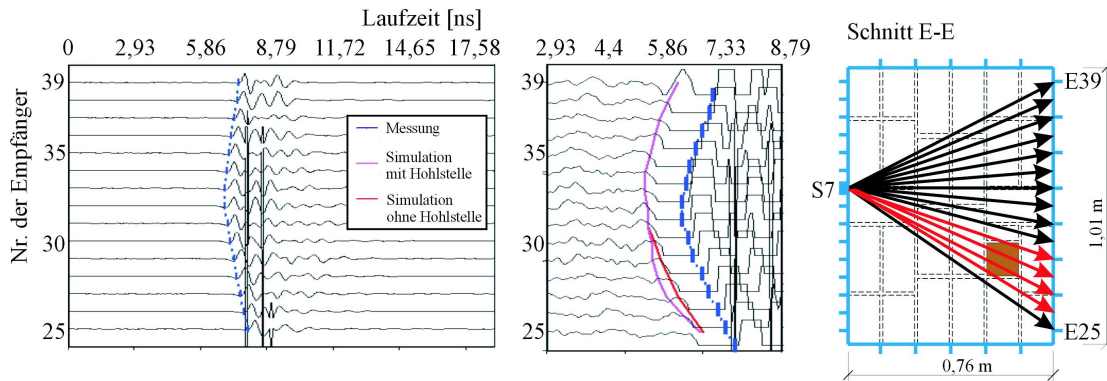
- Datenpunkte/Kurve: 1024
- Zeitachse (x-Achse): 30 ns



**Abbildung 9.56:** Simulation des zu untersuchenden Querschnitts mit elektromagnetischen Wellen - Asterix, Schnitt E

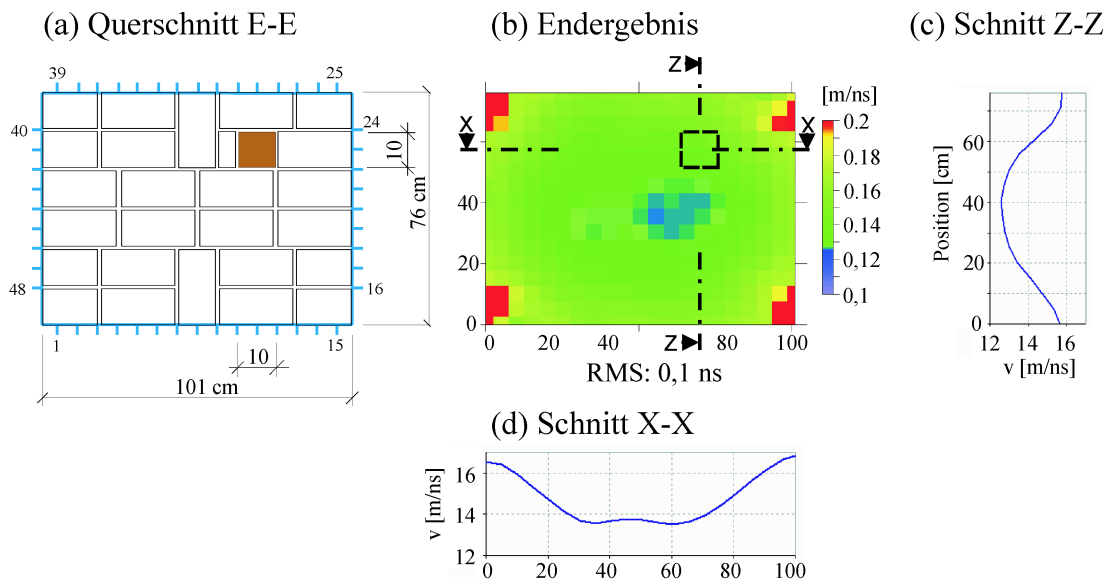
Die Antennen wurden an allen vier Seiten positioniert. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 7 mit den gegenüberliegenden Empfängerpositionen Nr. 25 bis 39 in Abb. 9.57 dargestellt. Die Bestimmung der Laufzeit erfolgte jeweils über das Picken des ersten Maximums. In den Darstellungen der A-scans sind die Verläufe verschiedener Laufzeiten ebenfalls mit eingetragen. Die blaue Kurve entspricht den gemessenen, die pinkfarbene Kurve den simulierten mit Holzstütze und die rote Kurve den simulierten Laufzeiten ohne Holzstütze. Der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit ist nicht erkennbar.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** Das Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm in Abb. B.27 (b) zeigt einen geringe Winkelabhängigkeit und einige Ausreißer. In der Abb. B.28 (a) ist der Einfluss der Anomalie auf die Laufzeit ohne Kenntnis der Simulation schwer erkennbar (schwarz markierte Bereich). Vergleich man die gemessenen mit den simulierten Werte, so verhalten sich die gemessenen Daten ähnlich der Simulation mit feuchter Holzstütze. Die Laufzeitdifferenzen zwischen den Hin- und Rückwegen unterscheiden sich nur gering voneinander. Über 80 % aller Daten weichen weniger als 0,15 ns (= Messungenauigkeit) voneinander ab (Abb. B.28d). Somit ist das Gesetz von Fermat erfüllt.



**Abbildung 9.57:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 7 mit Empfängerposition Nr. 25 bis 39 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

(d). **Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 0,16 m/ns und eine Netzgröße von 5x5 cm angenommen. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 9.58 dargestellt. In den vier Ecken der tomografischen Darstellung bilden sich relativ starke Artefakte aus. Das lässt zum einen auf eine geringere Strahlenüberdeckung schließen und zum anderen auf eine Winkelabhängigkeit.



