

# 7. Datenauswertung

## 7.1. Tomografie

Die Tomografie ist ein Teilbereich der Inversionstheorie. Tomografie leitet sich aus den griechischen Wörtern *tomos* = *Schnitt* und aus *graphein* = *schreiben, zeichnen* ab. Es ist die Rekonstruktion eines 2-dimensionalen Schnittes des untersuchten Objektes. Die mathematischen Grundlagen wurden 1917 vom österreichischen Mathematiker Johann RADON gelegt [Radon, 1917]. Er bewies, dass das Innere eines Objektes aus äußeren Messungen exakt rekonstruierbar ist durch einen kompletten Satz von Projektionen, d.h. das Objekt kann um  $360^\circ$  umfahren werden.

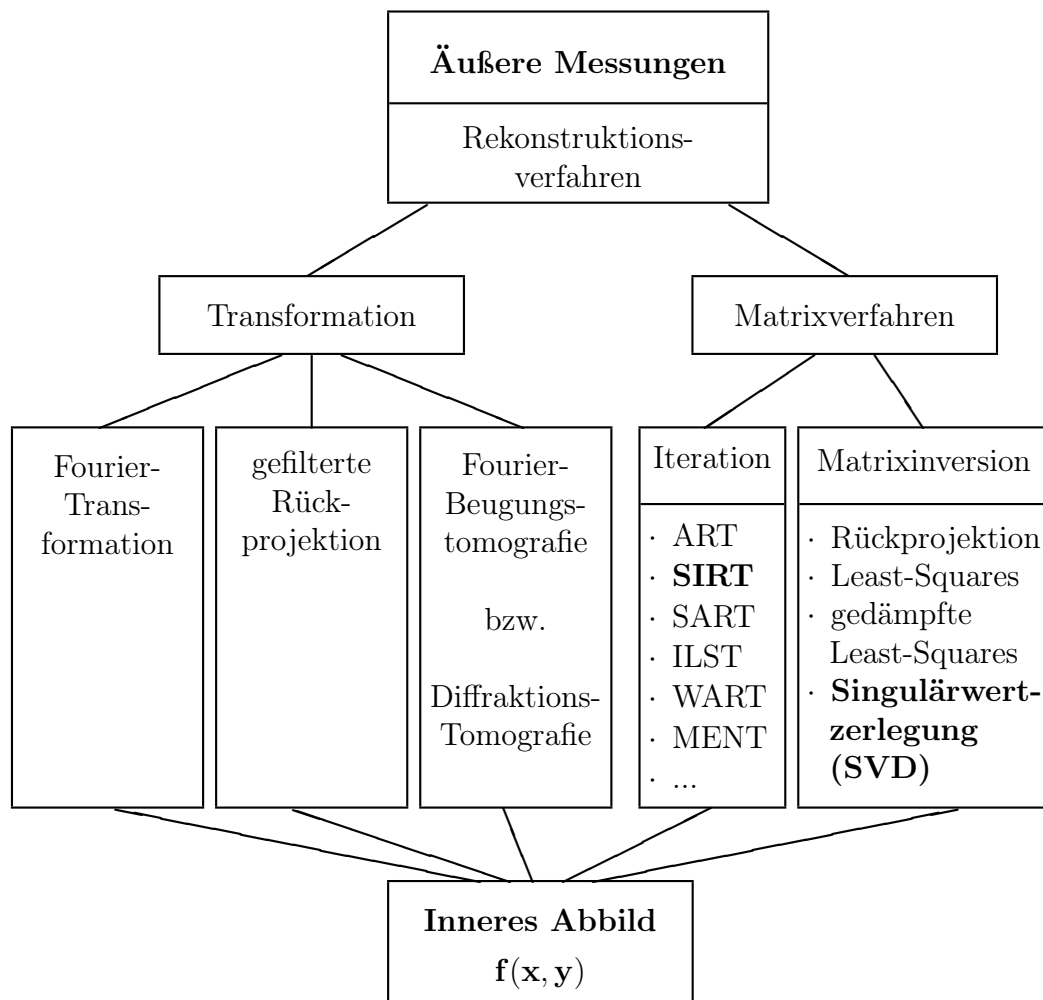
Vom Sender wird eine Welle ausgestrahlt, die das Objekt durchquert und von Empfänger in gedämpfter, zeitverzögerter Form wieder aufgefangen wird. Dieser gesamte Energieverlust wird als *Projektion = Abbild* bezeichnet und kann mathematisch als das Integral der Funktion  $f(x,y)$  beschrieben werden. Oder anders ausgedrückt: Das Integral entspricht dem gesamten Einfluss dem die Welle unterliegt auf dem Weg durch das Objekt. Viele verschiedene (Rück-)Projektionen aus unterschiedlichen Winkeln werden summiert und lassen ein Abbild entstehen. Das tomografische Problem ist somit das Finden der Integranden [Stewart, 1991].

Es kann die Laufzeit und die Amplitude nach dem Durchgang einer Welle durch das Material erfasst werden. Die Amplitude beschreibt die Dämpfung und aus der Laufzeit kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des durchstrahlten Bereiches berechnet werden. In dieser Arbeit wird ausschließlich die Laufzeit der ersten Welle ausgewertet. Für diesen Fall wird die Funktion dann als  $v(x,y)$  bezeichnet. Die Laufzeit einer Welle kann mit dem Weg-Zeit-Gesetz  $t = s/v$  beschrieben werden. Somit wird die Geschwindigkeitsverteilung in einem untersuchten Medium berechnet aus der gemessenen Laufzeit und dem unbekanntem Strahlenweg. Mathematisch betrachtet ist es günstiger den Kehrwert der Geschwindigkeit  $v$  zu verwenden. Dieser wird als Langsamkeit  $p (= 1/v)$  bezeichnet.

Es gibt zwei wesentliche mathematische Methoden, um die inneren Objektwerte aus den Projektionen zu ermitteln: die Transformations- oder die Matrixverfahren. Transformationsmethoden gehen von der Annahme aus, dass das Objekt mit einer kontinuierlichen Funktion und einem ununterbrochenen Projektionssatz beschrieben werden kann. Das heißt, dass Projektionen von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  aufsummiert werden, um das Abbild zu rekonstruieren. Ist es nicht möglich Projektionen rundum das Objekt aufzunehmen (son-

dern nur von 2 oder 3 Seiten), dann muss das Matrixverfahren angewendet werden. Die Matrixverfahren gehen von der Näherung aus, dass das Objekt aus diskreten Punkten oder Elementen besteht und sich die Objektwerte aus einer finiten (endlichen) Anzahl an Projektionen ermitteln lässt.

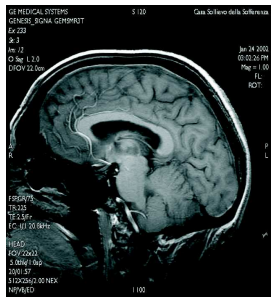
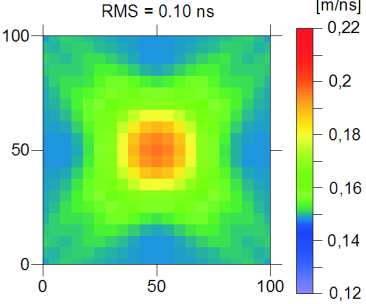
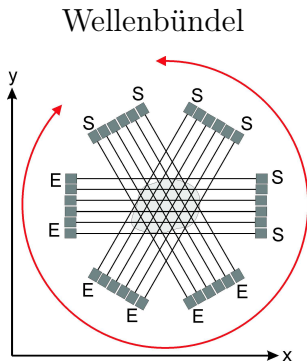
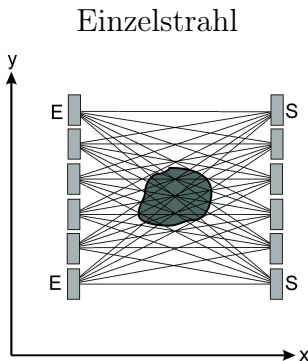
Die nachstehende Abbildung 7.1 liefert eine Übersicht der gängigsten mathematische Rekonstruktionsmethoden.



**Abbildung 7.1:** Schematische Übersicht der Rekonstruktionsverfahren, in Anlehnung an [Stewart, 1991]

Die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Transformationstechnik und des Matrixverfahrens werden in der Tabelle 7.1 veranschaulicht.

**Tabelle 7.1:** Vergleich der zwei wesentlichen Rekonstruktionstechniken

Algorithmus	Transformationstechnik	Matrixverfahren
Beispielverfahren	Computertomografie (CT)	Radar-Tomografie
Beispielergebnis		
Strahlenart	Röntgen	Radar
Wellenart	elektromagnetisch	elektromagnetisch
Wellenlänge	$\lambda \approx 1\text{nm} - 5\text{pm}$	$\lambda \approx 10\text{cm}$
Messung	Amplitude	Laufzeit
Auswertung	Dämpfung	Geschwindigkeit
Materialeigenschaften	Dichte	Dielektrizitätszahl
Funktion $f(x,y)$	kontinuierlich	diskret
Datensatz	komplett ( $0^\circ\text{-}360^\circ$ )	2 oder 3 Seiten
Strahlausbreitung	gerade	gebeugt
Wellen als:	Wellenbündel 	Einzelstrahl 

### 7.1.1. Transformationstechnik

Die Transformationstechnik wird hauptsächlich im medizinischen Bereich eingesetzt, wo meist eine komplette Winkelüberdeckung d.h. Durchstrahlung des Objektes von  $0^\circ$ - $360^\circ$ , gewährleistet werden kann. Diese Methode unterstützt die grundlegende Idee der Tomografie, das eine Funktion aus einem Linienintegral rekonstruiert werden kann. Es gilt zwei wesentliche Transformationsmethoden: die Fourier-Transformation [Bonn, 2000] und die gefilterte Rückprojektion [Boin, 2005; Stewart, 1991].

In der Fourier-Transformation und der gefilterte Rückprojektion wird davon ausgegangen, dass die Energie sich wie ein dünner, gerader Strahl ausbreitet und Streu- bzw. Beugungseffekte vernachlässigbar sind. Diese Annahme trifft für Wellenlängen zu, die deutlich kleiner sind als mögliche Streuzentren. Ist die Wellenlänge jedoch gleich oder größer als die Inhomogenität, weisen akustische und elektromagnetische Wellen an ihnen Erscheinungen wie Streuung und Beugung auf. Auf diese Fälle lässt sich die Diffraktionstomografie anwenden. Die Diffraktionstomografie ist eine Abbildungstechnik, die versucht, Materialinhomogenitäten mit Hilfe des gestreuten Wellenfeldes abzubilden. Rekonstruktionen, die auf der Fourier-Transformation und der gefilterte Rückprojektion basieren, sind theoretisch exakt lösbar. Die Diffraktionstomografie, die die Streuwellentheorie benutzt, basiert hingegen auf Näherungen. Der Algorithmus ist in der Dissertation von [Slaney, 1985] und in [Stewart, 1991] gut beschrieben.

### 7.1.2. Matrixverfahren

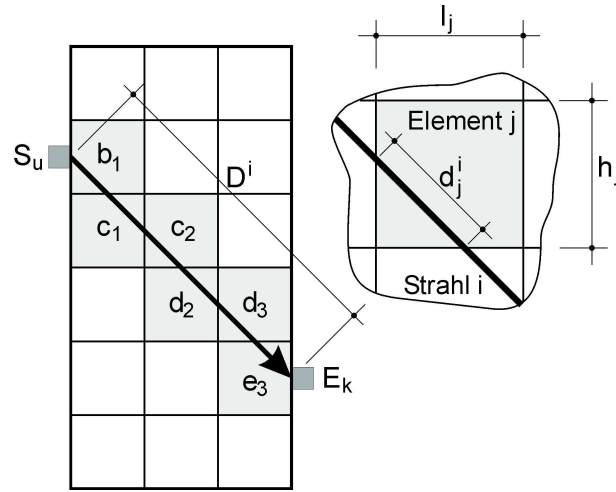
Aufgrund von verschiedenen Faktoren wie z.B. der Einfluss von Rauschen, das Fehlen von vollständigen Datensätzen, Wellenlänge etc. ist das Finden eine exakte Lösung nicht möglich. Die Schwierigkeit der Rückrechnung ist dann, dass keine eindeutige, sondern nur eine mehrdeutige Lösung für die Integranden existiert, wie das folgende Beispiel zeigen soll.

Gegeben:  $9 = f(a, b)$       Gesucht:  $a, b$

Lösung:  $9 = 3 \cdot 3, \quad 9 = 9 \cdot 1, \quad \dots$

Durch die Wahl der geeigneten Randbedingungen kann der Bereich der möglichen Lösungen eingeschränkt werden.

Die Methode der Reihenentwicklung betrachtet das zu untersuchende Objekt als aus einzelnen Elementen zusammengesetztes Objekt. Es wird angenommen, dass sich die Energie in Form eines Strahls, durch die verschiedenen Elemente ausbreitet. Die Annahme der Diskretisierung unterscheidet die Methode der Reihenentwicklung von der Transformationsmethode.



**Abbildung 7.2:** Typischer Strahlenverlauf durch ein in Elemente unterteiltes Objekt

Das Element  $j$  ist ein Rechteck der Höhe  $h_j$  und der Länge  $l_j$ . Die Strecke  $s_j^i$  ist die Länge, die der Strahl  $i$  durch das Element  $j$  zurücklegt.  $p_j$  ist die Kenngröße, die die Eigenschaften des Elements  $j$  beschreiben. Für den Fall der Laufzeittomografie entspricht  $p_j$  der Langsamkeit.  $S^i$  ist die Gesamtlänge des Strahls  $i$  (Abb. 7.2). Die Laufzeit eines Strahls vom Sender zum Empfänger ist die Summe aller Zeiten, die er durch jedes Element benötigt. Somit kann für Strahl 1 die Laufzeit bestimmt werden:

$$t^1 = s_1^1 p_1 + s_2^1 p_2 + s_3^1 p_3 + \dots + s_M^1 p_M = \sum_{j=1}^M s_j^1 p_j \quad (7.1)$$

$M$  ist die Gesamtanzahl der Elemente. Zu beachten ist, dass der Strahl nicht durch alle Elemente des Objektes läuft. Somit sind viele  $s_j^i$  gleich Null. Für eine Anzahl von  $N$  Sender-Empfänger Kombinationen ergeben sich die Laufzeiten zu

$$\begin{aligned} t^1 &= s_1^1 p_1 + s_2^1 p_2 + s_3^1 p_3 + \dots + s_M^1 p_M \\ t^2 &= s_1^2 p_1 + s_2^2 p_2 + s_3^2 p_3 + \dots + s_M^2 p_M \\ &\vdots \\ t^N &= s_1^N p_1 + s_2^N p_2 + s_3^N p_3 + \dots + s_M^N p_M \end{aligned} \quad (7.2)$$

Die obigen Gleichungen können als Matrizen zusammengefasst werden zu

$$T = SP \quad (7.3)$$

mit  $T$  als Vektor für die Laufzeiten,  $S$  als Matrix, die die Geometrie der Strahlenwege beinhaltet, und  $P$  als Langsamkeitsvektor. Sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten bzw.

