

# Neuer Ansatz zur Tomographie mit Ultraschall

Wolf KLEINERT\*, Stephan FALTER\*, Albrecht MAURER\*

\* GE Sensing & Inspection Technologies GmbH

Robert-Bosch-Str. 3

50354 Hürth

<mailto:wolf.kleinert@ge.com>

**Kurzfassung.** Mit einem rotierenden, stark elliptischen Schallfeld wurden Ultraschalldaten erfasst und einer tomographischen Rekonstruktion unterzogen. Das elliptische Schallfeld wurde durch einen in 120 Kreissektoren eingeteilten senkrecht einschallenden Kreisschwinger (24 mm Durchmesser, 2 MHz) erzeugt. Für die Messungen wurden 2 Gruppen von 4 Elementen genutzt. Dabei liegen 4 Sektorelemente nebeneinander und die zweite Gruppe ist punktsymmetrisch zur ersten Gruppe bezogen auf den Mittelpunkt des Schwingers angeordnet. Durch gleichzeitiges, nicht phasenverschobenes Ansteuern dieser 8 Elemente entsteht ein stark elliptisch ausgeprägtes Schallfeld. Mittels eines elektronischen Scans wird nun diese Gruppen um jeweils ein Sektorelement verschoben. Dadurch entsteht insgesamt ein elliptisches rotierendes Schallfeld mit einer Winkelauflösung von 3 Grad. Dieses Verfahren wurde an dicht beieinander liegenden Reflektoren, die alle in der gleichen Tiefe liegen, getestet. An jeder Scanposition (Scan- und Indexauflösung: 1 mm) wurden 60 Amplitudenwerte aufgenommen, entsprechend einer Drehung des Schallfeldes um 180°. Diese Daten wurden dann einer tomographischen Rekonstruktion unterworfen, in diesem Beispiel unter Verwendung einer gefilterten Rückprojektion. Die gefilterte Rückprojektion stellt jeden der Reflektoren klar voneinander getrennt dar, während im normalen C-Bild die einzelnen Reflektoren nicht vollständig erkannt werden können. Damit wurde eine erheblich verbesserte laterale Auflösung erreicht. Werden anstelle von den oben genannten 60 Amplitudenwerte an jeder Scanposition 60 vollständige A-Bilder aufgenommen, kann die Rekonstruktion in Tiefenschichten erfolgen und zu einer 3D-Rekonstruktion zusammengefasst werden. Das hier beschriebene Verfahren kann auch auf die Anwendung mit Winkelprüfköpfen übertragen werden. Darüber hinaus lässt sich durch eine parallele Datenaufnahme die Verarbeitungsgeschwindigkeit erhöhen.

## Einführung

Ultraschall-Tomographie wird bisher meistens an rotationssymmetrischen Bauteilen angewandt, bei denen ein Prüfkopf um das zu prüfende Bauteil herumgeführt wird. Dabei werden die Ultraschalldaten in Durchschallung oder auch in Impuls-Echo-Technik aufgenommen. Die gewonnenen Ultraschalldaten werden dann einer tomographischen Rekonstruktion unterworfen. Wird der Prüfkopf in mehreren Ebenen um das Bauteil geführt, lässt sich eine 3-dimensionale Rekonstruktion erzeugen. Die Abbildung 1 stellt die beschriebene Vorgehensweise schematisch dar.



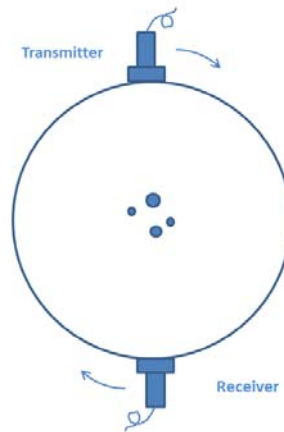


Abbildung 1: Tomographie rotationssymmetrischer Bauteile

## 1. Ultraschall-Tomographie

### 1.1 Auflösungsvermögen der klassischen UT-Prüfung

Bei der klassischen Ultraschall-Prüfung werden nur reduzierte Informationen erhalten, da als Ergebnis lediglich eine integrale Wechselwirkung zwischen Prüfkopf und Prüfteil zu erhalten ist. Wird z. B. ein kleiner Reflektor (kleiner als das Schallbündel) vermessen, ist das Ergebnis nicht eine Abbildung des Reflektors, sondern eine Abbildung des Schallbündels. Liegen mehrere kleine Reflektoren dicht beieinander, können diese in der Regel nicht voneinander getrennt dargestellt werden.