**Abbildung 9.58:** Ergebnis der Radarmessung an Asterix, Schnitt E mit 1,5 GHz; homogenes Startmodell, Elementgröße 5x5 cm; 10 Iterationen

(e). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** Der Verlauf der RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt ist stetig fallend (siehe Abb. B.29a). Die Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination nach dem 10. Iterationsschritt zeigen einen winkelabhängigen systematischen Fehler (siehe Abb. B.29b). Somit bestätigt sich die oben genannte Vermutung, dass die Artefakte eine winkelabhängige Ursache haben könnten. Die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung sind erfüllt und die Ergebnisse können als stabil betrachtet werden.

(f). **Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Da in der erste Rekonstruktion die Holzstütze nicht sichtbar war und ein systematischer Fehler festgestellt wurde, sind Teildatensätze ausgewählt wurden. Das Auswahlkriterium war die Differenz zwischen Hin- und Rückweg. Zum Einen sollte die Laufzeitdifferenz kleiner  $0,15 \mu s$  und zum Anderen kleiner als  $0,25 \mu s$  sein. Das Ergebnis änderte sich nur marginal. Die elektromagnetischen Eigenschaften zwischen Holz und Mauerwerk sich wahrscheinlich zu ähnlich. Deshalb konnte die Holzstütze in dieser Messung nicht geortet werden. Es folgte aus diesem Grund auch keine Anpassung des Startmodells.

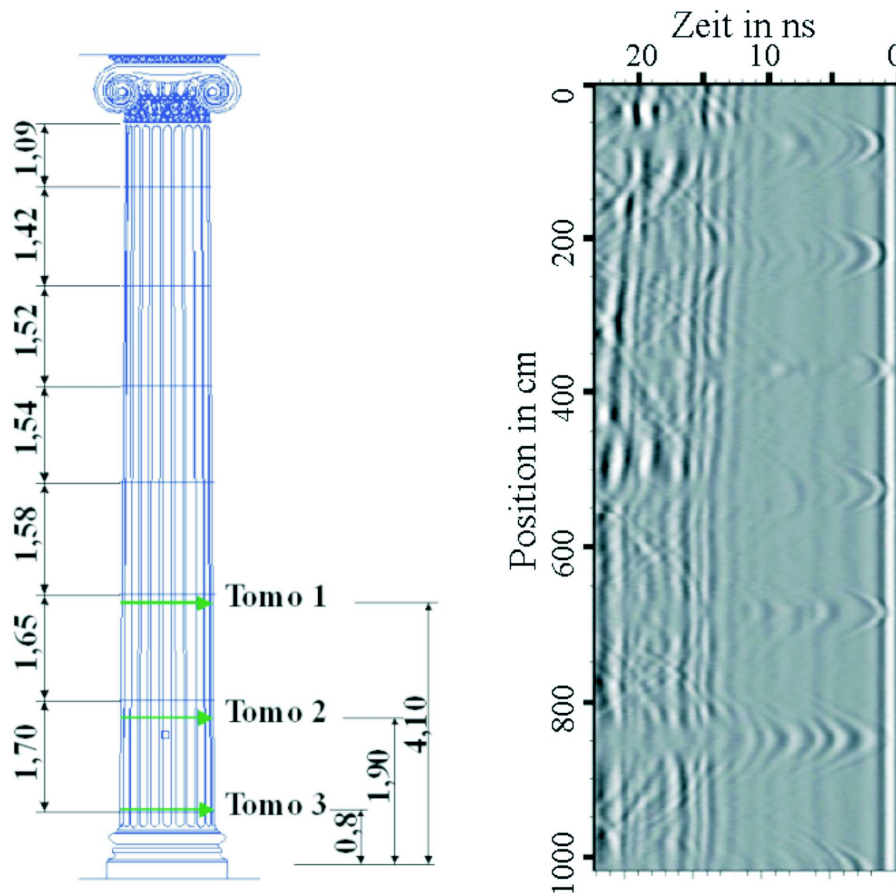
## 9.4. Anomalie aus Mörtel

### 9.4.1. Untersuchung einer Säule im Eingangsbereiches des Alten Museums in Berlin, mit Radar

An einer ausgewählten Säule des Atriums sollten Fragen bezüglich der inneren Struktur geklärt werden. Hierbei wurde beispielhaft die äußerste Säule am westlichen Ende der Eingangshalle ausgewählt, um die Anwesenheit und Art der Verbindungselemente der einzelnen Trommeln zu untersuchen. Des Weiteren wurden die Säulen im 2. Weltkrieg durch Einschüsse geschädigt. Im Zuge des Wiederaufbaus wurden diese mit Reparaturmörtel wieder geschlossen. Es stellte sich die Frage, wie tiefgreifend und "kraftschlüssig" (d.h. Ablösung zwischen Originalsubstanz und Reparaturmörtel) die Reparaturen ausgeführt wurden.