Langsamkeiten eines Mediums bekannt, kann die Laufzeit einer Welle berechnet werden. Dies wird als *Vorwärtsproblem* bezeichnet. Jedoch spielt in der Praxis eher das inverse Problem eine Rolle, bei dem die Langsamkeit aus der gemessenen Laufzeit und dem annähernd bekanntem Strahlenweg zu bestimmen ist. Die exakte Lösung ist:

$$P = S^{-1}T \quad (7.4)$$

Aber infolge von Rauschen oder unzureichende Datenaufzeichnungen, wird diese Lösung falsch oder die Gleichung gar unlösbar -  $S$  wird singulär und kann nicht invertiert werden. Entweder kann das Problem mathematisch gelöst werden durch die Matrixinversion (z.B. Methode der kleinsten Quadrate, Singulär-Wert-Zerlegung) oder ein iteratives Verfahren. Der Vorteil der iterativen Verfahren ist, dass sie deutlich zeitsparender sind. Zwei iterative Methoden sind ART - algebraische Rekonstruktionstechnik und SIRT - simultane iterative Rekonstruktionstechnik. Die iterativen Techniken sind weniger effizient als die fourierbasierten Verfahren und leiden aufgrund ihres iterativen Charakters teilweise unter Stabilitätsproblemen, weisen aber auch eine Reihe von Vorteilen auf. So können sie auch bei stark unregelmäßiger Strahlüberdeckung und bei unvollständigen Datensätzen angewendet werden. Der wichtigste Vorteil liegt jedoch in der Möglichkeit, gekrümmte Strahlverläufe zu berücksichtigen, was insbesondere bei akustischen Wellen von Bedeutung ist. [Schubert, 2006]

**(a). Rückprojektion** Wird  $S$  singulär, ist die Gleichung 7.4 unlösbar. Die diskrete Rückprojektion zeichnet sich durch die Annahme aus, dass  $S^{-1} = S^{*T}$  ist.  $S^{*T}$  ist die Zeilen-normierte transponierte Matrix. Die Zeilen-normierte Matrix  $S^*$  erhält man, wenn jede Zeile der  $S$ -Matrix ( $\hat{=}s_j^i$ ) mit dem Quadrat der Gesamtlänge des Strahls  $i$  ( $\hat{=}S^{i2}$ ) dividiert wird [Jackson, 1994]. Dies ist eine Näherungslösung für die Gleichung 7.4. Man erhält eine gewichtete durchschnittliche Langsamkeit eines Strahls für ein durchlaufenes Element. Die Langsamkeit eines Element  $p_j$  ermittelt sich aus:

$$P = S^{*T} \cdot T \quad \text{oder} \quad p_j = \sum_{i=1}^N \frac{s_j^i t^i}{S^{i2}} \quad (7.5)$$

Die Rückprojektion ist zwar einfach zu verstehen und anzuwenden, jedoch ist es nur eine Näherungslösung der Gleichung 7.3. Sie führt zu streifenartigen Artefakten. Deswegen werden anspruchsvollere Prozeduren benötigt.

**(b). Methode der kleinsten Quadrate (least-squares)** Von allen Näherungen zur Lösung der Gleichung 7.4 werden widersprüchlichen Daten mit dieser Methode am besten erklärt. Die quadrierten Differenzen aus gemessenen und berechneten Laufzeiten sollen minimiert werden:  $(t_m - t_b)^2 \rightarrow \min$ . Dabei wird die Gleichung 7.4 mit  $S^T/S^T$  erweitert zu [Jackson, 1994]:

$$P = \frac{S^T}{S^T} \cdot S^{-1}T \quad (7.6)$$

Diese Näherung wird unter bestimmten Umständen ebenfalls versagen, falls  $(S^T S)^{-1}$  singulär oder annähernd Null wird. Dies führte zur Anwendung der **gedämpften Methode der kleinsten Quadrate**

$$P = \frac{S^T T}{S^T S + \lambda \mathcal{E}} = S^T T (S^T S + \lambda \mathcal{E})^{-1} \quad (7.7)$$

wobei  $\lambda$  der Dämpfungsparameter und  $\mathcal{E}$  die Einheitsmatrix ist. Eine starke Dämpfung führt zur Glättung der tomografischen Rekonstruktion, ähnlich wie bei der gefilterten Rückprojektion. Jedoch sind die Methoden der Matrixinversion sehr zeitaufwendig. Eine effektive Alternative stellen die Iterativen Methoden dar.

**(c). ART - algebraische Rekonstruktionstechnik** Als erstes wird ein Anfangsmodell bzw. Startmodell, bei dem die Langsamkeit  $P$  je Element vorgegeben wird, gewählt und die dazugehörigen Laufzeiten ermittelt (Lösung des *Vorwärtsproblems*). Die Matrix  $S$  beinhaltet die Laufwege als direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger.

$$T_{1,berechnet} = S \cdot P_{Startmodell} \quad (7.8)$$

Es entsteht eine Differenz zwischen berechneter und gemessener Laufzeit, die Fehler bzw. Residuum (Rest) genannt wird.

$$dT_1 = T_{gemessen} - T_{1,berechnet} \quad (7.9)$$

Im nächsten Schnitt werden die Residuen zurückprojiziert und man erhält einen Satz von Korrekturfaktoren:

$$dP_1 = S^T \cdot dT_1 \quad (7.10)$$

Die Korrektur wird für die einzelnen Projektionen getrennt voneinander durchgeführt. Begonnen wird mit der ersten Projektion (erste Sender-Empfänger-Kombination). Für diese Projektion wird der Unterschied zwischen der Projektion der geschätzten Werte und der tatsächlich gemessenen Projektion auf die Bildelemente anteilmäßig den Längen, mit der der Projektionsstrahl diese schneidet, verteilt. Das geschätzte Startmodell wird dann um die Korrekturfaktoren abgeändert.

$$P_{1,Iteration} = P_{Startmodell} + dP_1 \quad (7.11)$$

Der Vorgang wird solange wiederholt, bis der Abstand zwischen gemessenem und geschätztem Projektionsvektor ein vorgegebenes Minimum unterschreitet oder eine vorgegebene Anzahl von Iterationen überschritten wird. Mit dieser Methode können obere und untere Grenzwerte der Geschwindigkeit vorgegeben werden. Beispielsweise kann die Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle nicht größer als die Lichtgeschwindigkeit von  $\approx 0,3$  m/ns sein.

(d). **SIRT - simultane iterative Rekonstruktionstechnik** Während der ART Algorithmus das geschätzte Startmodell nach jeder berechneten Gleichung aktualisiert, wird beim SIRT Algorithmus, nachdem alle Gleichungen gelöst wurden, das Startmodell abgeändert. Somit gibt es nur noch eine Aktualisierung der anfänglich geschätzten Werte (Langsamkeit je Element) pro Iterationsschritt. Mit anderen Worten beim ART Algorithmus erfolgen die Korrekturen linear Strahl für Strahl und beim SIRT Algorithmus wird während jedes Iterationsschrittes das ganze Bild modifiziert.

### 7.1.3. Ray Tracing

In den vorangegangenen Methoden wurde der Strahlenweg zwischen Sender und Empfänger im Inneren des untersuchten Mediums als (im Wesentlichen) bekannt vorausgesetzt. Das würde für den einfachsten Fall einer geradstrahligen Ausbreitung (straight rays) entsprechen. Diese Annahme trifft gut für einen Geschwindigkeitskontrast von bis zu 10 % zu. Bei einem Unterschied der Geschwindigkeiten zwischen 10 %-50 % muss diese Annahme eines geraden Strahlenweges für den jeweiligen Anwendungsfall geprüft werden. Die Erfahrungen zeigen, dass bei Geschwindigkeitskontrasten von mehr als 50 % die Annahme eines geraden Strahlenweges recht ungenaue Ergebnisse liefert. Um bessere Ergebnisse zu erzielen sollte der Strahlenweg als gekrümmt bzw. gebogen betrachtet werden (curved rays). Somit wird es notwendig nach jedem Iterationsschritt den Strahlenweg durch das berechnete Geschwindigkeitsmodell neu zu bestimmen.

Es gibt mehrere mögliche Methoden der Strahlenverfolgung (ray tracing) durch ein heterogenes Medium. Eine Möglichkeit ist die Berechnung des Strahlenweges nach dem **Brechungsgesetz von Snell** (siehe S.151). Darunter fallen die zwei gebräuchlichsten Methoden: die Schuss- und die Krümmungsmethode. Die *Schuss- (oder shooting) Methode* berechnet unter verschiedenen Winkeln die passenden Strahlenwege, beginnend beim Sender, solange bis der entsprechende Empfänger nah genug getroffen wurde. Ein Nachteil ist dabei der hohe Rechenaufwand und die Schatteneffekte (siehe S.151) durch hohen Geschwindigkeitskontrasten. Die *Krümmungs- (oder bending) Methode* beginnt mit einer beliebigen Verbindung (z.B. gerade Strahlen) zwischen Sender und Empfänger. Dieser Strahl wird iterativ solange gebogen, bis die minimale Laufzeit gefunden wurde. Der Nachteil dieser Methoden ist, dass eventuell nicht die erste Welle (first arrival) gefunden wird [Jackson, 1994].

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung des Strahlenweges ist die Berechnung der Wellenfronten nach dem **Huygensschen Prinzip** (siehe S.150). Eine anfänglich kreisförmige infinitesimale Wellenfront wird in mehreren Zeitschritten erweitert, wobei entlang einer vorgegebenen Anzahl von Punkten wieder kleine Kreiswellen entstehen, die die neue Wellenfront bilden. Die Radien der kleinen Kreiswellen werden durch die Geschwindigkeit bestimmt. Die Strahlen verlaufen senkrecht zu den Wellenfronten. [Jackson, 1994]

Weitere Methoden der Strahlenverfolgung sind die **Netzwerk-Näherung** nach Sai-



to/Moser sowie die **Finite-Differenzen-Lösung**. In [Jackson, 1994] findet man eine gute Beschreibung dieser Methoden, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

#### 7.1.4. Allgemeiner Ablauf einer laufzeitomografischen Auswertung

Wie bereits erwähnt werden in dieser Arbeit ausschließlich Laufzeiten rekonstruiert, um die Geschwindigkeitsverteilung im untersuchten Querschnitt zu ermitteln. Dafür ist eine exakte Laufzeitbestimmung Voraussetzung für den Erfolg einer Untersuchung. Die Bestimmung der Laufzeit erfolgt über die zeitliche Differenz zwischen dem Aussenden der Welle und der Ankunft des ersten Signals am Empfänger. Somit wird hier im Falle der Auswertung mechanischer Wellen ausschließlich die Laufzeit der Longitudinalwelle ermittelt. Dies ist in der Praxis oft auf Grund von Oberflächenwellen, Luftwellen (bei Radar), einem schlechten Signal-Rauschen-Verhältnis oder andere Störeinflüsse schwierig. Die erste ankommende Welle kann entweder manuell oder automatisch mit manueller Nachbearbeitung bestimmt werden [Kurz, 2003b]. Ideal ist die Bestimmung des Ersteinsetzes der Welle, da es sich um die reale Laufzeit der Longitudinalwelle handelt. Wenn das nicht oder nur schwierig möglich ist, kann das erste Maximum bzw. Minimum herangezogen werden [Brauchler, 2003]. In diesem Fall ist jedoch zu beachten, dass sich die Laufzeit um einen konstanten Betrag verzögert (siehe dazu synthetische Fehler S.41).

Mit Hilfe eines der genannten Rekonstruktionsalgorithmen (siehe Kap. 7.1) wird aus den ermittelten Laufzeiten für jede Sender-Empfänger Kombination eine wahrscheinliche (siehe S.34) Geschwindigkeitsverteilung und der Laufweg der Welle rekonstruiert. Da die Rekonstruktion immer mehrere Lösungsmöglichkeiten bietet, ist es unabdingbar sie auf ihre Glaubwürdigkeit hin zu untersuchen. Die folgenden Schritte beschreiben die Vorgehensweise, um zu einer glaubwürdigen tomografischen Rekonstruktion des untersuchten Querschnitts zu gelangen.

**a) Voruntersuchung, Messplanung und Simulation** Für den Erfolg einer Messung ist es wichtig sich vorher zu überlegen, welche Messkonfiguration in Abhängigkeit der Geometrie des zu untersuchenden Querschnitts sinnvoll ist. So ist beispielsweise die Größe einer Inhomogenität ausschlaggebend für den Abstand der Prüfköpfe (ist Abstand zwischen (n)-ten und (n+1)-ten Sendern bzw. Empfängern). Falls vorher eine Vermutung über die Art und Größe der Inhomogenität besteht, sollten vorab Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Sie geben Aufschluss über:

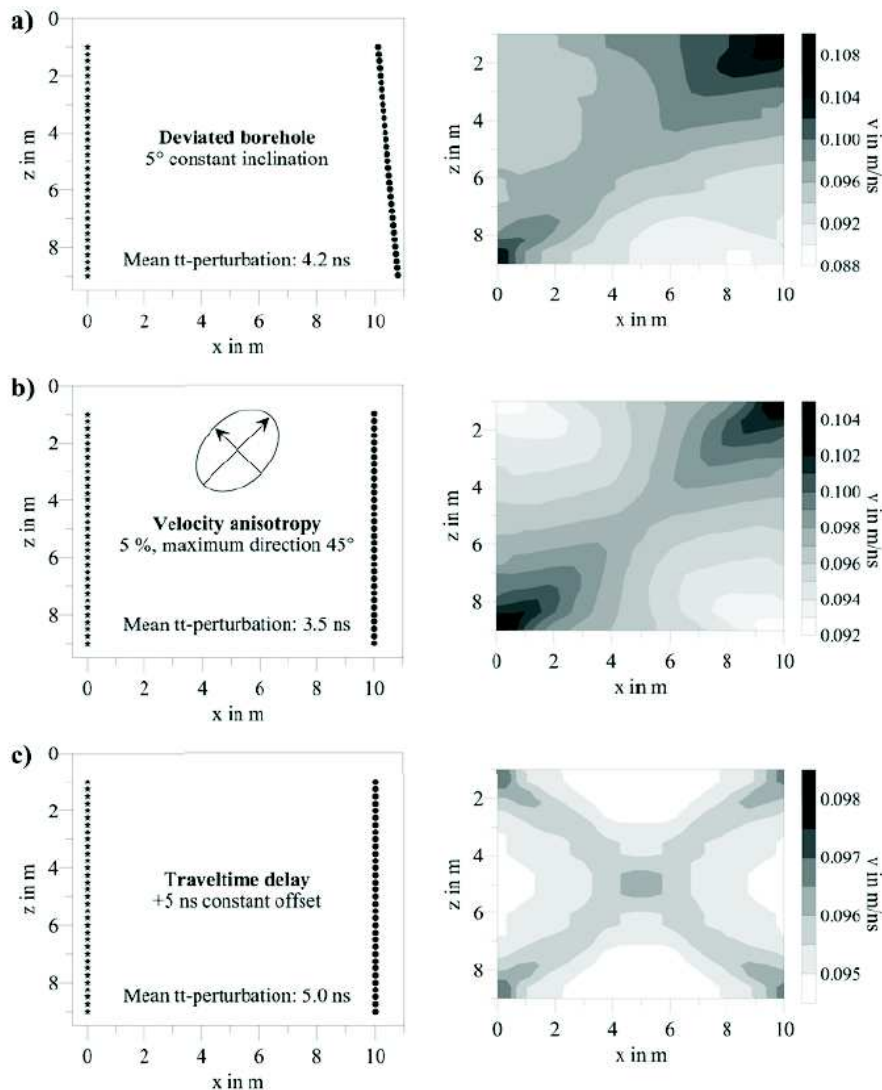
- die maximalen Differenz von Laufzeit mit und ohne Anomalie (Vergleich mit Messfehler des gewählten ZfP-Verfahrens)
- die optimalen Messkonfiguration
- die zu erwartenden Auflösung des gesuchten Objektes (Anomalie) für den idealen Fall

## 7. Datenauswertung

Die Auflösung der tomografischen Rekonstruktion für eine bestimmte Messkonfiguration und Netzgröße kann durch das so genannte “chequerboard“ (Schachbrett) getestet werden.

### b) Verbesserung der Datenqualität durch eine vorausgehende Datenprüfung

Um die Qualität und Glaubwürdigkeit der tomografischen Rekonstruktion zu verbessern, ist es notwendig eine Analyse der Messdaten durchzuführen. Physikalische Gesetze müssen erfüllt sein wie das Gesetz von Fermat und Snellius (siehe S.151f.) bzw. elektromagnetische Wellen können nicht schneller als Licht sein.



**Abbildung 7.3:** Drei typische, systematische Fehler und ihre dazugehörigen Tomogramme mit charakteristischen Artefakten (10 Iterationen, gerade Strahlen) nach [Tronicke, 2002]

Datensätze aus Transmissionsmessungen können typische systematische Fehler enthalten. Sie spiegeln sich in verschiedenen grafischen Darstellungen und Diagrammen wieder. Die Darstellungen geben Aufschluss über die Datenqualität und spezifizieren den für sie typischen Fehler. Solche Fehler können durch unberücksichtigte, fehlerhafte Positionsbestimmung der Sender bzw. Empfänger; unberücksichtigte Anisotropie oder Laufzeitverzögerungen hervorgerufen werden. Falls diese nicht erkannt und eliminiert werden, entstehen charakteristische Artefakte im Tomogramm. Diese Artefakte überlagern das reale Ergebnis. Ist der Einfluss des systematischen Fehlers wesentlich können möglicher Weise Inhomogenitäten nicht mehr sichtbar sind. Das könnte zu falschen Interpretationen der Ergebnisse führen.