### 1.2 Grundlagen der klassischen Basismessung zur Tomographie

Die Quelle/Detektor-Einheit wird senkrecht zur Prüfachse bewegt und das laterale Schwächungsprofil wird aufgenommen. Diese Aufnahme wird für verschiedenen Winkel  $\theta$  wiederholt (siehe Abbildung 2). Auf diese Weise kann die über den Querschnitt verlorengewangene Information zurückgewonnen werden. Alle Schwächungsprofile werden zur Rekonstruktionsmatrix zusammengefasst. Diese wird dann durch eine geeignete Transformation (z. B. Radon-Transformation) mathematisch eindeutig in die tatsächliche, zwei-dimensionale Querschnittsinformation im Ortsraum überführt. Bei Aufnahme mehrerer Schichten führt die schichtweise Rekonstruktion zu einer drei-dimensionalen Darstellung des geprüften Volumens.

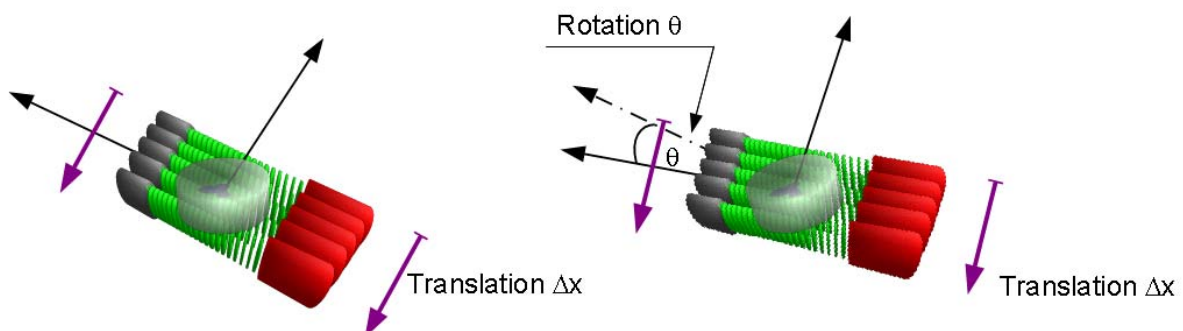
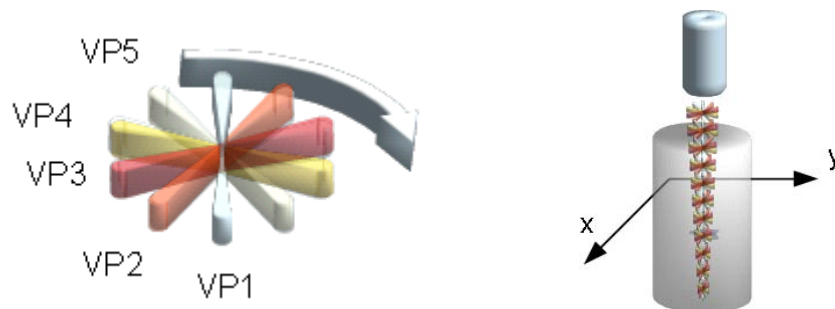


Abbildung 2: Grundlagen der Tomographie

Bei der klassischen Ultraschallprüfung werden C-Bilder durch einen XY-Scan aus Blendeninformationen relevanter Auswertebereiche erzeugt. Durch die Blendenauswertung und die Schallbündelausdehnung (abhängig von Frequenz, Schwingergröße und Material des Prüfstücks) entstehen Informationsverluste. Aus diesem Grunde lassen sich in vielen Fällen kleinere Fehlerfelder nicht mehr auflösen.