Die Messungen erfolgten mit der in Kap. 5.3 beschriebenen Radarapparatur SIR 10A von GSSI. Um einen Überblick über den Aufbau der ausgewählten westlichen Säule zu bekommen, wurden zunächst Reflexionsmessungen an vier vertikalen, gleichmäßig auf dem Säulenumfang verteilte Radarmessspuren mit der 900 MHz-Antenne durchgeführt. Die Messungen erfolgten über die volle Länge der Säule von 10.2 m, wobei die Weglänge über ein an der Antenne befestigtes Messrad aufgezeichnet wurde. Abb. 9.59 zeigt eines der dabei entstandenen Radargramme. Darin sind die Oberflächen- und das Rückwandsignal erkennbar. Die Laufzeit des Rückwandechos steigt vom Kopf der Säule bis



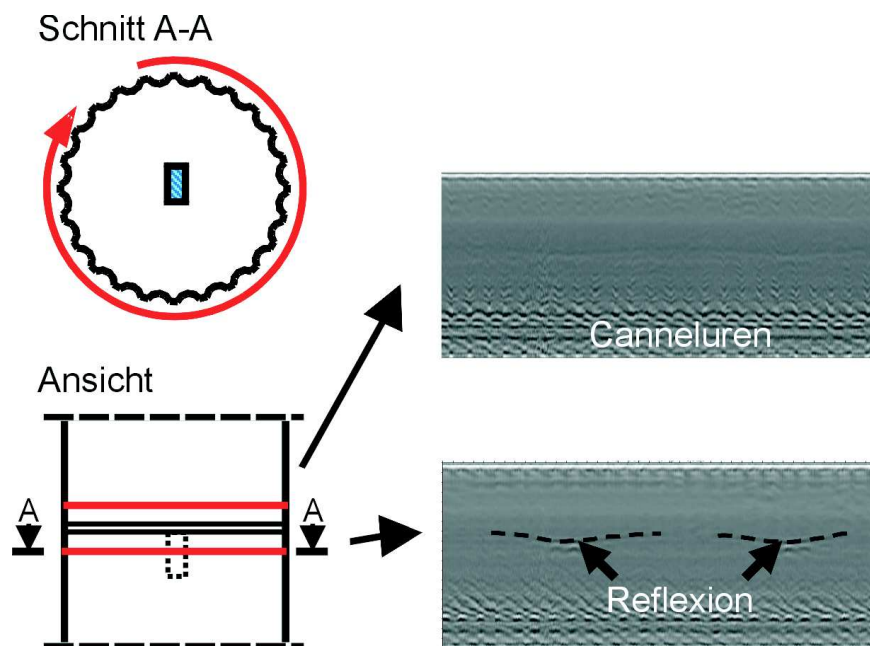


**Abbildung 9.59:** Untersuchte Säule (links) und Radargramm einer senkrechten Messspur, mit der 900 MHz Antenne

zum Sockel kontinuierlich an, was durch den zunehmenden Umfang der Säule begründet ist. Unmittelbar unterhalb des Oberflächensignals sind in gleichmäßigem Abstand hyperbelförmige Reflexionen zu erkennen, die von den Fugen zwischen den einzelnen Säulensegmenten hervorgerufen werden. Die Intensität der Reflexionen ist stark ausgeprägt, was auf einen metallischen Reflektor schließen lässt. Die Länge der Reflexion beschränkt sich auf den Fugenbereich. In der Vergangenheit diente Blei als Gleitmittel während der Errichtungsphase, um die Trommeln besser zueinander ausrichten zu können. Deshalb wird angenommen, dass die Fugen teilweise mit Blei gefüllt sind.

Für detaillierte Untersuchungen der Fugen zwischen den Säulensegmenten wurden horizontale Messlinien entlang des Säulumfanges in Bereichen oberhalb und unterhalb der Fugen mit der 1,5 GHz-Antenne in Reflexion und Transmission durchgeführt. In Abb. 9.60 sind entsprechende Radargramme der Reflexionsmessung dargestellt. Wegen der Canneluren erscheint die Rückwandreflexion als wellenförmiges Band. Das Radargramm, welches unterhalb der Fuge aufgenommen wurde, zeigt auffällige Reflexionen in einer

Tiefen von 70 und 75 cm. Die Lage und Intensität dieser Reflexion ändern sich mit der Position der Antenne auf der 360° umfassenden Messspur. Bei einer Antennenpositionen von 180° sind die Reflexionen gleich tief, woraus geschlossen werden kann, dass eine rechteckige Hohlstelle (Länge ca. 7 bis 10 cm, Breite 2 bis 3 cm) in der Mitte der Segmente jeweils unterhalb der Fugen vorhanden ist. Dieses sogenannte Wolfsloch, am oberen Ende jeder Trommel angebracht, diente wahrscheinlich der Montage und Ausrichtung der Säulensegmente. Es konnten keinerlei Hinweise auf metallische Segmentverbindungen gefunden werden.



**Abbildung 9.60:** Querschnitt im Fugenbereich und horizontale Messspuren oberhalb und unterhalb der Fuge

Die Positionen für die Transmissionsmessung befanden sich in der Ebene 1 und 2 unterhalb der Fuge. Hier wird stellvertretend auf die Ergebnisse der Untersuchungen in der Ebene 2 eingegangen.