In Abb. 7.3 sind drei mögliche, systematische Fehler und ihre typischen Tomogramme dargestellt [Troncke, 2002]. In (a) wurde die Positionen der Sender und Empfänger fehlerhaft bestimmt. Dieser Fehler wirkt sich systematisch auf die in der Rekonstruktion vorgegebene Wegstrecke aus. Für dieses Beispiel ist der angenommene Weg mit zunehmender Tiefe  $z$  kürzer als der Reale Weg. Für ausschließlich horizontale Strahlen würde die rekonstruierte Geschwindigkeitsverteilung von oben nach unten abnehmen. Die schrägen Strahlenverläufe bewirken eine diagonale Veränderung der Geschwindigkeit. In (b) sind die Auswirkungen einer unberücksichtigten Anisotropie dargestellt. Anisotropien sind übliche Erscheinungen in geschichteten Medien. Die richtungsabhängigen Materialeigenschaften führen zu unterschiedlichen Laufzeiten in verschiedenen Richtungen. D.h. für gleiche Entfernungen zwischen Sender und Empfänger ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten. Somit werden in der Vorzugsrichtung fälschlicherweise höhere Geschwindigkeiten rekonstruiert. Jedoch treffen die anisotropen Eigenschaften für jeden Punkt im untersuchten Medium zu. Die korrekte Wiedergabe des untersuchten Querschnitts wäre eine homogene Darstellung mit richtungsabhängiger Skalierung. In (c) wurde für alle Sender-Empfänger-Kombinationen eine konstante Differenz  $\Delta t$  zwischen realer und fehlerhafter Laufzeit angenommen. Die Erhöhung der Laufzeit um  $\Delta t$  bewirkt eine Senkung der Geschwindigkeit. Sie wirkt sich jedoch prozentual stärker für kürzere Wege aus als für längere. Somit ergeben sich in den Diagonalen des untersuchten Querschnitts größere Geschwindigkeiten und es entsteht dafür typische Kreuz.

Die Fehler spiegeln sich in verschiedenen grafischen Darstellungen und Diagrammen wieder. An Hand eines synthetischen Beispiels basierend auf mechanischer Wellenausbreitung soll die Prüfung der Datenqualität und der Ergebnisstabilität mit und ohne systematischem Fehler erläutert werden. Der gewählte Querschnitt hat die Abmessungen von 0,76 m x 1,0 m. Die Sender wurden auf zwei gegenüberliegenden Seiten in einem Abstand von 5 cm positioniert. Als systematischer Fehler wurde eine Laufzeitverzögerung von 20  $\mu s$  exemplarisch ausgewählt. Alle Diagramme werden an Hand eines Querschnitt mit und ohne Inhomogenität erklärt (Abb. 7.4).

Das **Weg-Zeit-Diagramm** vermittelt einen Eindruck über Diskrepanzen in den Daten wie Ausreißer und systematische Fehler. Auf Grund des linearen Zusammenhangs zwischen Laufzeit und zurückgelegter Wegstrecke sollte die darin enthaltenen Punktwol-

## 7. Datenauswertung

ke durch eine Geraden am besten erklärt werden. Die Gerade kann mit der Gleichung  $f(x) = y = mx + n$  beschrieben werden. Dabei entspricht der Anstieg  $m$  dem reziproken Wert der Geschwindigkeit  $1/v$ . Dieser ist wiederum gleich der Langsamkeit  $p = 1/v$ . Allgemein betrachtet ist  $n$  der Schnittpunkt mit der y-Achse. In diesem Fall entspricht die y-Achse der Laufzeit. Für ein homogenes Medium verläuft die Gerade durch den Ursprung.

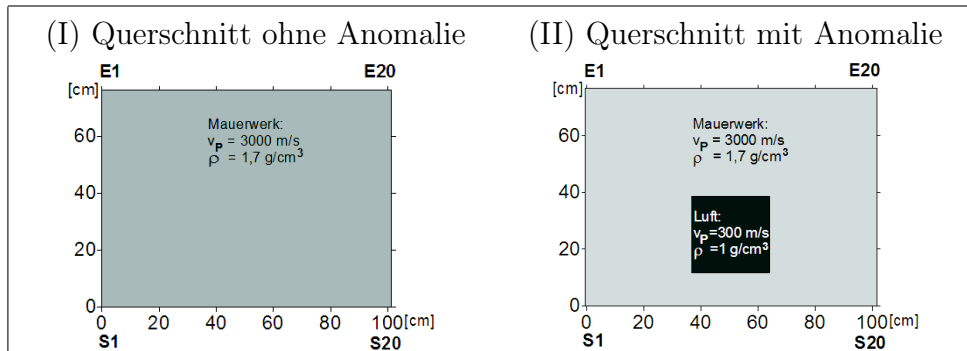


Abbildung 7.4: simulierter Querschnitt mit und ohne Inhomogenität

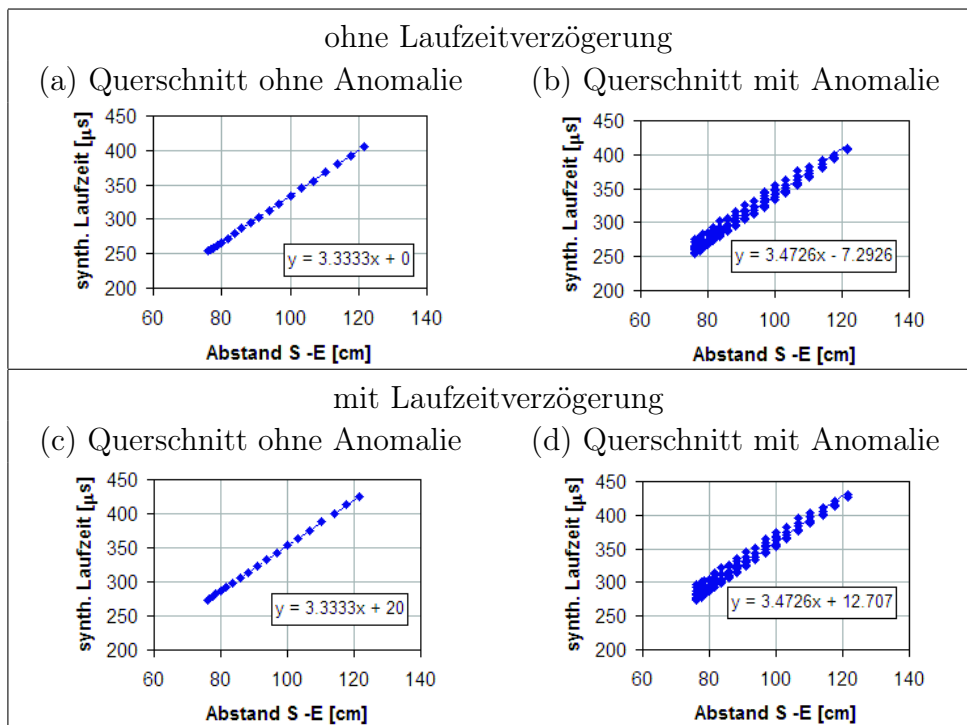
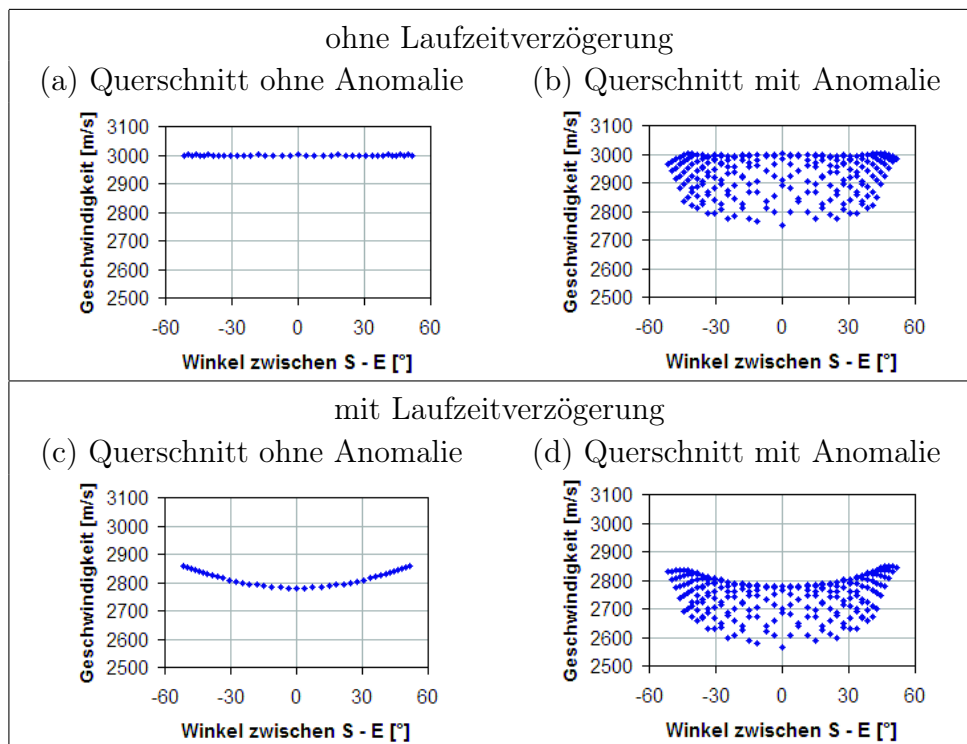


Abbildung 7.5: Weg-Zeit-Diagramme für einen Querschnitt ohne (a) und mit (b) Inhomogenität, im Vergleich dazu zeigen (c) und (d) die gleichen Diagramme unter dem Einfluss einer Laufzeitverzögerung von  $20 \mu s$

Die Daten einer realen Messung werden immer  $n \neq 0$  aufweisen, infolge von Inhomogenitäten, Messfehlern, Abweichungen vom geraden Laufweg etc. Im Fall der oben beschriebenen Laufzeitverzögerung von  $20 \mu\text{s}$  passen sich die Daten einer Geraden an. Diese ist jedoch um  $n = +20\mu\text{s}$  parallel versetzt. In der Abb. 7.5 sind vier Weg-Zeit-Diagramme für unterschiedliche Fälle dargestellt. Im Fall (a) wurde ein homogener Querschnitt (Abb. 7.4 I) ohne systematische Einflüsse modelliert. Im Fall (b) stammen die Laufzeiten aus der Simulation eines Querschnitts mit einer darin enthaltener Inhomogenität (Abb. 7.4 II) und ohne systematische Fehler. In den Diagrammen (c) und (d) ist der Einfluss einer Laufzeitverzögerung von  $20 \mu\text{s}$  dargestellt.

Das **Geschwindigkeits-Winkel-Diagramm** zeigt die Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Winkel zwischen Sender und Empfänger. Im Idealfall darf es keine

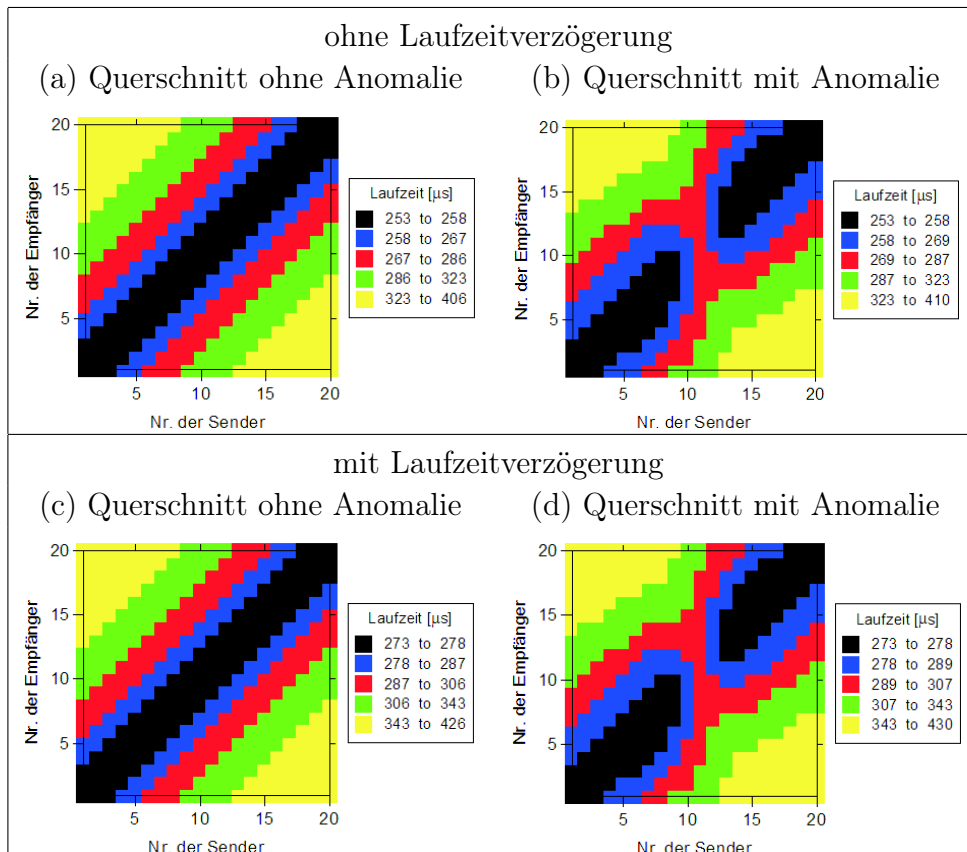


**Abbildung 7.6:** Geschwindigkeits-Winkel-Diagramme für einen Querschnitt ohne (a) und mit (b) Inhomogenität, im Vergleich dazu zeigen (c) und (d) den Einfluss einer Laufzeitverzögerung von  $20 \mu\text{s}$

Abhängigkeit geben, wie Abb. 7.6 (a) zeigt. In den Diagrammen (b) und (d) ist eine Abweichung (Streuung) der Geschwindigkeiten von der Geraden zu erkennen. Die Ursache dafür ist: Man beachte, dass aus einer Bekannten  $T$  zwei Unbekannte  $P$ ,  $S$  gelöst werden sollen. Zum Zeitpunkt der Kontrolle der Messdaten ist jedoch der wirkliche Laufweg ( $S$ ) der Welle noch unbekannt. Deshalb wird eine direkte Verbindung zwischen

## 7. Datenauswertung

Sender und Empfänger angenommen (d.h. geradlinigen Wellenausbreitung). Infolge von Inhomogenitäten wird jedoch der Strahl u.a. gebeugt und weicht somit von einem geraden Strahlenverlauf ab. Diese Annahme führt zu einer Streuung der Geschwindigkeiten. Vergleicht man die Diagramme (a) und (c) sowie (b) und (d) erkennt man in (c) und (d) ein Winkelabhängigkeit der Geschwindigkeiten. Diese zeigt sich im gekrümmten Datenverlauf.