### 1.3 Neuer Ansatz - Simulation

Um die Einschränkung auf rotationssymmetrische Prüfteile aufzuheben, wurde ein neuer Ansatz gewählt. Zur Nutzarmachung der Rekonstruktionsalgorithmen wird die Translationsbewegung durch einen klassischen XY-Scan realisiert und die notwendige Rotationsbedingung durch ein rotierendes, stark elliptisches Ultraschallfeld gewährleistet. Das rotierende Ultraschallfeld wird durch einen geeigneten Phased-Array-Prüfkopf erzeugt.



Zunächst wurde das Verfahren durch mathematische Simulation auf Realisierbarkeit hin überprüft. Dazu werden an jeder Prüfposition im XY-Scan Daten mit einem stark elliptischen Schallfeld, das um die akustische Achse rotiert, berechnet. Im ersten Schritt wurde eine Matrix zur Reflektorbeschreibung erstellt. Diese Matrix enthält nur an den Stellen, an denen ein Reflektor simuliert werden soll, den Wert 1, sonst den Wert 0. Außerdem wurde das Schallfeld eines entsprechenden Prüfkopfes in gegebener Tiefe berechnet. Aus diesen beiden Datenfeldern wurde ein klassisches C-Bild berechnet (Abbildung 3), um später den Vergleich mit der tomographischen Rekonstruktion zu ermöglichen.

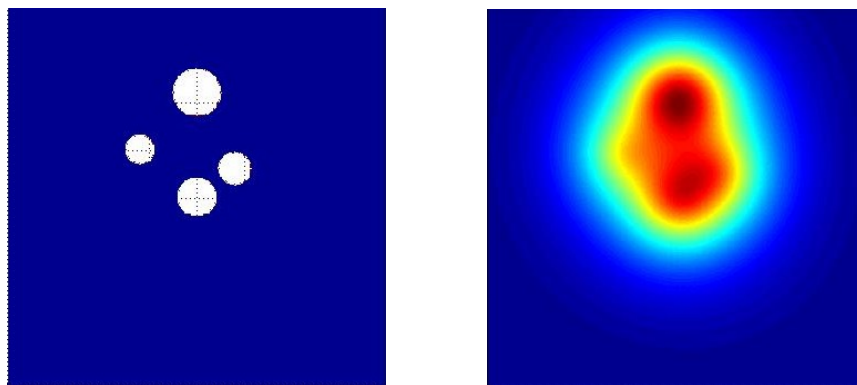
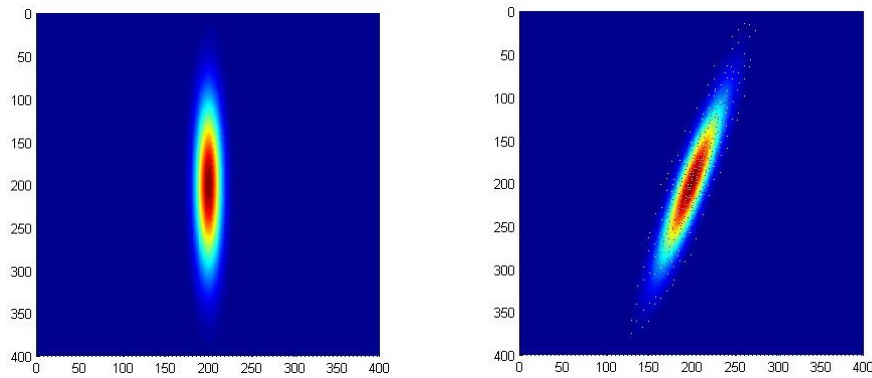