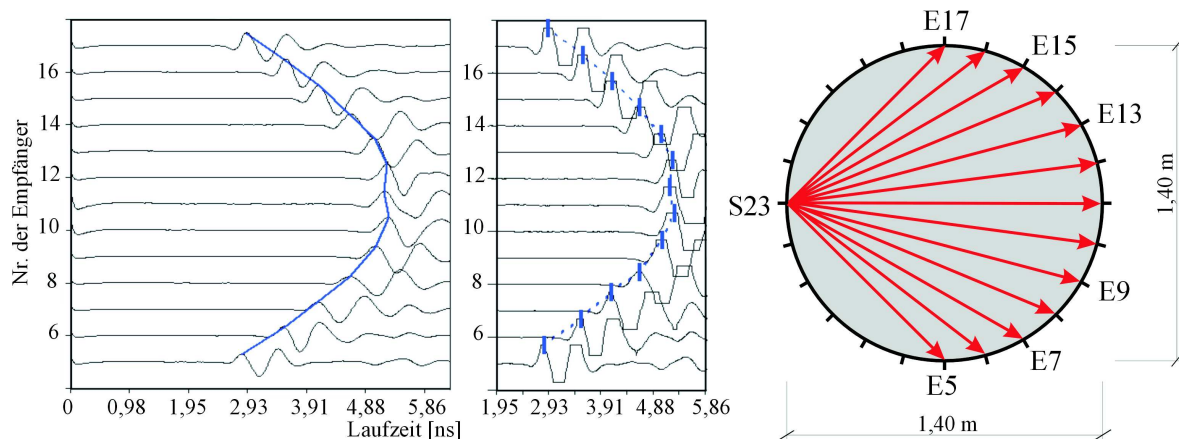
Die infolge von Einschüssen mit Reparaturmörtel restaurierten Bereiche der Säulenoberfläche konnten nicht detektiert werden. Mit den verwendeten Antennen können Elemente im oberflächennahen Bereich bis zu einer Tiefe von 4,5 cm nicht aufgelöst werden, da sie von der Reflexion der Oberfläche überlagert werden. Da sich die Reparaturstellen nur im Oberflächenbereich der Säule befinden konnten ihre Tiefe nicht bestimmt werden.

**(a). Die Simulation** Es wurden keine Simulationen des Querschnitts durchgeführt.

**(b). Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**

Die Transmissionsmessungen wurden mit der im Kap. 5.3 beschriebenen Apparatur und der 1,5 GHz Antenne unter folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Datenpunkte/Kurve: 1024
- Zeitachse (x-Achse): 10 ns



**Abbildung 9.61:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 23 mit Empfängerposition Nr. 5 bis 17 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

Die Antennen wurden an 24 Positionen rund um die Säule in einem Abstand von ca. 18 cm aller  $15^\circ$  positioniert. Je Senderposition wurden nur die auf dem gegenüberliegenden Halbkreis gelegenen Empfängerpositionen verwendet. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 23 mit den Empfängerpositionen Nr. 5 bis 17 in Abb. 9.61 dargestellt. Die Bestimmung der Laufzeit erfolgte jeweils über das Picken des ersten Maximums. Die blaue Kurve entspricht den gemessenen Laufzeiten.

**(c). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** In der oberen Zeile der Abb. 9.62 sind die vier Diagramme zur Beurteilung der Datenqualität dargestellt. Im Weg-Zeit-Diagramm und im Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm fällt eine Gruppe von Ausreißern auf. Die farbcodierte Darstellung der Geschwindigkeit jedes Senders und Empfängers zeigt, dass die Sender Nr. 8, 14 und 19 aus dem Rahmen fallen. Diese Laufzeiten müssen aus dem Datensatz entfernt werden, da sie das Ergebnis wesentlich beeinflussen. Die zweite Zeile zeigt die Diagramme der bereinigten Daten, die einer geringen Winkelabhängigkeit unterliegen. Ein Einfluss einer Anomalie ist in der farbcodierten Darstellung der Laufzeiten jedes Senders und Empfängers nicht zu erkennen.