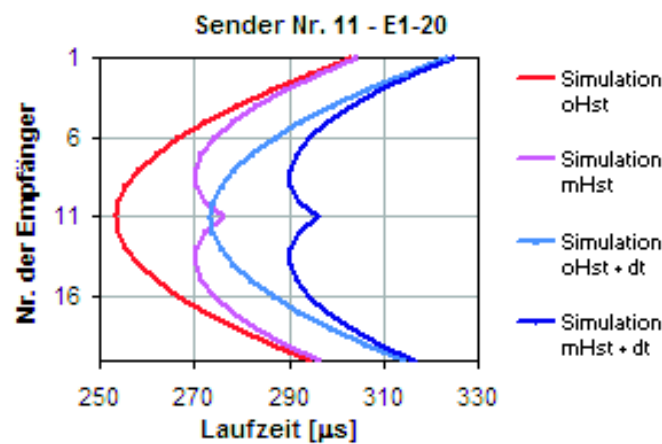


**Abbildung 7.7:** farbcodierte Darstellung der Laufzeit jedes Senders und Empfängers für einen Querschnitt ohne (a) und mit (b) Inhomogenität, im Vergleich dazu zeigen (c) und (d) den Einfluss einer Laufzeitverzögerung von  $20 \mu\text{s}$

Die Darstellung 7.7 zeigt die **Laufzeiten jeder Sender-Empfänger Kombination**. Es ist eine weitere Möglichkeit die Daten visuell zu kontrollieren. Mit Hilfe dieser Darstellungsart ist es möglich, einen Laufzeitwert einer bestimmten Sender-Empfänger-Kombination zuzuordnen. Dafür ist es sinnvoll die vorab berechneten Geschwindigkeit statt der Laufzeit zu verwenden. Es entsteht einen Eindruck über die Geschwindigkeitsverteilung im untersuchten Querschnitt, womit systematische Abweichungen verursacht durch beispielsweise fehlerhafte Positionierung oder Ankopplung der Sender oder Empfänger sichtbar werden. Der Einfluss der Anomalie spiegelt sich durch die Erhöhung

der Laufzeit in (b) bzw. (d) wieder. Zu erkennen ist dies an den Unterbrechungen des schwarzen Bereiches, der diagonal verläuft. Die Darstellungen (a) und (c) sowie (b) und (d) unterscheiden sich nur durch das Niveau der Laufzeiten um  $20 \mu s$ .

Abb. 7.8 zeigt exemplarisch die **Verläufe der Laufzeit des Senders Nr. 11** mit allen dazugehörigen Empfängerpositionen von Nr. 1 bis 20. Vergleich man die Kurven, so ist der Einfluss der Inhomogenität auf die Laufzeit zwischen der Empfängerposition 6 bis 16 zu erkennen. Die Inhomogenität bewirkt eine Erhöhung der Laufzeiten. Vergleicht man die Verläufe der roten und blauen Kurven stellt man einen Versatz der Laufzeiten um  $20 \mu s$  fest.



**Abbildung 7.8:** Laufzeiten der oben beschriebenen Fälle für die Senderposition Nr. 11 und Empfängerposition Nr.1 bis 20

**c) Allgemeine Überlegungen zur tomografische Rekonstruktion** Mit Hilfe eines geeigneten Tomografieprogramms wird aus den Laufzeiten und den dazugehörigen Sender- und Empfängerpositionen ein mögliches Geschwindigkeitsmodell rekonstruiert. Oft ist dafür die Angabe von Randbedingungen aus Apriori Informationen notwendig und sinnvoll, um die möglichen Lösungen einzugrenzen (siehe Kap. 7.1.2, S.34). Die auf diesem Gebiet am häufigsten verwendeten Tomografieprogramme basieren auf einer Diskretisierung des Querschnitts und lösen die Gleichung 7.3 iterativ. Dazu sind Angaben zur Elementgröße, der angenommenen Geschwindigkeit je Element, evt. Ober- und Untergrenzen der Geschwindigkeit sowie Anzahl der Iterationsschritte bzw. Wert der RMS-Residuen nach dem die Rechnung abgebrochen werden soll, notwendig. Die Angaben zur Elementgröße und deren Geschwindigkeit werden im Startmodell zusammengefasst.

**d) Wahl des Startmodells** Die Elementgröße hängt von der gewählten Messkonfiguration (z.B. Abstand der Prüfköpfe und Geometrie des untersuchten Querschnitts) und

der Größe der Inhomogenität ab. Um solide Informationen zu erhalten, ist eine hilfreiche Faustregel, dass wenigstens 10 Strahlen 1 Element durchkreuzen sollten (Strahlen-Element-Verhältnis 10:1). Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass ein Strahlen-Element-Verhältnis von wenigstens 20:1 gelten sollte.

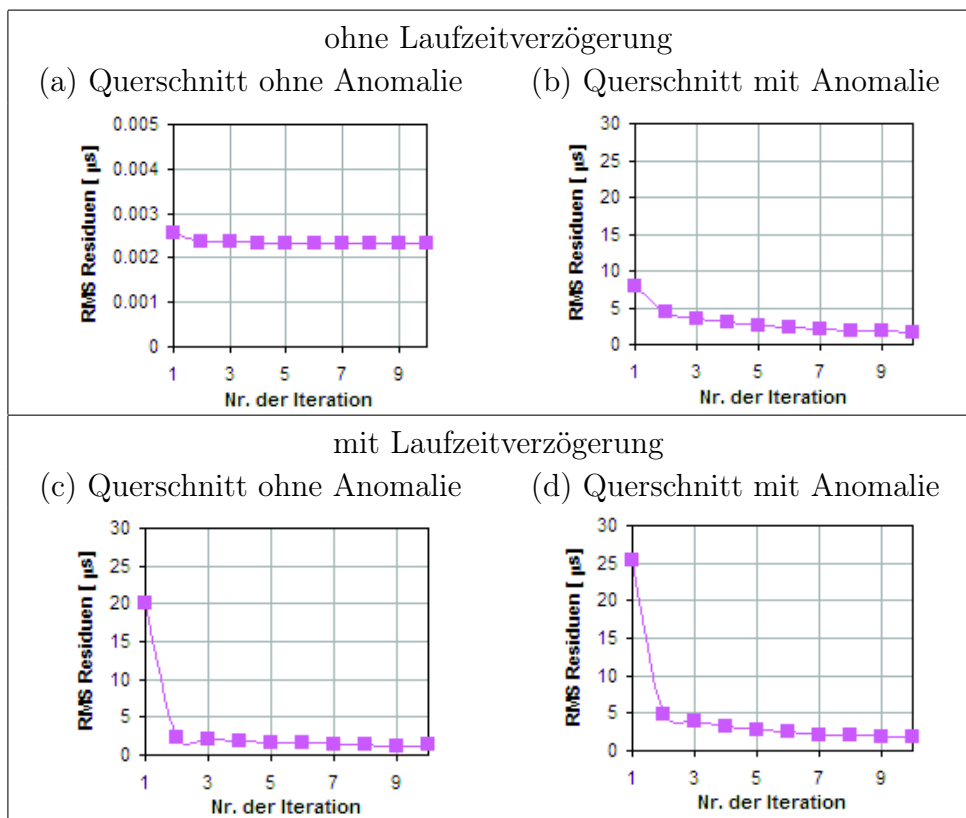
Die Vorgabe der Geschwindigkeit sollte möglichst realistisch abgeschätzt werden. Dafür kann die Darstellung der Geschwindigkeit jedes Senders und Empfängers Aufschluss geben (siehe Beschreibung S.44). Falls keine Apriori Informationen über das Innere vorliegen, sollte die erste Berechnung auf einer homogenen Verteilung der Geschwindigkeiten basieren. Der Grund dafür ist die nicht eindeutige Lösbarkeit einer tomografischen Rekonstruktion. Man beachte, dass aus einer Bekannten  $T$  zwei Unbekannte  $P$ ,  $S$  gelöst werden sollen. Mit Hilfe der vorgegebenen Informationen werden dann die Daten erklärt. Durch eine falsche Vorgabe der Geschwindigkeiten lassen sich die Daten ebenfalls rekonstruieren, meist mit der Konsequenz dass sich starken Artefakten und höhere (RMS-)Residuen ergeben. Für das hier beschriebene Beispiel wurde ein homogenes Startmodell mit einer Geschwindigkeit von 3000 m/s und einer Netzgröße von 5x5 cm gewählt.

**e) Wahl des Abbruchkriteriums einer iterativen Rekonstruktion** Des Weiteren ist für die Rekonstruktion mit Hilfe iterativer Methoden die Angabe des Abbruchkriteriums nötig. Es sollten nur so viel Iterationen berechnet werden wie nötig sind. Das heißt, dass sich die RMS-Residuen von einem Iterationsschritt zum anderen nicht mehr wesentlich ändern. In den hier beschriebenen Fällen war das Abbruchkriterium die Divergenz der RMS-Residuen (Abb. ?? I). Bei dem hier verwendeten SIRT-Algorithmus zeigt die Erfahrung das 5-10 Iterationsschritte ausreichend sind. Weiterhin sollten die absoluten Residuen der einzelnen Sender-Empfänger-Kombinationen des letzten Iterationsschrittes kleiner sein als der Laufzeitunterschied, der durch die Anomalie hervorgerufen wird. Ein weiteres Kriterium ist, dass die RMS-Residuen des letzten Iterationsschrittes in ähnlicher Größenordnung liegen wie die der Mess- und Pickgenauigkeit.

**f) Prüfen der Ergebnisstabilität der tomografischen Berechnung** Die Lösung eines inversen Problems ist dann stabil, wenn kleine Änderungen an der Eingangsfunktion auch nur kleine Änderungen der gesuchten Ausgabefunktion bewirken. Zuerst sollte das Verhalten der **RMS-Residuen je Iteration** überprüft werden. Der Verlauf sollte stetig abnehmend sein wie in Abb. 7.9 zu sehen ist und keinesfalls zunehmend oder schwankend. Im Fall (a) ändern sich die RMS-Residuen von Anfang an nur noch geringfügig, da das vorgegebene Startmodell bereits die Daten sehr gut erklärt.

Infolge des systematischen Fehlers pegeln sich die RMS-Residuen auf einem höheren Niveau ein. Nach 10 Iterationen weist die Rekonstruktion des Falls (a) ein RMS-Residuum von nahezu 0 auf. Das RMS-Residuum im Fall (b) beträgt  $1,3 \mu s$ , für (c)  $1,7 \mu s$  und für (d)  $1,8 \mu s$ . Falls die RMS-Residuen jedoch hoch bleiben und sich nur noch wenig ändern, zeigt dies, dass die Daten mit dem vorgegebenen Startmodell schlecht erklärt werden können. Entweder ist in diesem Fall das Startmodell falsch oder die Daten



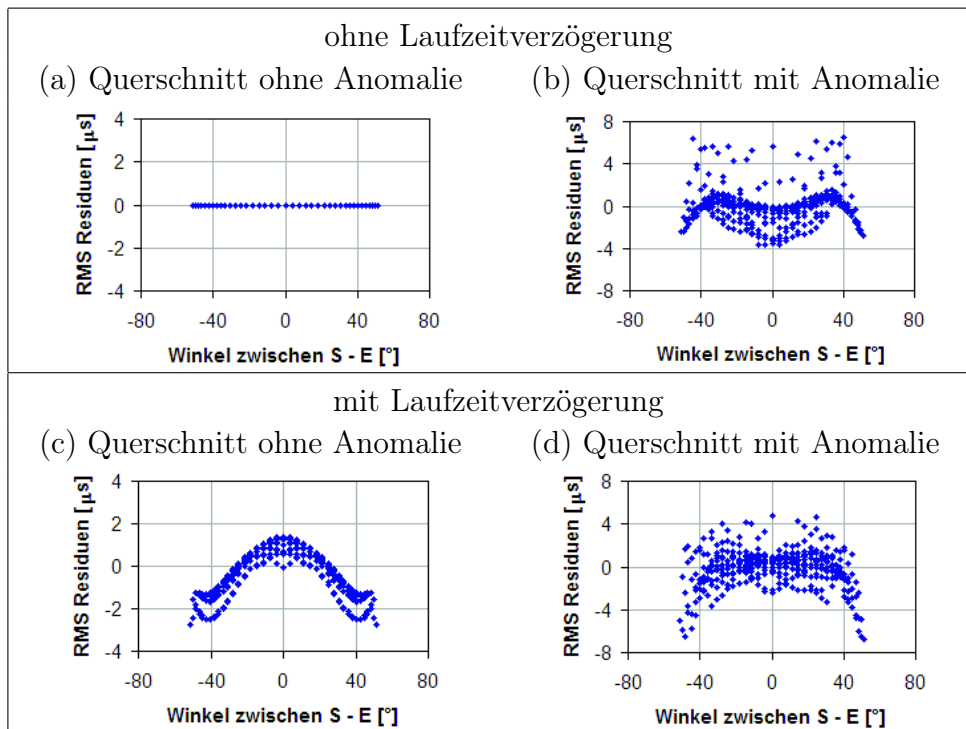


**Abbildung 7.9:** Diagramme zur Prüfung der Ergebnisstabilität; RMS-Residuen je Iterationsschritt

sind zu fehlerbehaftet. In diesem Fall müssen die fehlerhaften Daten eliminiert oder gar die ganze Messung wiederholt werden.

In der Abb. 7.10 sind die **Residuen jeder Sender-Empfänger-Kombination** des letzten Iterationsschrittes in einem Diagramm dargestellt. Im Idealfall sollte es keine Abhängigkeit zeigen, wie in Abb. 7.10 (a). Der Grund für die Streuung in den Diagrammen (b) und (d) wurde bereits auf S.43 erläutert. Vergleicht man die Diagramme (a) und (c) sowie (b) und (d) erkennt man in (c) und (d) ein Winkelabhängigkeit der Residuen. Diese zeigt sich im gekrümmten Verlauf der Daten. Ein weites Kriterium die Stabilität der Rechnung zu prüfen ist, das kleine Änderungen des Startmodells, Netzes oder Anzahl der Strahlen keine wesentlichen Änderungen des Ergebnisses bewirken dürfen.

**g) Weitere tomografische Rekonstruktion mit Teildatensätzen** In einigen Fällen kann es vorteilhaft sein, mit Teildatensätzen zu arbeiten, um detailliertere Informationen zu erhalten (wie in [Becht, 2004]). Dabei werden nur bestimmte Daten ausgewählt und rekonstruiert. Es können beispielsweise Daten ausgeschlossen werden, die spezielle Strahlenwinkel oder unzuverlässige Ausreißer aufweisen.



**Abbildung 7.10:** Diagramme zur Prüfung der Ergebnisstabilität; RMS-Winkel-Diagramm je Strahl des letzten Iterationsschrittes

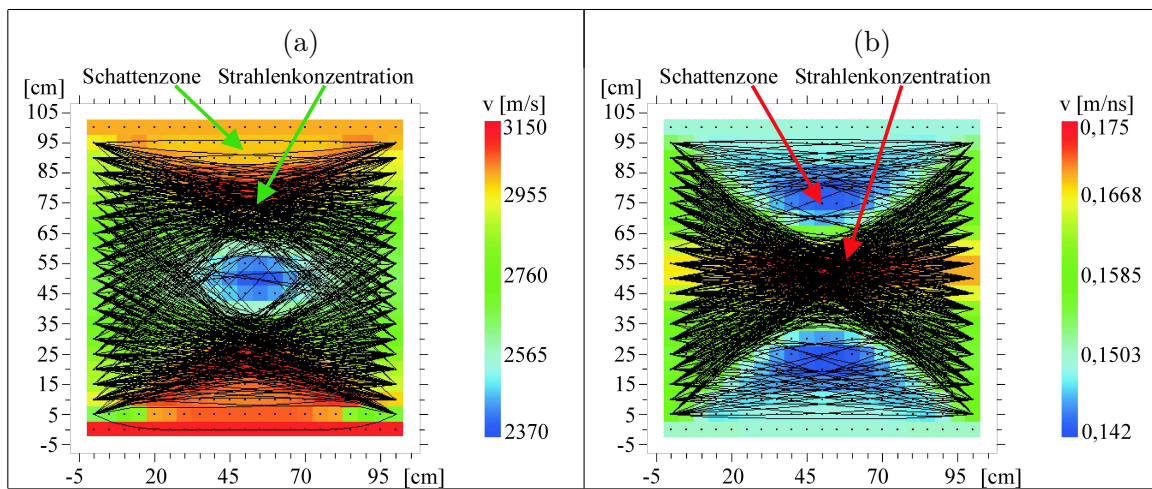
**h) Anpassung des Startmodells und tomografische Rekonstruktion** Das homogene Startmodell kann u.U. an die Ergebnisse der vorangegangenen, gesicherten tomografischen Rekonstruktion angepasst werden. Dies sollte jedoch mit Bedacht und großer Vorsicht geschehen. Die Gründe dafür wurden bereits auf S.45 näher erläutert.

## 7.2. Erwartungen an tomografische Darstellungen

Es stellt sich immer wieder die Frage in wie fern Aussagen über die reale Form und Größe von Inhomogenitäten getroffen werden können. Aufschluss darüber geben die Strahlenverläufe.