Abbildung 3: Reflektor-Beschreibungsmatrix und resultierendes C-Bild

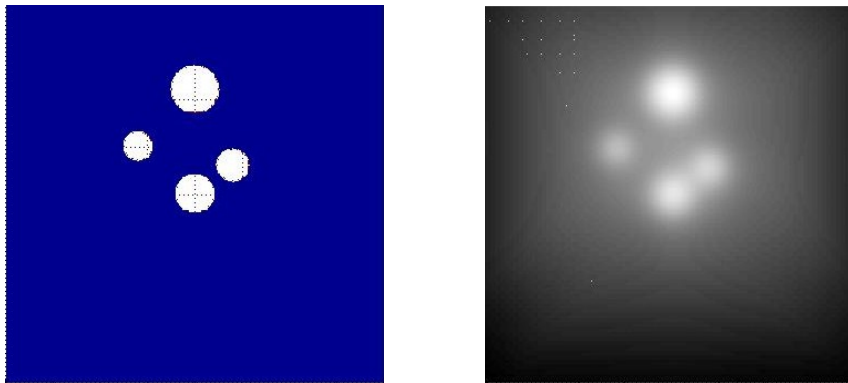
In einem zweiten Schritt wurden die stark elliptischen Schallfelder simuliert (Abbildung 4) und zusätzlich der XY-Scan. Dabei wurde an jeder Scanposition das elliptische Schallfeld mit einer Auflösung von  $3^\circ$  gedreht, so dass an jeder Scanposition 60 Amplitudenwerte ermittelt wurden.



**Abbildung 4: Elliptisches Schallfeld bei 0°- und 20°-Rotation**

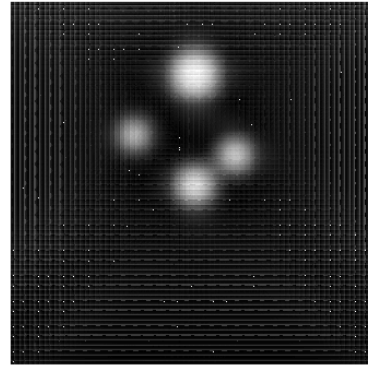
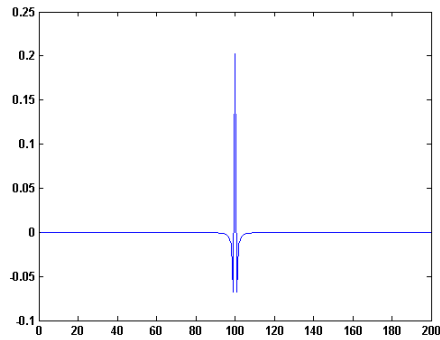
#### 1.4 Rückprojektion (Back Projection)

Zur Rekonstruktion wurde die Rückprojektion gewählt, um große Rechenzeiten für komplexere Rekonstruktionsverfahren zu vermeiden. Zunächst wird für das zu rekonstruierende C-Bild eine entsprechende Matrix, die nur den Wert 0 enthält, festgelegt. Für jede Prüfposition wird eine weitere kleinere, diesmal quadratische Matrix, die die zu rekonstruierenden Pixel enthält, dargestellt. Für jeden Pixel dieser Matrix wird der Winkel zum Mittelpunkt der Matrix ermittelt. Für jeden Winkel wird die entsprechende Amplitudeninformation aus den 60 Messwerten an dieser Scan-Position durch Interpolation berechnet und in die jeweiligen Felder der Matrix eingetragen. Die sich ergebende Matrix wird auf die zu Grunde liegende C-Bild-Matrix aufaddiert. Nun wird die nächste Scanposition ausgewertet und die entstehende Matrix positionsgenau auf die C-Bild-Matrix aufaddiert. Diese Schritte werden für alle Prüfpositionen durchgeführt. Die resultierende C-Scan-Rekonstruktionsmatrix ist in Abbildung 5 im Vergleich mit der Reflektorbeschreibungsmatrix dargestellt.



**Abbildung 5: Reflektorbeschreibungsmatrix und Ergebnis der Rückprojektion**

Zur Verbesserung der Rekonstruktion wurde ein kantenverschärfender Shepp-Logan-Filter eingesetzt. Um das in der Simulation unterlegte Rauschen zu unterdrücken, wurde zusätzlich ein Butter-Worth-Filter angewandt. Das Ergebnis der gefilterten Rückprojektion ist in Abbildung 6 dargestellt.