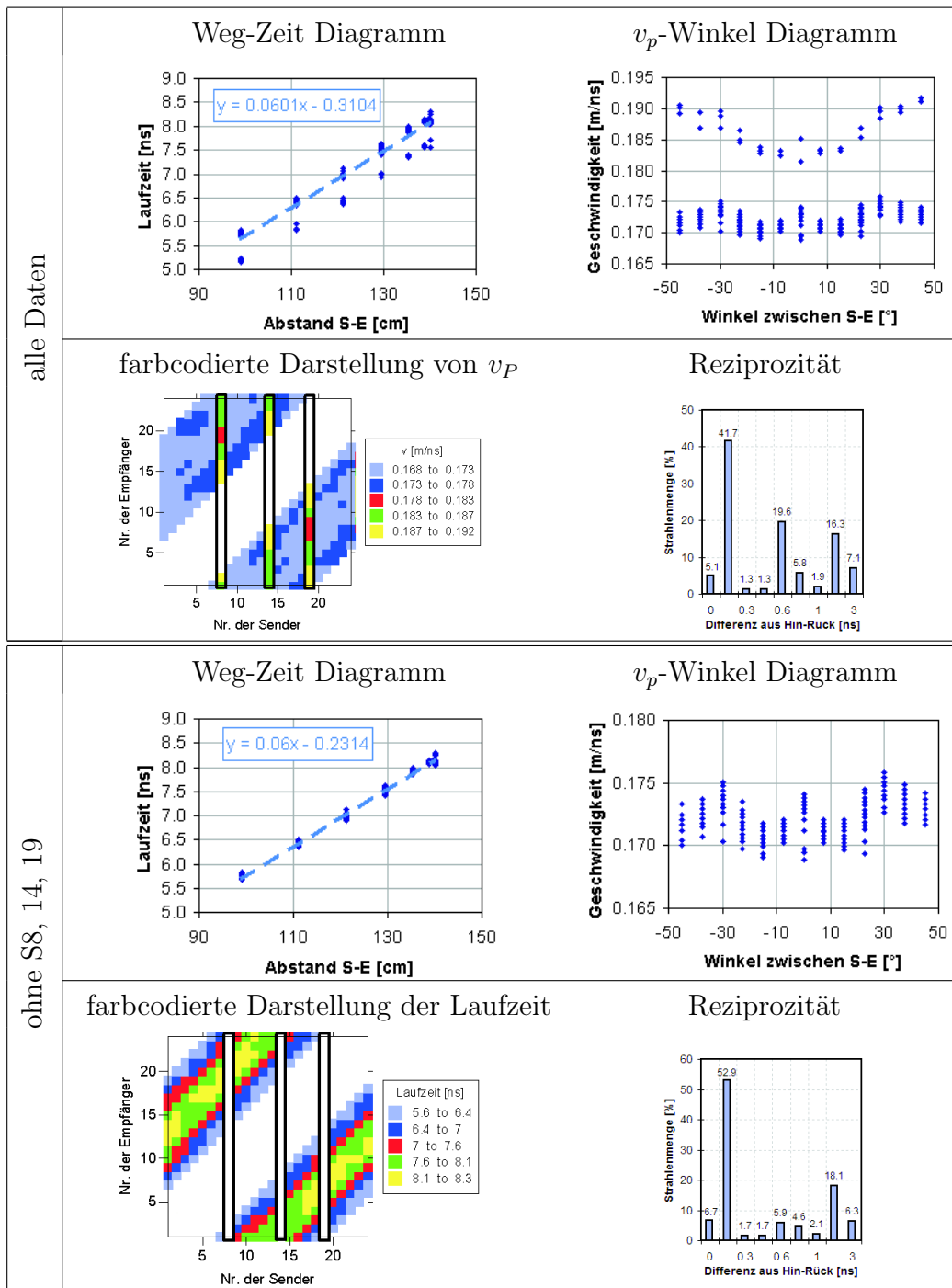
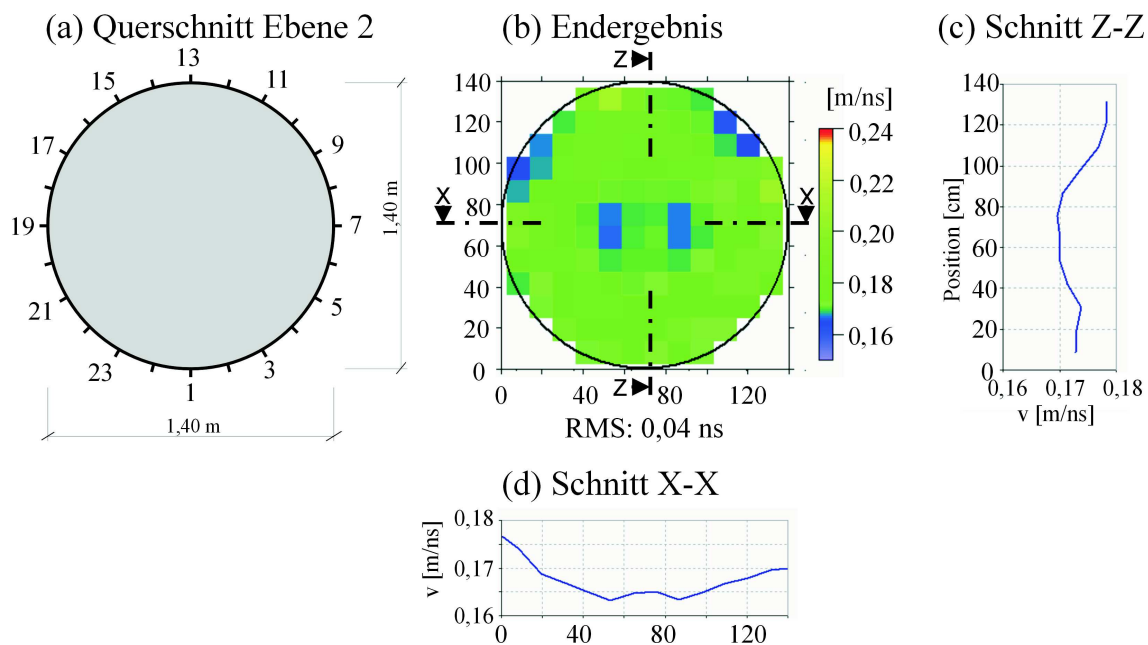


Abbildung 9.62: Prüfung der Datenqualität; Weg-Zeit-Diagramm; Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm; farbcodierte Darstellung der Geschwindigkeit (oben) bzw. Laufzeit (unten) jedes Senders und Empfängers; Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg

Ca. 47 % aller Daten weichen weniger als 0,15 ns (= Messungengenauigkeit) voneinander ab. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Gesetz von Fermat erfüllt ist. Jedoch unterliegen die Daten einer größeren Streuung als die der Labormessungen, was zu erwarten war. Ob diese Streuungen tolerierbar sind, kann erst durch die folgenden Auswertungen beurteilt werden.

**(d). Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Die Rekonstruktion der Laufzeiten erfolgte mit dem Programm GeoTom. Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 0,175 m/ns angenommen und eine Netzgröße von 10x10 cm gewählt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 9.63 dargestellt.