In der Abb. 7.11 (a) ist beispielhaft ein Strahlenverlauf dargestellt, der sich ergibt für einen Querschnitt mit einer Anomalie niedrigerer Geschwindigkeit als die der Umgebung. Der Verlauf der Strahlen ist unabhängig von der Wellenart, da angenommen wird, dass sich die Wellenenergie wie ein dünner, gerader Strahl ausbreitet. Sie hängen nur vom Verhältnis der Anomalie- zur Umgebungsgeschwindigkeit ab. Ist die Geschwindigkeit der Anomalie größer als die der Umgebung, so spricht man von einer Hochgeschwindigkeits-

zone. Ist sie niedriger als die Umgebung, so handelt es sich um eine Niedriggeschwindigkeitszone. Man erkennt in der Abb. 7.11 (a), dass fast kein Strahl durch die Anomalie läuft, da diese Wellen erst später ankommen. Stattdessen konzentrieren sich die Strahlen in deren Umgebung. Ebenfalls verlaufen nur wenige Strahlen durch den oberen und unteren Randbereich. Das ist eine Auswirkung der Messgeometrie (Anordnung der Sender und Empfänger auf 2, 3 oder 4 Seiten) und der Strahlenkonzentration in der Umgebung der Niedriggeschwindigkeitszone. Sie hat somit eine fokussierende Wirkung auf ihre Umgebung. Die Zonen geringerer Strahlenüberdeckung als Ursache einer Anomalie bezeichnet man als Schattenzone.

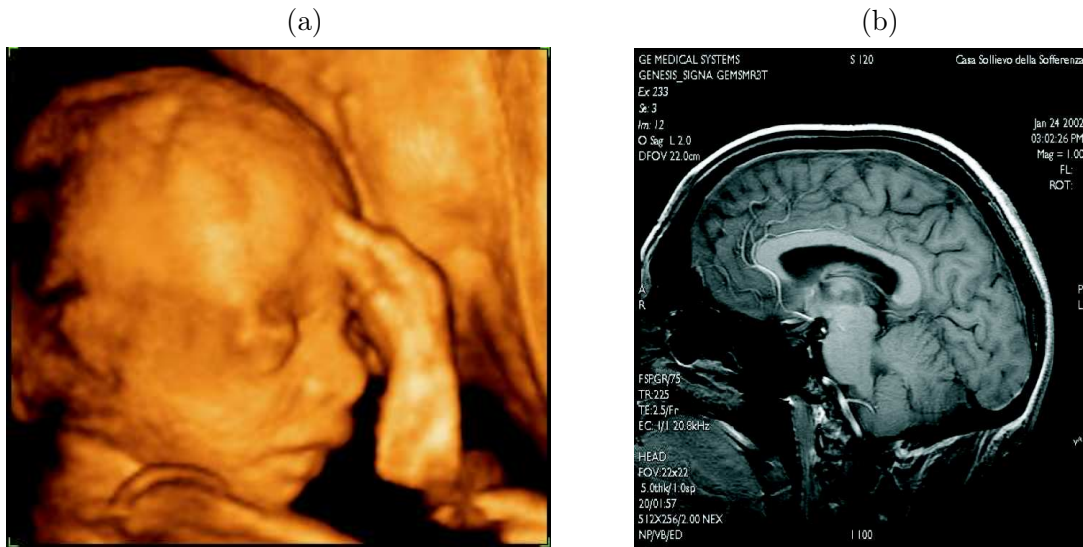


**Abbildung 7.11:** Strahlenverlauf infolge des Einflusses einer (a) Niedriggeschwindigkeitszone; (b) Hochgeschwindigkeitszone

Die Abb. 7.11 (b) zeigt den Strahlenverlauf, der sich ergibt für einen Querschnitt mit einer Anomalie höherer Geschwindigkeit als die der Umgebung. Man erkennt hier, dass eine große Anzahl an Strahlen durch die Anomalie verläuft. Als Konsequenz der fokussierenden Wirkung der Anomalie treten in ihrer oberen und unteren Umgebung Bereiche niedriger Strahlenüberdeckung auf (Schattenzonen).

Die unterschiedlichen Strahlenkonzentrationen erscheinen im Tomogramm als Artefakt. Diese sind somit nicht durch Messfehler entstanden, sondern werden aus der unterschiedlichen Strahlenüberdeckung hervorgerufen, die sich aus der Messgeometrie und der Beugung von Wellen ergibt.

Betrachtet man sich die Strahlenverläufe der Abb. 7.11 (a) und (b) näher, so wird schnell klar, dass eine exakte Abgrenzung der Anomalie und somit die Bestimmung der Form bedingt möglich ist. Warum gelingt es jedoch in der Medizin hochauflösende Schnittbilder, wie die in der Abb. 7.12 mit genauen Größenverhältnissen zu erzeugen und in anderen Bereichen nicht? Es handelt sich zwar in allen Fällen um tomografische Rekon-



**Abbildung 7.12:** (a) Ultraschall-Sonographie in der pränatalen Diagnostik ( $f = 6 - 8$  MHz); (b) MRT einer 3D Abbildungen vom Kopf

struktionen, aber die Messgrößen (Laufzeit; Dämpfung), angewendeten ZiP-Verfahren, vor allem die Messgeometrie und der Rekonstruktionsalgorithmus unterscheiden sich. Die auf S.33 angegebene Tab. 7.1 gibt Auskunft über die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Rekonstruktionsverfahren in der Medizin und im Bauwesen bzw. Geophysik. In der Medizin wird mit deutlich höheren Frequenzen gearbeitet. Dadurch erhält man kleinere Wellenlängen (im Wellenlängen-Bereich von nm bis pm) und sehr schmalbandige Strahlen. Die Daten werden in der Medizin meist mit der Transformationsmethode rekonstruiert. Im Gegensatz dazu kann in der Geophysik und im Bauingenieurwesen häufig nur das Matrixverfahren eingesetzt werden. Es geht von diskretisierten Querschnitten und der Ausbreitung der Wellenenergie in Form eines Strahls aus. Diese Annahme unterscheidet sich von der Transformationsmethode, die von kontinuierlichen Funktionen und ununterbrochenem Projektionssatz ausgeht. Aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen, weisen die Tomogramme in der Geophysik und im Bauingenieurwesen eine geringere Auflösung als in der Medizin auf.

Daraus ergibt sich die Frage, welches Abbild man erwarten kann. Das hängt zum einen von der Messkonfiguration (Positionierung und Abstand der Sender bzw. Empfänger) und zum anderen davon, ob es sich um eine Hoch- oder Niedriggeschwindigkeitszonen handelt, ab. Durch die gewählte Messanordnung wird ein Ergebnis in gewisser Weise vorher festgelegt. Bereiche mit hoher Strahlenüberdeckung aus unterschiedlichen Richtungen sind besser rekonstruierbar als andere.

Zur besseren Vorstellbarkeit wurden Simulationsrechnungen mit dem Programm Re-

flex durchgeführt (Beschreibung des Algorithmus siehe S.54). Die damit ermittelten Laufzeiten wurden dann verwendet, um mit dem Programm GeoTom das ursprüngliche Modell wieder zu rekonstruieren. Der verwendete Querschnitt hat die Abmessungen 1x1 m.

Die Abb. 7.13 zeigt die Ergebnisse für einen Querschnitt mit Hochgeschwindigkeitszone. Es wurden elektromagnetischen Wellen angenommen. Die elektromagnetischen Kenngrößen des umgebenden Materials (Mauerwerk) betragen:

$$\begin{array}{l} \text{Umgebung (Mauerwerk):} \quad \varepsilon = 4, \quad \mu = 1, \quad \sigma = 0 \\ \text{Anomalie (Luft):} \quad \quad \quad \varepsilon = 1, \quad \mu = 1, \quad \sigma = 0 \end{array}$$

Die gewählten Modelle unterscheiden sich durch die Größe und Form der Anomalien. Als erstes wurde ein Modell gewählt dessen Anomalie sich über die gesamte Höhe erstreckt und eine Breite von 0,2 m besitzt. Das zweite Modell enthält eine quadratische Inhomogenität der Größe 0,2x0,2 m. Die im Modell drei gewählte Anomalie besitzt einen kreisrunde Form des Durchmessers 0,2 m. Im vierten und fünften Modell wurden rechteckige Anomalien der Größe 0,2x0,6 m ausgewählt. Für die Anordnung der Sender und Empfänger kommen in der Praxis üblicherweise drei Varianten vor:

- A: auf zwei sich gegenüberliegenden Seiten (borehole)
- B: auf zwei sich gegenüberliegenden und einer weiteren Seite (borehole + surface)
- C: auf allen vier Seiten (rundum)

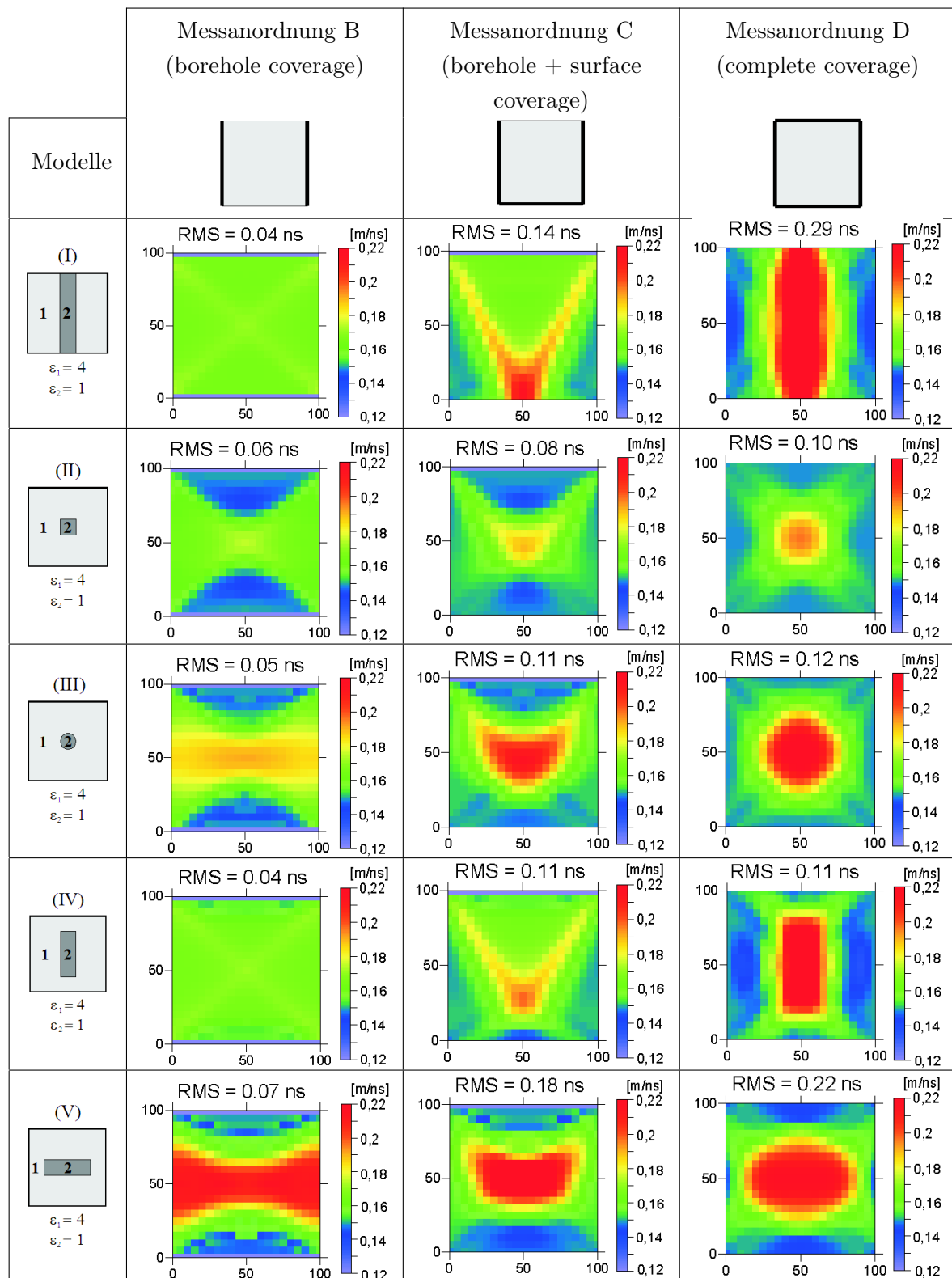
Die Abb. 7.14 zeigt die Ergebnisse für einen Querschnitt mit Niedriggeschwindigkeitszone. Für diese Simulationen wurden eine akustische Wellenausbreitung mit den folgenden Kenngrößen angenommen:

$$\begin{array}{l} \text{Umgebung (Mauerwerk):} \quad v_P = 3000 \text{ m/s} \quad \rho = 1,7 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Anomalie (Modelle 1-2):} \quad v_P = 2000 \text{ m/s} \quad \rho = 2,0 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Anomalie (Modelle 3-5):} \quad v_P = 300 \text{ m/s} \quad \rho = 1,0 \text{ g/cm}^3 \end{array}$$

Die Tomogramme in den Abbildungen 7.13 und 7.14 zeigen die rekonstruierten Geschwindigkeiten. Aus den Simulationen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Nur für eine vollständige Strahlenüberdeckung ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ) liefert die Rekonstruktion ein realistisches Abbild.
- Ist eine vollständige Strahlenüberdeckung nicht möglich, dann verschmieren die Anomalien
- Bedingt durch die Anomalien und die gewählte Messgeometrie treten Schattenzonen auf (siehe S.49), die man in Form von Artefakten wiedererkennt.
- Die Größe der Anomalien kann näherungsweise mit Hilfe des Signal-Rausch-Verhältnisses, den Schnitten durch das Tomogramm und die tomografische Rekonstruktion bestimmt werden. Eine Aussage über ihre Form ist nur eingeschränkt möglich.