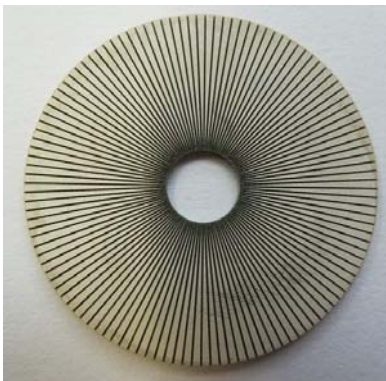


**Abbildung 6: Filterkern (Shepp-Logan) und gefilterte Rückprojektion**

## 2. Messungen

### 2.1 Prüfkopfaufbau

Nach erfolgreicher Simulation wurde ein Prüfkopf aufgebaut. Es wurde ein Kreiswandler von 24 mm mit einer Frequenz von 2 MHz gewählt, der in 120 Segmente (Tortenstücke) eingeteilt wurde (siehe Abbildung 7).



**Abbildung 7: Segmentierter Wandler und fertiger Prüfkopf**

### 2.2 Messwerte-Aufnahme

Die Messungen wurden in Tauchtechnik durchgeführt (Scan- und Indexauflösung 1 mm). Als Teststück wurde ein Stahlkörper mit 6 dicht beieinander liegenden Flachbodenbohrungen von 0,5 bis 3 mm Durchmesser herangezogen. Die Wasservorlaufänge wurde so gewählt, dass die Messungen kurz hinter dem Nahfeldende durchgeführt wurden. Abbildung 8 zeigt den verwendeten Testkörper.

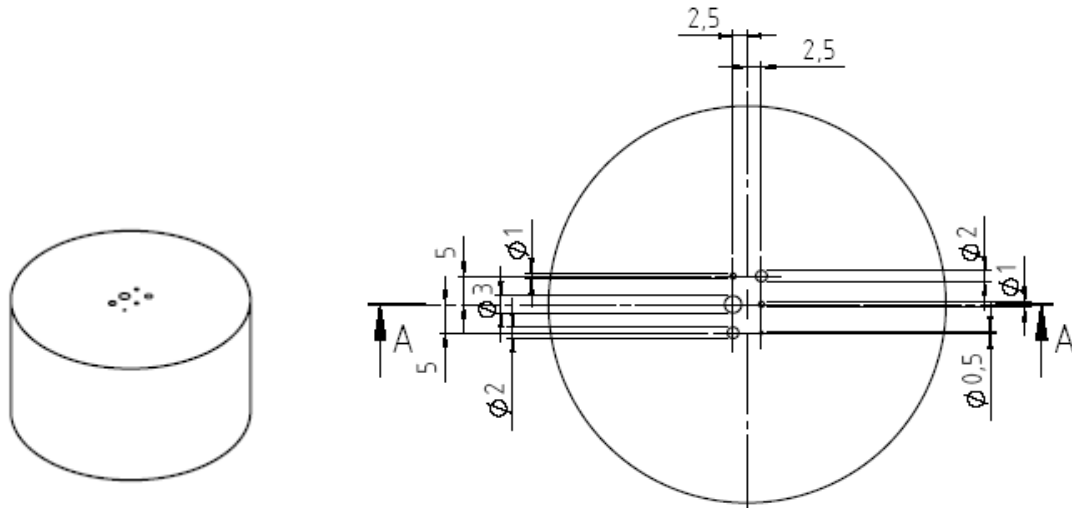


Abbildung 8: Verwendeter Testkörper

### 2.3 C-Scan als Basismessung

Um einen Vergleich des neuen Ansatzes zur Tomographie mit der herkömmlichen C-Bild-Aufnahme zu erhalten, wurde zunächst ein XY-Scan mit allen Elementen durchgeführt (Sende- und Empfangsapertur: alle 120 Elemente). Abbildung 9 zeigt das Ergebnis dieser Datenaufnahme im Vergleich zum verwendeten Testkörper.