**Abbildung 9.63:** Ergebnis der Radarmessung an einer Säule des Alten Museums, Ebene 2 mit 1,5 GHz; homogenes Startmodell, Elementgröße 10x10 cm; 10 Iterationen

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** In der Abb. 9.64 sind die beiden Diagramme zur Prüfung der Ergebnisstabilität für alle und für die bereinigten Daten dargestellt. Im Diagramm 9.64 (a) ändern sich die RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt nur unwesentliche und verbleiben auf einem relativ hohem Niveau. Der Datensatz ist demnach zu stark fehlerbehaftet und muss geändert werden. Die beiden letzten Diagramme (c) und (d) zeigt das Verhalten der RMS-Residuen der bereinigten Daten. Daraus erkennt man, dass die Stabilitätskriterien der tomografischen Rechnung erfüllt sind und die Ergebnisse als stabil betrachtet werden können.

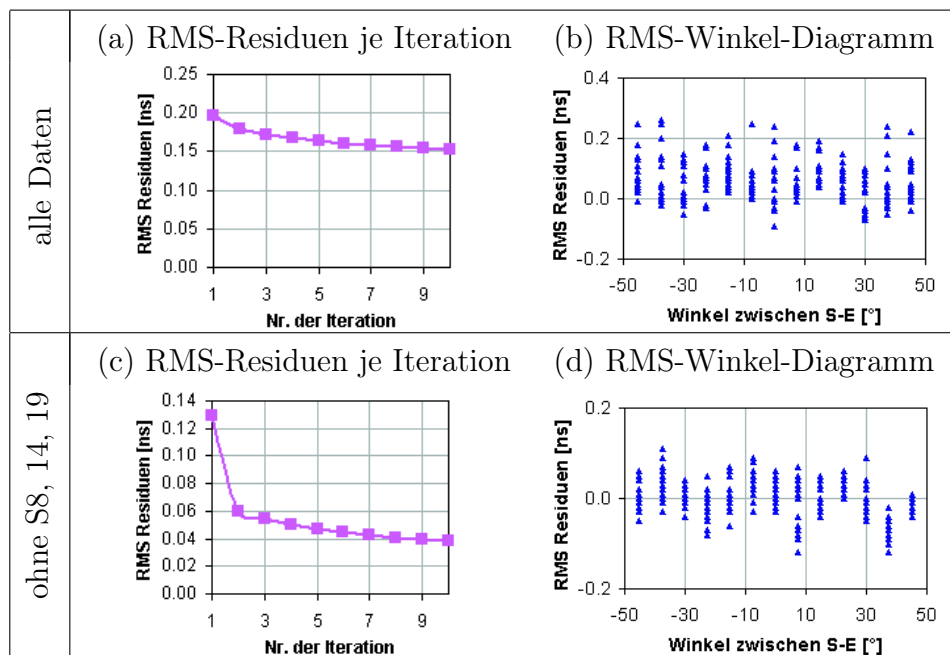


Abbildung 9.64: Prüfung der Ergebnisstabilität - RMS-Residuen je Iterationsschritt und RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

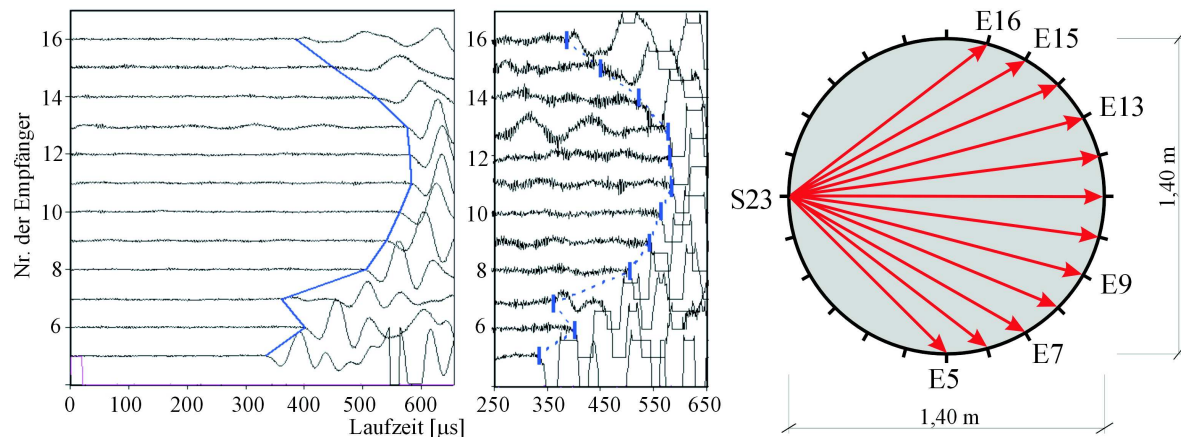
(f). **Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Es wurden weder Teildatensätze ausgewählt noch das Startmodell angepasst. Das Endergebnis mit dem homogenen Startmodell und einer Netzgröße von 10x10 cm ist in Abb. 9.63 dargestellt. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $16,9/17,5 \approx 0,97$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie zwischen 40x40 cm und 60x60 cm.

#### 9.4.2. Transmissionsmessungen mit Ultraschall an einer Säule im Eingangsbereiches des Alten Museums in Berlin, mit den Prüfköpfen SO202 (25 kHz)

Die Messung erfolgte an der bereits im vorherigen Beispiel beschriebenen Säule des Alten Museums in der Ebene 2 und 3 unterhalb der Fuge. Hier soll nur auf die Ergebnisse der Messung in der Ebene 2 eingegangen werden.