## 7. Datenauswertung



**Abbildung 7.13:** Rekonstruktion von Querschnitten, die unterschiedlichen Formen von **Hochgeschwindigkeitszonen** beinhalten, aus **Simulationen** von Messungen mit **elektromagnetischen Wellen** bei unterschiedlicher Messanordnung

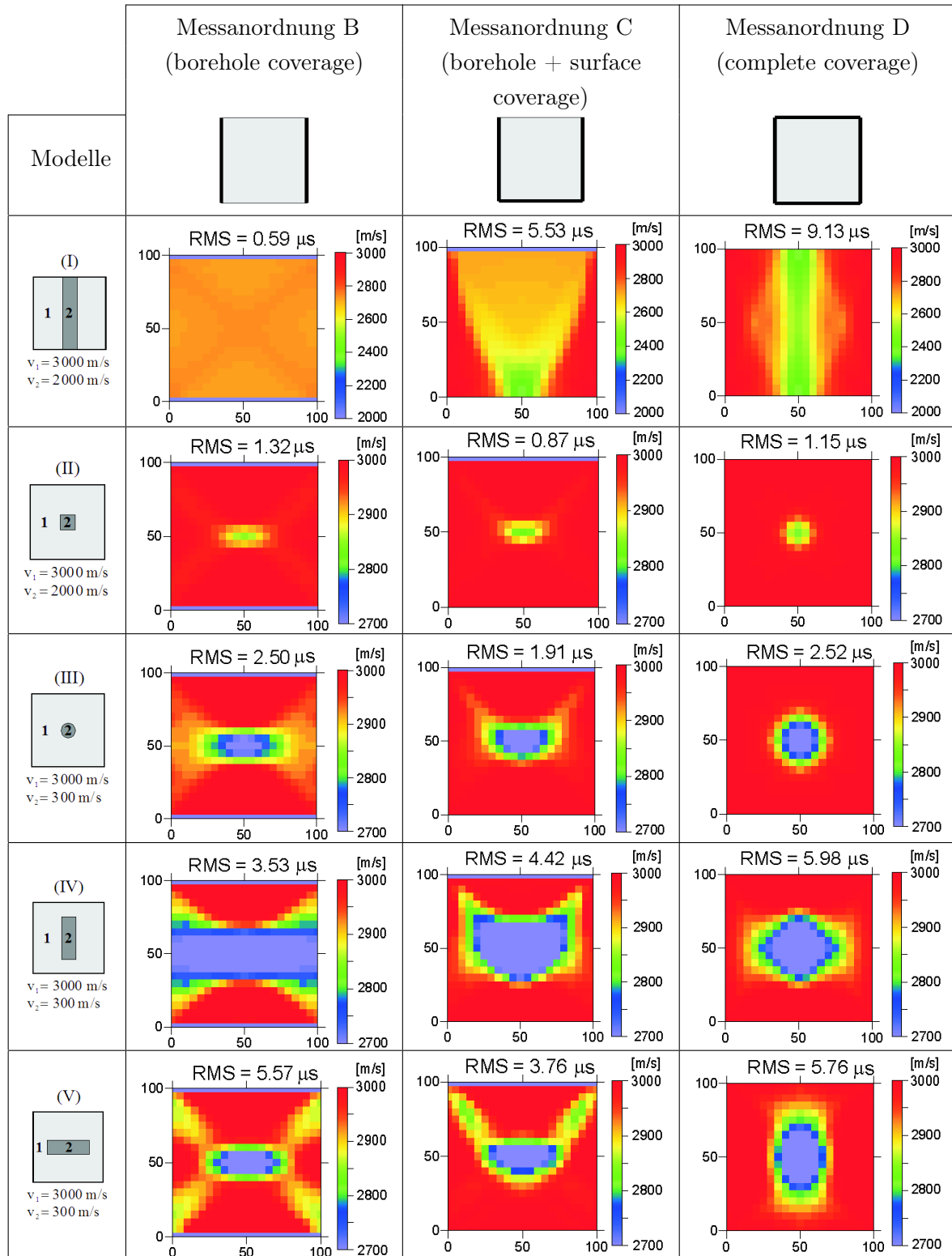


Abbildung 7.14: Rekonstruktion von Querschnitten, die unterschiedlichen Formen von **Niedriggeschwindigkeitszonen** beinhalten, aus **Simulationen** von Messungen mit **mechanischen Wellen** bei unterschiedlicher Messanordnung

### 7.3. Beschreibung der verwendeten Software

Für die tomografische Berechnung standen vier unterschiedliche Programme zur Verfügung, "Migratom" bzw. "GeoTom", "RAI 2D", "Reflex" und "Tomopoli". Sie wurden auf ihre Eignung und ihre Handhabbarkeit zur Rekonstruktion von Laufzeitmessungen hin untersucht. "Migratom" [Jackson, 1994] wurde in den 70-er Jahren in den USA entwickelt, "GeoTom" ist davon eine Weiterentwicklung, "RAI 2D" [Côte, 1995; Sahebi, 1996] stammt aus dem Labor "LCPC" in Frankreich und wurde vor ca. 20 Jahren geschrieben. "ReflexW" [Sandmeier, 2001] ist eine umfangreichere Software zum Darstellen, Auswerten, Rekonstruieren, Simulieren, etc. von Daten. Diese Software eignet sich als einzige der vier getesteten Rekonstruktionsprogramme auch zur Vorwärtsrechnung, d.h. zur Simulation von Messungen. "Tomopoli" [Zanzi, 2003] ist das jüngste Programm der Universität von Mailand, das im EU-Projekt "ONSITEFORMASONRY" weiterentwickelt wurde.

**GeoTom:** ist ein 3-dimensionales Rekonstruktionsprogramm, das Geschwindigkeiten oder Dämpfungen analysieren kann [Jackson, 1994]. Als Inversionsmethode wird der SIRT-Algorithmus mit einer modifizierten Wichtung des Korrekturfaktors angewendet. Der zu untersuchende Querschnitt kann in Rechtecke bzw. Dreiecke diskretisiert werden. Die Ermittlung der Geschwindigkeiten erfolgt an den Knoten, dazwischen wird linear interpoliert. Das Program kann Anisotropien berücksichtigen. Die Strahlenwege können gerade oder gebeugt berechnet werden. Die gebeugten Strahlenwege werden als Wellenfronten nach dem Huygensschen Prinzip (siehe S.150) berechnet. Als Randbedingungen (Apriori Informationen) müssen die Ober- und Untergrenzen der zu erwartenden Geschwindigkeiten und ein Geschwindigkeitsmodell des Querschnitts (Startmodell) vorgegeben werden.

**RAI-2D:** ist ein 3-dimensionales Rekonstruktionsprogramm, das Geschwindigkeiten analysieren kann [Côte, 1995; Sahebi, 1996]. Als Inversionsmethode wird der SIRT-Algorithmus mit einer modifizierten Wichtung des Korrekturfaktors angewendet. Der Querschnitt wird in Rechtecke zerlegt. Die Ermittlung der Geschwindigkeiten erfolgt an den Knotenpunkten mit Einflusszone. Anisotropische Eigenschaften können mit berücksichtigt werden. Die Strahlenwege können gerade oder gebeugt berechnet werden. Die gebeugten Strahlenwege werden nach dem Snell'schen Gesetz, der Krümmungs- (bending) Methode (siehe Kap. 7.1.3, S.38) berechnet. Es müssen die Ober- und Untergrenzen der zu erwartenden Geschwindigkeiten und ein Geschwindigkeitsmodell des Querschnitts vordefiniert werden. Des Weiteren können verschiedene Abbruchkriterien definiert werden. [Abraham, 2000; Côte, 1995]

**ReflexW:** ist ein 3-dimensionales Rekonstruktionsprogramm, das Geschwindigkeiten analysieren kann [Sandmeier, 2001]. Als Inversionsmethode wird der SIRT-Algorithmus verwendet. Der Querschnitt wird in Rechtecke zerlegt. Anisotropische Eigenschaften können mit berücksichtigt werden. Die Strahlenwege können gerade und gebeugt berechnet



werden. Es müssen die Ober- und Untergrenzen der zu erwartenden Geschwindigkeiten und ein Geschwindigkeitsmodell des Querschnitts vordefiniert werden. ReflexW bietet zwei Möglichkeiten der Vorwärtsrechnung (= Simulation von Messungen und ihren Ergebnissen). Zum einen kann dies mittels der Finite-Differenzen-Methode geschehen, bei der durch die Vorgabe der Frequenz ein komplettes Wellenfeld einer Sender-Empfänger-Kombination (A-Bild) modelliert wird. Durch anschließendes picken des Ersteinsatzes kann dann die Laufzeit bestimmt werden. Die zweite Möglichkeit der Simulation von Laufzeiten ist die Modellierung mit Hilfe einer Art Ray-Tracer. Dieser Algorithmus basiert auf einer Finite-Differenzen-Näherung, die die Eikonalgleichung (siehe S. 12) löst. Es wird die Laufzeit der ersten Wellenfront berechnet. Die mathematische Umsetzung beschreibt [Vidale, 1988]. Nach [Sandmeier, 2001] ergeben beide Algorithmen die gleiche Laufzeit der ersten Wellenfront. Alle die hier beschriebenen Simulationen wurden mit dem zweiten Vorwärtsalgorithmus berechnet.

Tabelle 7.2: Übersicht über die verwendeten Tomografie-Software

	<b>GeoTom</b>	<b>RAI 2D</b>	<b>ReflexW</b>	<b>Tomopoli</b>
<i>2D/3D</i>	2D und 3D	2D und 3D	2D und 3D	2D
<i>Inversionsalgorithmus:</i>	SIRT	SIRT	SIRT	SVD
<i>Rekonstruktion:</i>	Geschwindigkeit und Dämpfung	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit und Dämpfung
<i>Diskretisierung:</i>	Rechtecke und Dreiecke	Rechtecke	Rechtecke	Rechtecke
<i>Berechnung v an:</i>	Knoten, dazwischen lineare Änderung	Knoten, mit Einflusszone	Knoten, dazwischen lineare Änderung	k.A.
<i>Anisotropie:</i>	möglich	möglich	nicht möglich	k.A.
<i>Strahlenwege: (Ray Tracer)</i>	gerade/gebeugt	gerade/gebeugt	gerade/gebeugt	gerade/gebeugt
<i>gebeugt nach</i>	Huygenssche Prinzip [Vidale, 1988]	Krümmungsmethode	Huygenssche Prinzip [Vidale, 1988]	Schussmethode

**Tomopoli:** ist ein 2-dimensionales Rekonstruktionsprogramm, dass Geschwindigkeiten oder Dämpfungskoeffizienten (frequency downshift) analysieren kann [Zanzi, 2003]. Als Inversionsmethode wird der SVD-Algorithmus (Singulärwertzerlegung) angewendet.

Der Querschnitt wird in rechteckige Elemente unterteilt. Diese Elemente können durch Zusammenlegung in ihrer Größe variiert werden. Die Strahlenwege können gerade oder gebeugt berechnet werden. Die gebeugten Strahlenwege werden nach dem Snell'schen Gesetz, der Schuss- (shooting) Methode (siehe Kap. 7.1.3, S.38) berechnet. Es müssen die Ober- und Untergrenzen der zu erwartenden Geschwindigkeiten und ein Geschwindigkeitsmodell des Querschnitts vordefiniert werden.

## 7.4. Laufzeitbestimmung und Fehlerbetrachtung

### 7.4.1. Laufzeitbestimmung

Die Basis der Laufzeittomografie ist die korrekte Bestimmung der Laufzeit. Neben der Bestimmung des Nullpunktes (Beginn der Welle), ist das Picken der immer gleichen Wellenart (Longitudinal-, Transversalwelle, etc.) und dem Einsatzpunkt dieser Wellenart (Ersteinsatz, 1. Maximum, 1. Minimum, etc.) von großer Bedeutung. Hier wurde die Laufzeit bestimmt aus der zeitlichen Differenz zwischen dem Aussenden der Welle und der Ankunft des ersten Signals am Empfänger. Ideal ist die Bestimmung des Ersteinsatzes der Welle, da es sich um die reale Laufzeit handelt. Dies ist in der Praxis oft auf Grund von Oberflächenwellen, Luftwellen (bei Radar), einem schlechten Signal-Rauschen-Verhältnis oder andere Störeinflüsse schwierig. In diesem Fall muss das erste Maximum bzw. Minimum zur Laufzeitbestimmung herangezogen werden [Brauchler, 2003]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die Laufzeit um einen konstanten Betrag verzögert (siehe dazu synthetische Fehler S.41).

Zur Bestimmung der Laufzeit wurde für die Ultraschallmessung immer der Ersteinsatz der Longitudinalwelle und für die Radaruntersuchungen immer das erste Maximum gewählt. Die Bestimmung kann entweder manuell oder automatisch mit manueller Bearbeitung erfolgen [Kurz, 2003b]. Es gibt eine Vielzahl an mathematischen Möglichkeiten diesen Ersteinsatz und somit die Laufzeit der Welle automatisch zu bestimmen (z.B. mit Wavelets [Kurz, 2003c], Einhüllende oder wie in [Tronicke, 2007] beschrieben). Jedoch ist der Erfolg der automatische Bestimmung des Ersteinsatzes abhängig von der zugrunde liegenden Datenqualität. Die Messungen auf die dieses Arbeit basiert, waren zum Teil stark verrauscht, so dass die getesteten Algorithmen nicht zielführend waren. Die Suche danach geeigneten Algorithmen ist ein gesondertes, umfangreiches Arbeitsfeld. Um die Einsatzmöglichkeiten tomografischer Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Mauerwerk abzugrenzen, wurden in der hier vorliegenden Arbeit die Ersteinsätze hauptsächlich manuell mit dem Program *ReflexW* und/oder einem selbst geschriebenen Program ermittelt.

## 7.4.2. Fehlerbetrachtung - Ultraschall

Die Einflüsse lassen sich mit der 6M-Methode grundsätzlich untergliedern in:

- Maschine (Hard- und Software)
- Methode (Messdurchführung und Auswertung)
- Material (Material- und Struktureigenschaften)
- Milieu
- Mensch
- Management

**Tabelle 7.3:** Zusammenfassung aller untersuchten Einflüsse auf die Laufzeit mechanischer Wellen

<b>Einfluss</b>	<b>Standardabweichung [<math>\mu s</math>]</b>	<b>Bemerkung</b>
Pickgenauigkeit	<b>0,4</b>	
Ankopplung	<b>2-3</b>	
Frequenz	(0,5)	Erläuterung siehe S.172
Vorverstärkung	2-3	Erläuterung siehe S.172
Erwärmung der Apparatur	0,7	vernachlässigbar
Kabellänge	1,1	vernachlässigbar
Vertauschen der Prüfköpfe	1,1	vernachlässigbar
Bandpassfilterung	1,3	vernachlässigbar
Anpressdruck 1bar	0,6	vernachlässigbar
Anpressdruck 2bar	0,5	
Heterogenität des Materials	<b>2-3</b>	

Um die verschiedenen Einflüsse auf die Bestimmung der Laufzeit zu ermitteln, wurden Messungen an den Probekörpern Polyamid PA6 (siehe Anhang S.169) und W2 (siehe S.66) durchgeführt und z.T. einen Tag später wiederholt. Die Einflüsse auf die Laufzeit mechanischer Wellen und die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Tabelle 7.3 zusammengefasst (für  $T$ ,  $P$ ,  $c_{Wasser}$ ,  $c_{Salz}$  = konst.). Eine ausführliche Beschreibung der Messdurchführung und Ergebnisse befinden sich im Anhang S.169ff.

Weiterhin beeinflussen Feuchte, Temperatur und Druck die Laufzeit bzw. Geschwindigkeit akustischer Wellen. **Feuchte:** Generell bewirken Poren ein Zunahme der Laufzeiten und Abnahme der Geschwindigkeit. Die Ursache dafür ist **(a)** die Veränderung in den Bindungen der Matrixbestandteile und **(b)** der Einfluss des Porenme-

diums (besitzt niedrigere elastische Eigenschaften als feste Gesteinsmatrix). Es gilt:  $t_{Matrix} < t_{Wasser} < t_{Luft}$  somit ist:  $t_{gesaettigt} < t_{trocken}$  [Fleischer, 2004] gibt eine Zunahme der Durchgangsgeschwindigkeit mit steigendem Wassergehalt von bis zu 35 % an. Eine Zunahme der Geschwindigkeit und somit Abnahme der Laufzeit mit steigendem Wassersättigungsgrad tritt jedoch nur dann auf, wenn die mechanischen Eigenschaften der Matrix nicht herabgesetzt werden z.B. durch Löse- oder Quellvorgänge [Schön, 1983].

Die **Temperatur** beeinflusst die Geschwindigkeit und Laufzeit in erheblichem Masse. Insbesondere Temperaturen, die annähernd oder unter 0°C liegen, bewirken eine Abnahme der Laufzeit. Generell nimmt jedoch die Laufzeit mit steigender Temperatur zu. Die Ursachen können hierfür sein: **(a)** Kornkontaktänderungen durch Änderung des Aggregatzustandes des Porenmediums von flüssig zu gasförmig; **(b)** Kornkontaktänderungen durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten und/oder **(c)** Veränderung der elastischen Eigenschaften der Mineralsubstanz. [Fleischer, 2004] gibt eine Laufzeitänderung infolge einer Temperatureinwirkung (+20°C auf +70°C) von bis zu 13 % an.

Die Geschwindigkeit-**Druck**-Beziehung ist für alle Gesteine nichtlinear. [Schön, 1983] beschreibt das Verhalten in 3 Abschnitten.

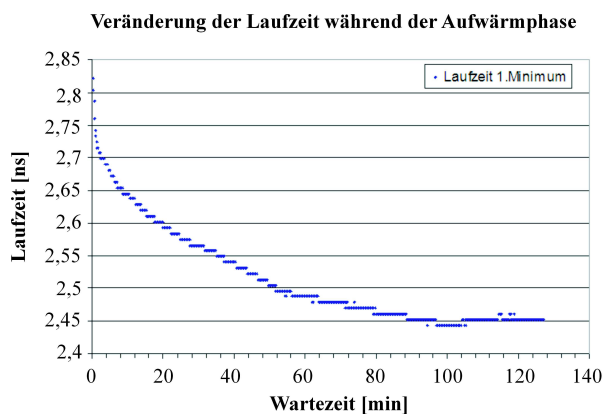
- (a) Im unteren Druckbereich ist eine starke Geschwindigkeitszunahme (somit Abnahme der Laufzeit) infolge des Schließens von Poren und Klüften zu verzeichnen. Diese Veränderung ist teilweise irreversibel, das zu Unterschieden der Geschwindigkeit bei Be- und Entlastung führt (Hysterese)
- (b) Danach folgt ein Bereich mit geringerer Geschwindigkeitszunahme infolge der geringen Druckabhängigkeit der Matrix (nahezu ideal-elastisches Verhalten)
- (c) Bei weiterer Drucksteigerung bilden sich neue Risse. Die Geschwindigkeit sinkt ab (es steigt die Laufzeit).