Eine Auflösung der einzelnen Flachbodenbohrungen ist nicht gegeben.

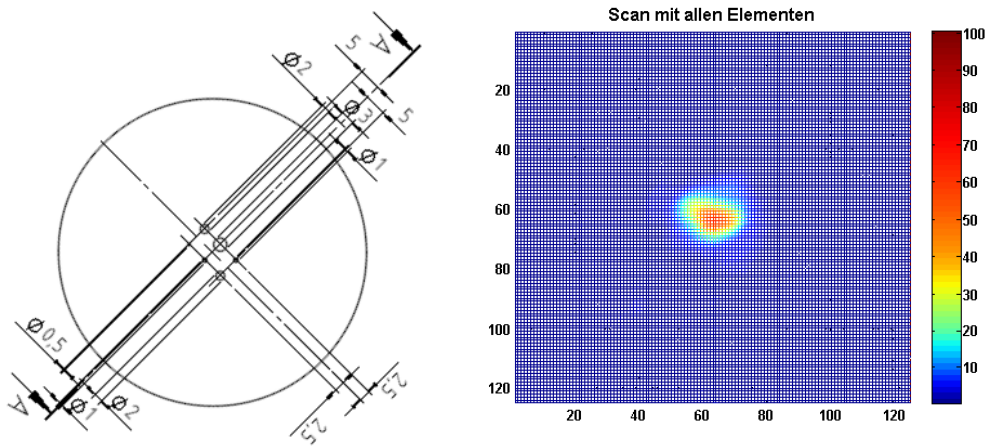
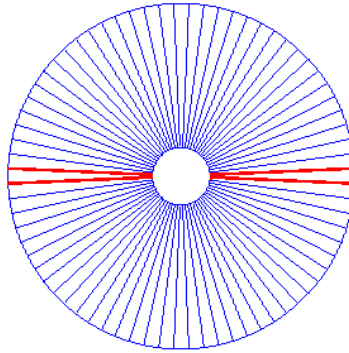


Abbildung 9: Testkörper und C-Scan mit allen 120 Elementen

### 2.4 Verwendete Aperturen

Zur Erzeugung des elliptischen Schallfeldes wurden jeweils gegenüberliegende Gruppen von Segmenten benutzt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel, bei dem nur je ein Element für eine solche Gruppe verwendet wurde.



**Abbildung 10: Beispiel einer Wandlergruppe mit zwei gegenüberliegenden Elementen**

Es wurden Versuche mit verschiedenen Aperturen vorgenommen. Zunächst wurden die beschriebenen Aperturen sowohl im Sendefall als auch im Empfangsfall benutzt. In einem weiteren Schritt wurden im Sendefall alle 120 Elemente verwendet und die Anzahl der Elemente für die Gruppen der Empfangsapertur wurden variiert. Aufgrund des limitierten Platzes werden hier nur die Ergebnisse mit folgenden Aperturen dargestellt:

- Sendeapertur: alle 120 Elemente
- Empfangsapertur: gegenüberliegende Gruppen von je zwei Elementen

Durch die Verwendung aller 120 Elemente im Sendefall wird mehr Ultraschallenergie in den Testkörper übertragen.