(a). **Simulation** Es wurden keine Simulationen des Querschnitts vorab berechnet.

(b). **Experimentelle Untersuchung - Gerätespezifikation und Laufzeitkurven**  
 Die Messungen wurden mit der im Kap. 4.6.4 beschriebenen Apparatur, Geräteeinstellungen und den Prüfköpfe SO205. Die Antennen wurden an 24 Positionen rund um die

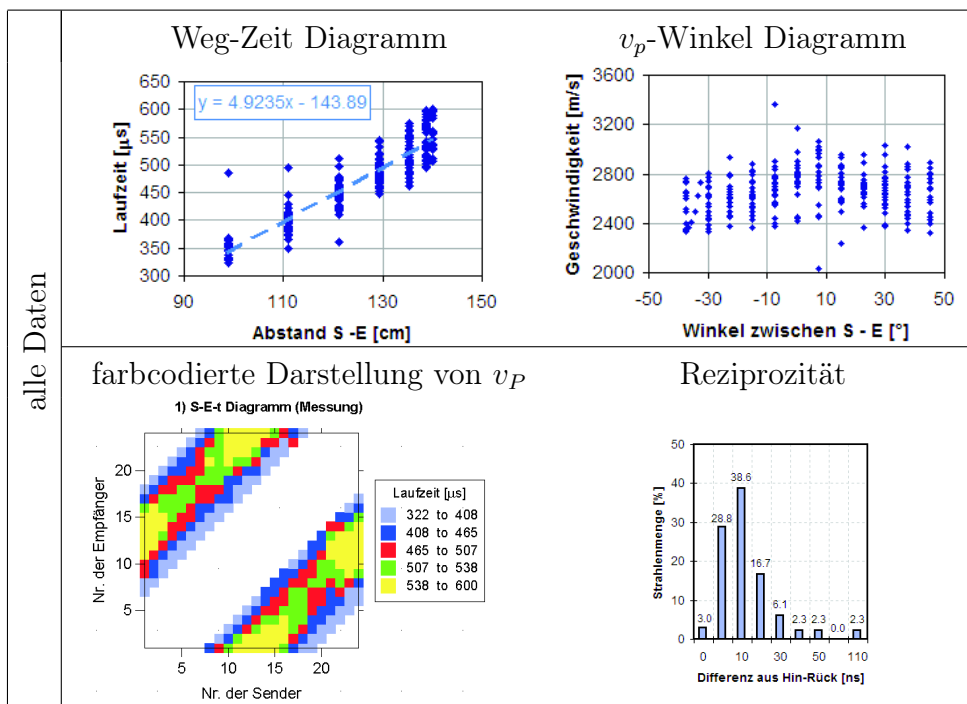


**Abbildung 9.65:** Beispiel eines Satzes von A-scans der Senderposition Nr. 23 mit Empfängerposition Nr. 5 bis 16 und dazugehöriger Lage im Querschnitt

Säule in einem Abstand von ca. 18 cm aller  $15^\circ$  positioniert. Je Senderposition wurden nur die auf dem gegenüberliegenden Halbkreis gelegenen Empfängerpositionen verwendet. Um einen Eindruck der Qualität der Messung zu erhalten, ist ein Satz von A-scans der Senderposition Nr. 23 mit den Empfängerpositionen Nr. 5 bis 16 in Abb. 9.65 dargestellt. Die Ersteinsätze sind recht verrauscht und deshalb schlecht bestimmbar. Die blaue Kurve entspricht den gemessenen Laufzeiten.

(c). **Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Datenqualität** In der Abb. 9.66 sind die vier Diagramme zur Beurteilung der Datenqualität zu sehen. Im Weg-Zeit-Diagramm und im Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm fallen Ausreißern und eine relativ starke Streuung der Daten auf. Nur ca. 32 % aller Daten weichen weniger als  $5 \mu s$  (= Messungenauigkeit) voneinander ab. Jedoch sind über 70 % der Differenzen kleiner als  $10 \mu s$ . Es kann davon ausgegangen werden, dass das Gesetz von Fermat erfüllt ist. Ob diese Streuungen tolerierbar sind, kann erst durch die folgenden Auswertungen beurteilt werden.

(d). **Experimentelle Untersuchung - Erste tomografische Rekonstruktion mit homogenem Startmodell** Als Startmodell wurde eine homogene Verteilung der Geschwindigkeiten von 2400 m/s angenommen. In Abb. 9.67 ist das Ergebnis und die dazugehörigen Residuen der ersten Rekonstruktion für eine Netzgröße von  $10 \times 10$  cm dargestellt.