Die Erwärmung der Apparatur, veränderte Kabellängen, das Vertauschen von Prüfköpfen, die Verwendung eines Bandpassfilters und der Anpressdruck haben keinen signifikanten Einfluss auf die Laufzeit. Ebenfalls kann aus den Messungen geschlossen werden, dass sich jederzeit die Ergebnisse reproduzieren lassen. Die Heterogenität des Mauerwerks bewirkt eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses und somit auch einen weniger eindeutigen Ersteinsatzpunkt (siehe A.2). Die Laufzeit an W2 konnte mit einer Genauigkeit von 2-3  $\mu s$  bestimmt werden (Abb. A.3a). Die Einflüsse infolge von veränderten Feuchtigkeitsgehalten, Druck- und Temperaturverhältnissen spielte bei den hier beschriebenen Transmissionsmessungen keine Rolle. Es addieren sich im Wesentlichen die Einflüsse der Pickgenauigkeit, der Ankopplung und der Heterogenität des Mauerwerks. Ihre Summe beträgt mindestens 4-6  $\mu s$  (durchschnittlich 5  $\mu s$ ). Dieser Wert ist ein Mindestwert, da der Einfluss der Pickgenauigkeit abhängig vom Signal-Rausch-Verhältnis und somit von der "Qualität des Mauerwerks" ist. Ebenfalls ist die Laufzeitbestimmung personenabhängig. Um dadurch mögliche Fehler auszuschließen, sollte die Laufzeit eine Untersuchung von immer der gleichen Person bestimmt werden.

### 7.4.3. Radar

Die Einflüsse auf die Messunsicherheit sind ausführlich im Validierungsreport “Radar“ der Standardarbeitsanweisung der BAM festgehalten.

Die hierfür ausschlaggebenden Einflüsse sind die “Maschine“ und der “Mensch“. Dabei tragen die thermische Erwärmung, die Kalibrierung der Zeitachse (Nullpunktbestimmung) und die Laufzeitbestimmung den größten Teil der Messunsicherheit. Der Einfluss der Erwärmung der Messapparatur SIR-10 wurde durch die Auswertung der Laufzeiten (1. Maximums) ermittelt. Die Abb. 7.15 zeigt das Ergebnis der Transmissionsmessungen in Luft. Man erkennt ein deutliches Absinken der Laufzeit um ca. 0,4 ns infolge der thermischen Erwärmung einzelnen Komponenten. Nach ca. 90min stabilisiert sich die Laufzeit und die thermische Erwärmung hat keinen signifikanten Einfluss mehr.



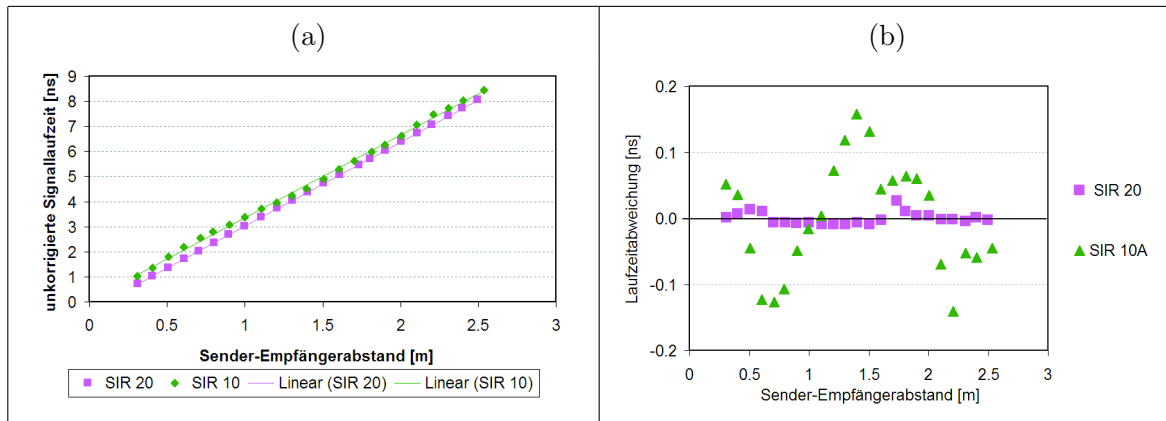
**Abbildung 7.15:** Einfluss der Erwärmung der Apparatur auf die Laufzeit

Die Kalibrierung der Zeitachse (Bestimmung des Nullpunktes und des Maßstabfaktors) erfolgte über Transmissionsmessungen in Luft mit den Radarsystemen SIR-10 und SIR-20 (Abb. 7.16 a). Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger betrug zwischen 0,3 m und 2,5 m. Die sich daraus ergebende Trendlinie aller Messpunkte kann allgemein beschrieben werden mit  $y = mx + n$ . Der Schnittpunkt mit der y-Achse  $n$  entspricht dem Zeitpunkt  $t = 0$  an dem die Welle ausgesendet wird (Nullpunkt). Aus dem Anstieg der Gerade folgt der Maßstabfaktor  $m$  ( $c_0/v$  mit  $c_0 = 0,3 \text{ m/ns}$ ). Die gemessenen Laufzeiten lassen sich mit Hilfe der folgenden Gleichung korrigieren:

$$t_{\text{korr}} = \left( \frac{t_{\text{gemessen}}}{m} \right) - n$$

Unter der Annahme, dass sich die Abweichungen zur Trendlinie statistisch verteilen, betragen die Standardabweichungen der Radarsysteme SIR-10  $\pm 0,09 \text{ ns}$  und SIR-20  $\pm 0,009 \text{ ns}$ . Die weitere Untersuchung der Abweichungen zur Trendlinie hat für das Radarsystem SIR-10 ergeben, dass es sich um z.T. systematische Fehler handelt (siehe Abb.

7.16 b). Woher diese systematischen Fehler rühren ist noch nicht abschließend geklärt. Somit sollte für Transmissionsmessungen, die eine höhere Genauigkeit erfordern, das Radarsystem SIR-20 verwendet werden.



**Abbildung 7.16:** (a) Weg-Zeit-Diagramm mit Trendlinien zur Kalibrierung der Zeitachse; (b) Abweichung der Signallaufzeit von der Trendlinie

Weiterhin beeinflusst die Laufzeit elektromagnetischer Wellen Feuchte, Salz, Druck und Temperatur. Die meisten gesteinsbildenden Minerale sind schlechte elektrische Leiter. Sie besitzen Dielektrizitätszahlen (DK) in Bereich von  $\varepsilon < 10$ . Den entscheidenden Einfluss auf die DK und somit auf die Laufzeit liefern wässrige Lösungen. Wasser, mit einer DK von  $\varepsilon = 80$ , besitzt eine viel höhere Polarisierbarkeit als die meisten nicht-metallischen Materialien. Die DK verhält sich dispersiv. Es ist eine Abnahme der DK mit steigender Frequenz festzustellen. Wobei sich dieser Effekt mit zunehmenden Wassergehalt verstärkt. Je höher die Porosität und der Sättigungsgrad eines Gesteins ist, um so größer ist der Absolutwert des Realteils der DK. Der Einfluss des Feuchte- und Salzgehaltes werden in den Arbeiten von [Hauenschild, 1999] und [Schlemm, 2003] ausführlich erläutert. Unterhalb von 100 MHz wird die DK vom Feuchte und Salze in ähnlicher Weise beeinflusst und können nicht voneinander getrennt werden. Ein steigender Salzgehalt wird durch einen höheren Feuchtigkeitsgehalt wahrgenommen. Zwischen 200 MHz und 1 GHz beeinflusst der Salzgehalt den Imaginärteil und der Feuchtigkeitsgehalt den Realteil der DK. Oberhalb von 2 GHz kann der Feuchtigkeitsgehalt allein aus dem Realteil der DK bestimmt werden. Allerdings nehmen auch Störeinflüsse durch Inhomogenitäten oberhalb dieser Frequenz deutlich zu.

Der Einfluss des Druckes und der Temperatur wird in [Schön, 1983] erläutert. Zunehmender Druck bewirkt ein Absinken der Aktivierungsenergie und somit eine Leitfähigkeitszunahme, die eine kürzere Laufzeit bewirkt. Bei zunehmender Temperatur steigt die DK sowie die Dispersion (siehe S.149).

Da die Messungen bei konstantem Druck, Temperatur, Feuchte- und Salzgehalt durchgeführt wurden, werden diese nicht zu den gerätespezifischen Einflüssen addiert. Somit beträgt die Summe aller Einflüsse beim Einsatz des Radarsystems SIR20 und der 1,5 GHz Antenne mindestens  $\pm 0,15 \text{ ns}$ . Dieser Wert ist nur einen Richtwert, da die Laufzeitbestimmung wesentlich von der Signalqualität abhängt.

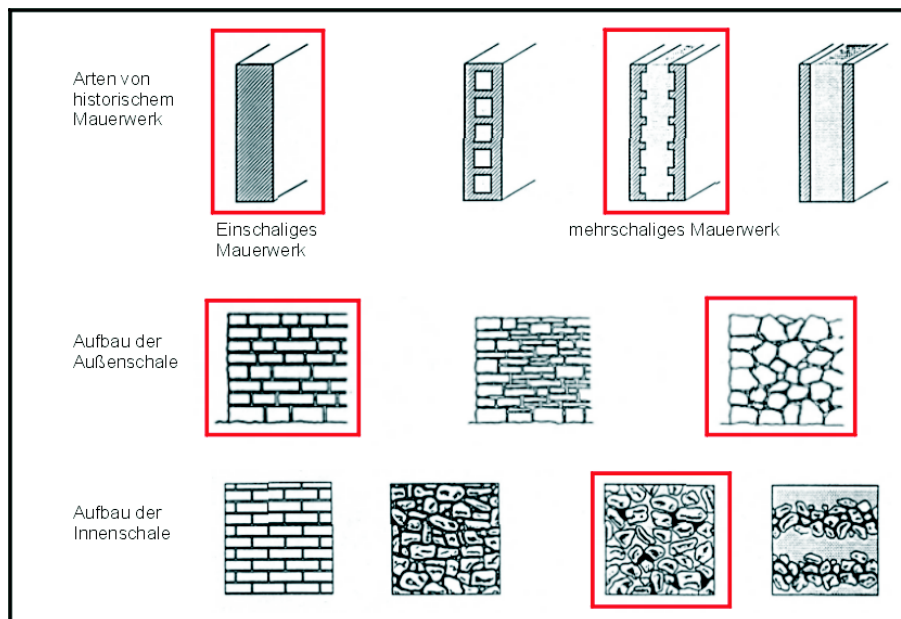




# 8. Beschreibung der Untersuchungsobjekte

## 8.1. Klassifizierung von historischem Mauerwerk

Die Klassifizierung historischen Mauerwerks wird in [Egermann, 1994] beschrieben und ist in Abb. 8.1 verkürzt dargestellt. Historisches Mauerwerk kann unterschieden wer-



**Abbildung 8.1:** Klassifikation von historischem Mauerwerk nach [Egermann, 1994]

den nach den Mauerwerksarten und dem Aufbau der Außen- bzw. Innenschale. Unter Mauerwerksarten wird der Aufbau einer Mauer, einschalig oder mehrschalig, zusammengefasst. Bei mehrschaligem Aufbau können die Schalen untereinander verbunden, verzahnt oder getrennt von einander sein.

Die Außenschale kann regelmäßig oder unregelmäßig vermauert sein. Die Innenschalen historischer Mauern wurden meist verfüllt, jedoch wurde häufig weniger Sorgfalt auf ihre Ausführung gelegt. Das hatte verschiedene Gründe. Erstens ist die Innenschale vor

## 8. Beschreibung der Untersuchungsobjekte

---

Witterungseinflüssen, wie Schlagregen, geschützt. Zweitens sollte die Innenschale weniger Tragwirkung (Eigengewicht) besitzen und drittens aus Gründen der Effektivität (Kosten, Zeit). Die Innenschale kann gemauert oder geschichtet sein. Die Schichten können mit oder ohne Mörtel verbunden sein. Oft wurden Materialreste mit einer größeren Menge an Mörtel vermischt und in den Zwischenraum der zwei Außenschalen eingefüllt. Die Abb. 8.2 illustriert einige der beschriebenen Möglichkeiten für die Ausführungen von historischem Mauerwerk.



Abbildung 8.2: Beispiele für unterschiedliche Ausführungen von historischem Mauerwerk

## 8.2. Beschreibung der Untersuchungsprobleme

Um die baurelevanten Untersuchungsprobleme zu ermitteln, wurde im Rahmen des EU-Projektes “ONSITEFORMASONRY“ ein Schadenskatalog zusammengestellt. Darin sind Untersuchungsprobleme bzw. Schäden aufgelistet mit denen die Projektpartner in der Vergangenheit konfrontiert wurden. Der Katalog erhebt keinen Anspruch auf allumfassende Vollständigkeit. Statt dessen symbolisiert er die relevanten Untersuchungsprobleme. Sie sind in Tab. 8.1 zusammenfassend dargestellt.

Für die eigenen Untersuchungen wurden die in Tab. 8.1 hervorgehobenen Fragestellungen ausgewählt, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Ortung von Hohlstellen
- Ortung von metallischen und hölzernen Einschlüssen
- Ortung von verschiedenen Gesteinstypen

**Tabelle 8.1:** Praxisrelevante Untersuchungsprobleme

Nr.	Fragestellung	Häufigkeit
1	<b>Untersuchung der inneren Struktur (Geometrie, Mehrschaligkeiten, Aufbau, ...)</b>	17,2 %
2	Untersuchung von Rissen und Ablösungen (Lokalisation, Geometrie, ...)	15,8 %
3	Ermittlung von Feuchte- und Salzgehalten mit Temperaturangaben	14,3 %
4	Bestimmung von Verschiebungen und / oder Verdrehungen	13,8 %
5	Belastungszustände (vorhanden): $\sigma_D$ (Druckspg.), $\tau$ (Scherspg.), F (Kraft) Mechanische Eigenschaften (zulässig): E (E-Modul), G (Schubmodul) Materialeigenschaften (Dichte, Porosität, Wasseraufnahmevermögen, thermische Parameter)	12,8 %
6	<b>Lokalisierung von Hohlstellen</b>	11,3 %
7	<b>Lokalisierung von Einschlüssen (Holz, Metall, Anker,...) mit Zustandsanalyse und Abmaßen</b>	10,8 %
8	<b>Lokalisierung von unterschiedlichen Materialien / Dichteunterschiede mit Maßangaben</b>	3,4 %

## 8.3. Beschreibung der Messobjekte

### 8.3.1. Laborprobekörper

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses auf die Messergebnisse werden zunächst Mauerwerksprobekörper benötigt, die keine unplanmäßigen Lufträume enthalten. Ob-

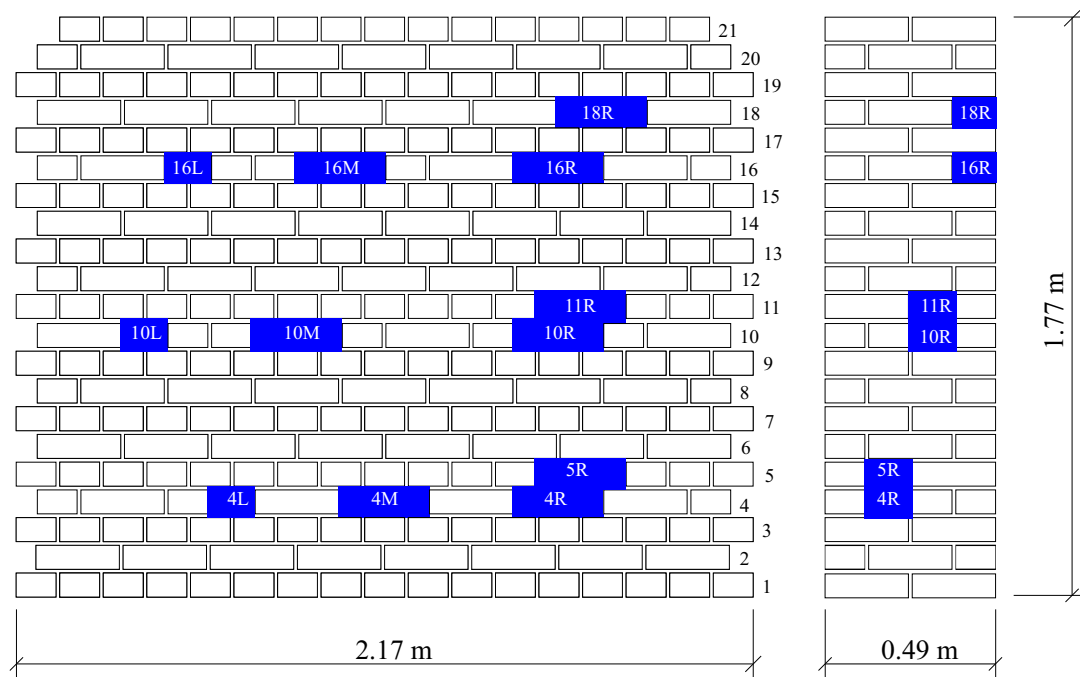


Abbildung 8.3: “W2“ Ansicht und Schnitt mit Lage und Größe der Fehlstellen

gleich reales Mauerwerk nicht vollfugig errichtet wird, mussten die Probekörper so homogen wie möglich hergestellt werden. So wurden Vollziegel verwendet und die Fugen mit Mörtel vollständig ausgefüllt. Somit können unter optimalen Bedingungen vordefinierten Strukturveränderungen simuliert werden. Diese Bedingungen erfüllen die Probekörper “W2“ und “Asterix I+II“.