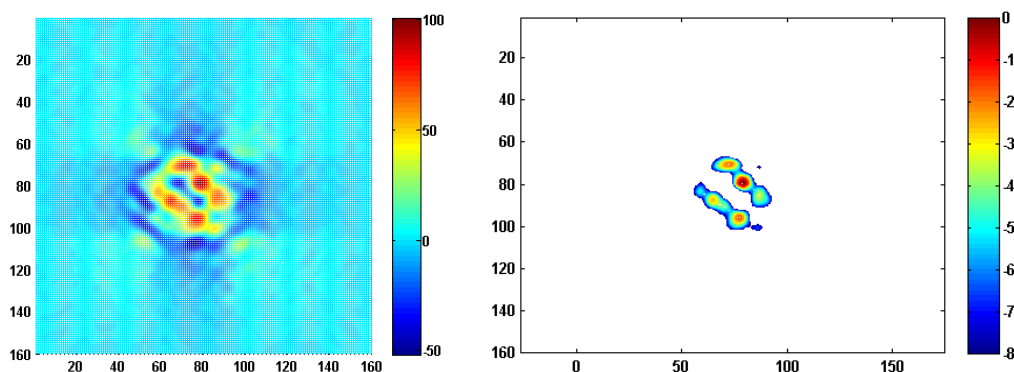
### 3. Auswertung

#### 3.1 Datenaufnahme

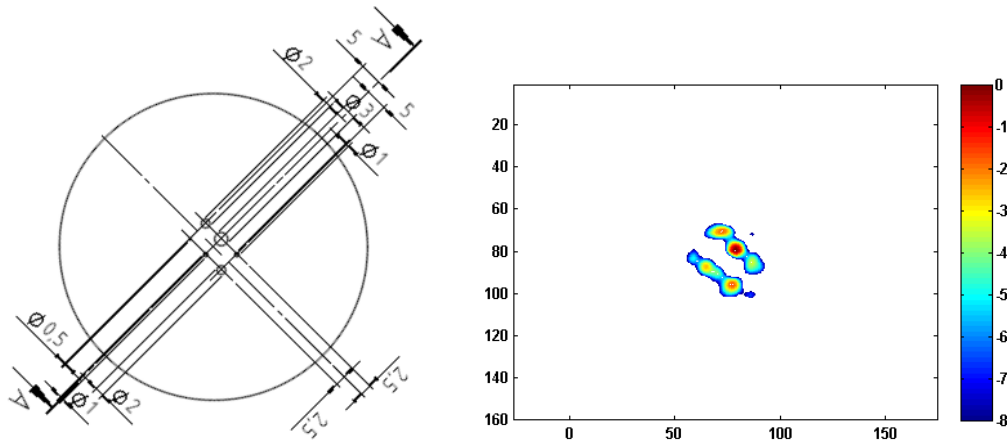
Wie beschrieben wurde auch hier ein XY-Scan mit Scan- und Indexauflösung von 1 mm durchgeführt (Sendeapertur: 120 Elemente, Empfangsapertur: Gruppen von je zwei Elementen).

#### 3.2 Gefilterte Rückprojektion der Messwerte

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis der beschriebenen gefilterten Rückprojektion, einmal mit allen Werten und einmal als Konturdarstellung (0 bis -8 dB in 0,1 dB-Schritten).



**Abbildung 11: Ergebnis der gefilterten Rückprojektion**



**Figure 13: Vergleich: Testkörper-Rückprojektion**

Selbst die kleinste Flachbodenbohrung ( $D = 0,5$  mm) kann mit dem verwendeten 2 MHz-Prüfkopf noch aufgelöst werden ( $D/\lambda = 0,17$ ). Außerdem werden alle sechs Reflektoren einzeln dargestellt.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Validierung des Verfahrens wurden nur Reflektoren in der gleichen Tiefe benutzt, um das Datenvolumen klein zu halten (nur die Maximalamplitude wurde für jeden Drehwinkel des Schallfeldes übertragen). Wird das gesamte A-Bild übertragen, kann die Rekonstruktion in mehreren Tiefenschichten durchgeführt werden und so einem 3D-Rendering zugeführt werden.

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Vorteile des hier beschriebenen und zum Patent angemeldeten Verfahrens:

- Ultraschalltomographie führt zu einer erheblich verbesserten Auflösung
- Erweiterbar auf andere Arraytypen
- Verfeinerung der Implementation zur Unterdrückung von Artefakten
- Komplexere Rekonstruktionsverfahren vorhanden, Verbesserungspotential
- Implementierung als Zusatzalgorithmus in C-Scan-Programmen (off-line)
- Implementierung als C-Scan-Filter in Hardware

#### Referenz

Röntgen Computertomographie (CT), Hounsfield, 1969

Quelle: <http://epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnertz/CT1.pdf>