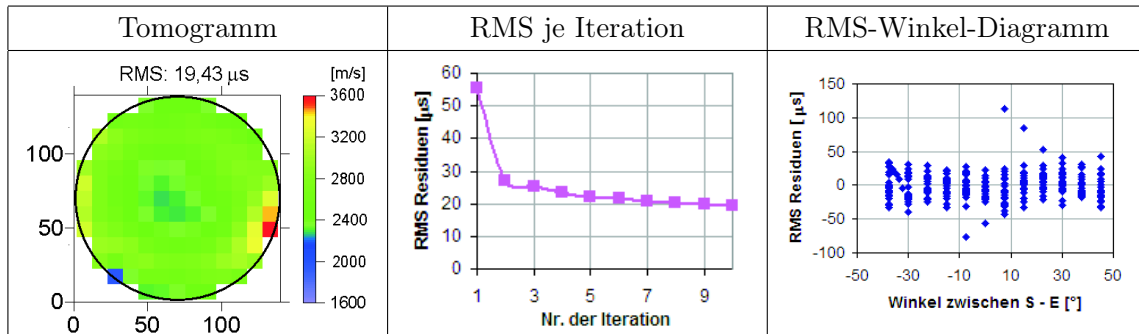


**Abbildung 9.66:** Prüfung der Datenqualität; Weg-Zeit-Diagramm; Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm; farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers; Histogramm der Differenz zwischen Hin- und Rückweg

Um das optimale Netz zu finden, wurden die Elementgrößen von 5x5 cm, 10x10 cm, 14x14cm und 17,5x17,5cm variiert. Die Iterationen wurde jeweils nach 10 Schritten abgebrochen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. B.30 dargestellt. Als optimales Netz wurde die Größe 10x10cm ausgewählt.

**(e). Experimentelle Untersuchung - Prüfung der Ergebnisstabilität** In Abb. 9.66 sind die Residuen der ersten Rekonstruktion dargestellt. Es fällt auf, dass sich die RMS-Residuen nach jedem Iterationsschritt nur wenig ändern und ein hohes Niveau besitzen. Daraus folgt, dass die Daten zu fehlerbehaftet sind. Die Ausreißer und Daten, die eine große Streuung aufweisen müssen eliminiert werden.

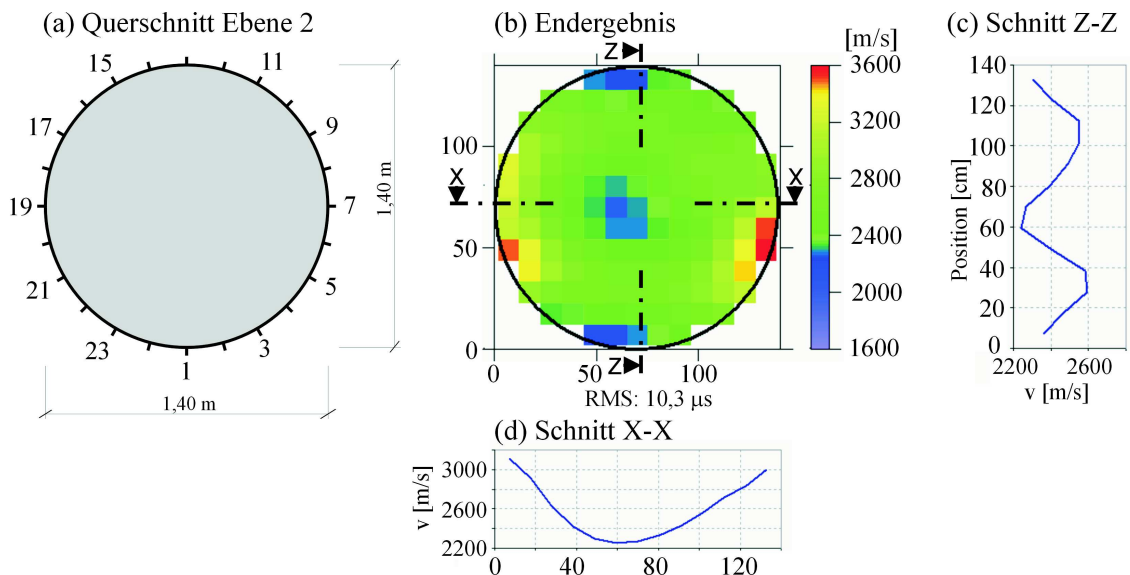




**Abbildung 9.67:** Ergebnis der ersten Rekonstruktion; Tomogramm; RMS-Residuen je Iterationsschritt; RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

(f). **Experimentelle Untersuchung - Rekonstruktion von Teildatensätzen und Anpassung des Startmodells** Es wurden insgesamt 5 Teildatensätze unter folgenden Kriterien gebildet:

1. Eliminierung der Ausreißer
2. nur Laufzeiten, deren Residuen der vorherigen Rekonstruktion kleiner als  $20 \mu s$  waren
3. Differenz zwischen Hin- und Rückweg kleiner als  $20 \mu s$  beträgt
4. Kombinationen aus obigen Kriterien



**Abbildung 9.68:** Endergebnis der Ultraschallmessung mit den Prüfköpfen SO205 an einer Säule des Alten Museums; homogenes Startmodell, Elementgröße  $10 \times 10$  cm; 10 Iterationen

Durch die gezielte Selektion von Laufzeiten sanken die RMS-Residuen nach dem 10. Iterationsschritt von  $19,4 \mu s$  auf  $10,3 \mu s$ . Das beste Ergebnis wurde erreicht, in dem die Ausreißer eliminiert und die Residuen der vorherigen Rekonstruktion sowie die Differenz zwischen Hin- und Rückweg auf jeweils  $20 \mu s$  begrenzt wurden. Das Endergebnis mit dem homogenen Startmodell und einer Netzgröße von  $10 \times 10$  cm ist in Abb. 9.68 dargestellt. Das Startmodell wurde nicht angepasst. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten zwischen der Anomalie und ihrer Umgebung beträgt  $2320/2740 \approx 0,85$ . Laut Rekonstruktion liegt die Größe der Anomalie zwischen  $40 \times 40$  cm und  $60 \times 60$  cm.