In der Abb. 8.3 ist der Probekörper “W2“ schematisch dargestellt. “W2“ ist eine von allen Seiten zugängliche Wand mit einer Höhe von 2,0 m, einer Länge von 2,25 m, und einer Dicke von 0,49 m.

Darin befinden sich unterschiedlich große Hohlräume, die durch Auslassen von Ziegeln entstanden sind. Die Hohlräume haben Größen von  $6 \times 11 \times 12 \text{ cm}$  (1/2 Ziegel),  $6 \times 11 \times 24 \text{ cm}$  (1 Ziegel) und  $12 \times 11 \times 24 \text{ cm}$  (2 Ziegel). Sie befinden sich in einem Abstand von der Oberfläche von  $12 \text{ cm}$  (Reihe 4 und 5),  $24 \text{ cm}$  (Reihe 10 und 11) und  $36 \text{ cm}$  (Reihe 16 und 18).

“*Asterix I+II*“ sind Probekörper, in die die bisherigen Messverfahren eingeflossen sind. Sie sind von allen 4 Seiten zugänglich und haben eine Höhe von  $1,5 \text{ m}$ , eine Länge von  $1,01 \text{ m}$  und eine Dicke von  $0,76 \text{ m}$ . Die Anomalien wurden asymmetrisch angeordnet, um eine Fehlinterpretation aus möglichen symmetrischen Geometrieeffekten auszuschließen.

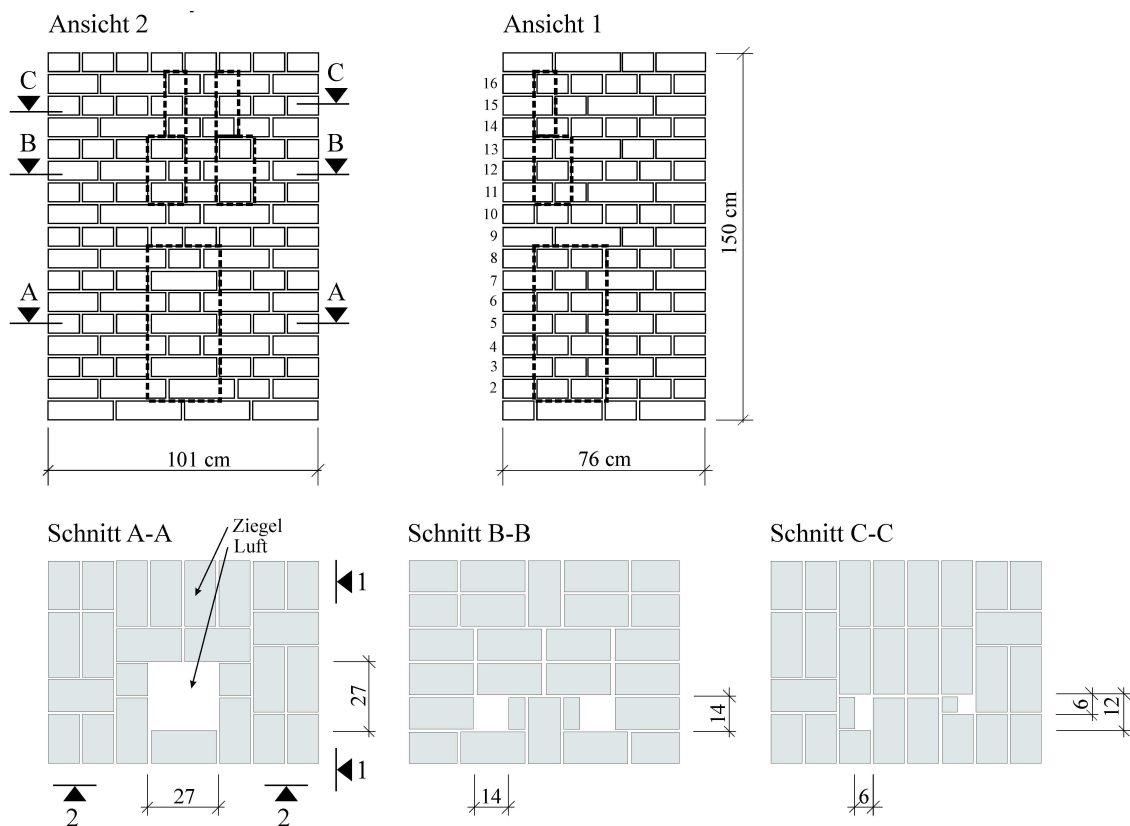


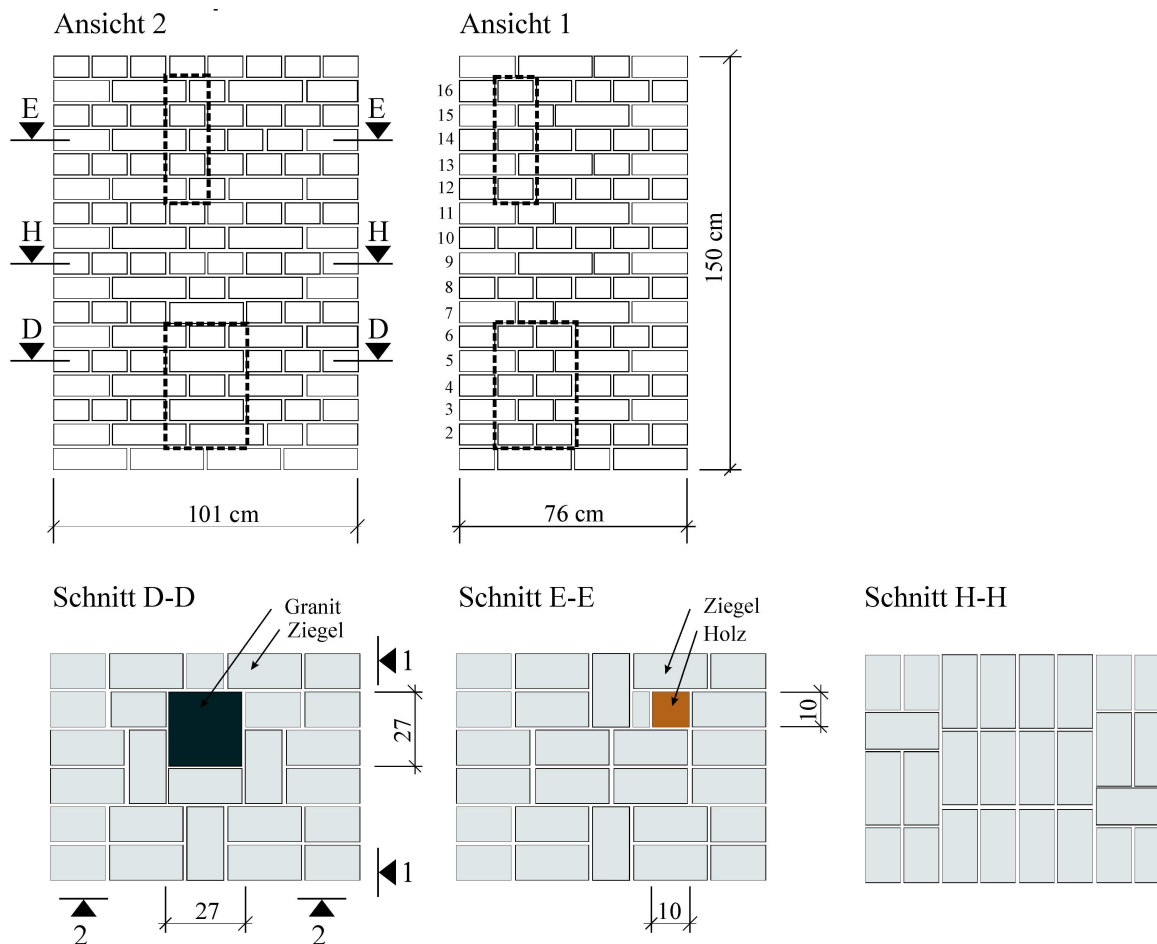
Abbildung 8.4: “Asterix I“, Ansicht 1 und 2 sowie Schnitte A-A, B-B und C-C

Im Inneren von “*Asterix I*“ (Abb. 8.4) befinden sich Hohlstellen in 4 verschiedenen Größen, um die Grenzen der tomografischen Rekonstruierbarkeit mit Radar und Ultraschall zu ermitteln. Die Abmaße der größten Fehlstelle betragen  $27 \times 27 \times 62 \text{ cm}^3$ , die der Mittleren  $14 \times 14 \times 28 \text{ cm}^3$  und die der Kleinsten  $6$  bzw.  $12 \times 6 \times 28 \text{ cm}^3$ .

“*Asterix II*“ (Abb. 8.5) enthält einen homogenen Bereich, eine Ebene, in dem sich

## 8. Beschreibung der Untersuchungsobjekte

ein Granitblock mit den Maßen  $25 \times 25 \times 60 \text{ cm}^3$  befindet sowie eine Ebene mit einer Holzstütze von  $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$ .



**Abbildung 8.5:** "Asterix II", Ansicht 1 und 2 sowie Schnitte D-D, E-E und H-H mit Lage und Größe der Inhomogenitäten

Der Vergleich der Ergebnisse von "W2" und "Asterix I" gibt Aufschluss über den Informationsverlust zwischen einer zweiseitigen und einer umlaufenden Messanordnung.

### 8.3.2. Altes Museum

Als nächster Schritt wurden Untersuchungen an einem realen historischen Gebäude durchgeführt. Das Alte Museum im Berliner Stadtzentrum wurde von Karl Friedrich Schinkel entworfen und zwischen 1823 und 1830 auf dem Lustgarten errichtet. Abb. 8.6 zeigt die Ansicht vom Lustgarten aus. Das Gebäude wurde mit einem säulengetragenen

Atrium und einer zentralen Kuppel, die dem römischen Pantheon gleicht, nach dem Vorbild antiker Tempel konzipiert. Es ist die älteste Ausstellungshalle Berlins. Im zweiten Weltkrieg brannten Teile des Gebäudes nieder. Der Wiederaufbau der zerstörten Gebäudeteile im Jahr 1966 wurde mit nur geringfügigen Änderungen an der historischen Struktur durchgeführt; die meisten Teile der historischen Konstruktion sind weitgehend erhalten. 1999 starteten die Planungen für einen großangelegten Umbau der gesamten Museumsinsel. Im Rahmen der Realisierung des Masterplanes zur Sanierung der Museumsinsel wird das Gebäude im Jahre 2008 einer Grundinstandsetzung unterzogen. Dazu mussten umfangreiche Untersuchungen durchgeführt werden, um die strukturelle Unversehrtheit der Bauwerke zu gewährleisten und gleichzeitig eine Basis für den nachhaltigen und beträchtlichen Umbau des Museums zu bilden. Das Alte Museum war zu allen Zeiten für die Bauforschung von großem Interesse. Archivstudien der Technischen Universität Berlin lieferten Informationen über die Struktur des Gebäudes, die für die Untersuchungen im Europäischen Forschungsprojekt ONSITEFORMASONRY von großer Wichtigkeit sind.



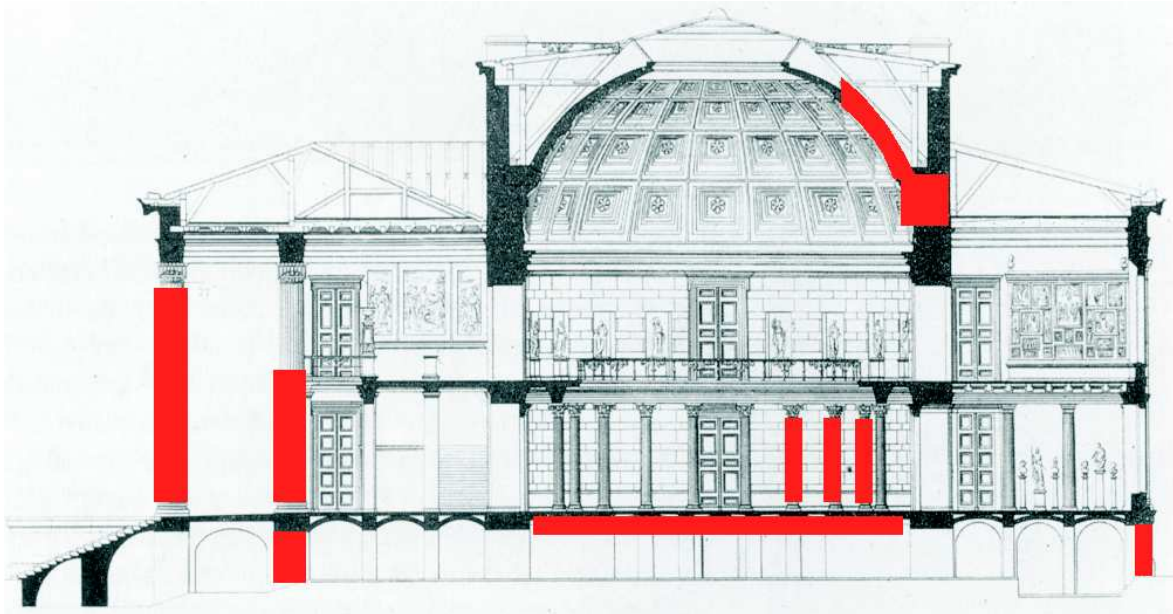
**Abbildung 8.6:** Ansicht des Alten Museums mit Angabe der untersuchten Sandsteinsäule

Trotz der guten Dokumentationsunterlagen konnten nicht alle Fragen allein durch diese Quellen eindeutig geklärt werden. Daher wurden systematische Messungen mit Radar, Impuls-Thermografie, Ultraschall, Mikroseismik und Geoelektrik durchgeführt (siehe Abb.8.7). An einer ausgewählten Säule des Atriums sollten Fragen bezüglich der

## 8. Beschreibung der Untersuchungsobjekte

---

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 mit Radar und Ultraschall zu untersuchen. Des Weiteren wurden die Säulen im 2. Weltkrieg durch Einschüsse beschädigt. 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.



**Abbildung 8.7:** Schnitt des Altes Museums mit der Darstellung aller untersuchten Konstruktionselemente