

# Ultraschallsimulation für die Ultraschall-Computertomographie

Marc Weber, Nicole V. Ruiter, Gregor Schwarzenberg, Michael Zapf  
und Tim O. Müller

Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik,  
Forschungszentrum Karlsruhe, 76131 Karlsruhe  
Email: marc-weber@gmx.net

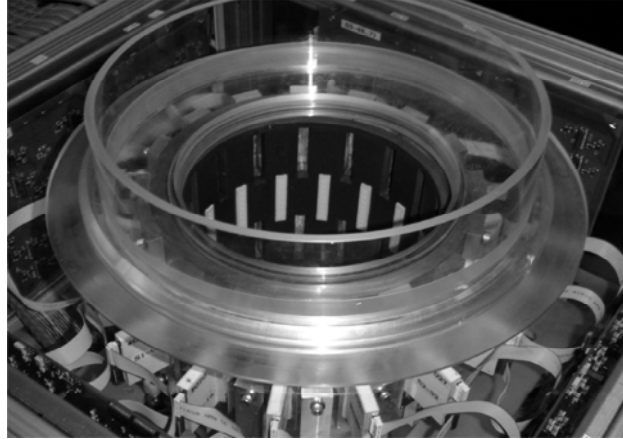
**Zusammenfassung.** Am Forschungszentrum Karlsruhe wird ein neuer Ultraschall-Computertomograph (USCT) entwickelt, welcher die Brustkrebsdiagnose entscheidend verbessern soll. Zielsetzung ist die Optimierung des Verfahrens und des Rekonstruktionsalgorithmus ohne Hardwareänderung und durch kontrollierbare Experimente ohne Phantomaufbau. Voraussetzung dafür ist die hinreichende Übereinstimmung der Simulation mit dem realen Experiment. Unter Verwendung von Wave3000, einer kommerziellen Software zur Ultraschallsimulation, wurde in Kombination mit einem Interface die Möglichkeit geschaffen die Schallausbreitung und die Interaktion mit Gewebe in der USCT-Geometrie nachzubilden. Vergleiche von Experiment und Simulation ergaben eine hohe Übereinstimmung und auch Bildrekonstruktionen lieferten viel versprechende Ergebnisse.

## 1 Einleitung

Der sich in der Entwicklung befindende Ultraschall-Computertomograph (USCT) steht momentan als Testaufbau zur Verfügung. Dieser Aufbau bietet 1/3 des geplanten Sensorausbaus, der sich auf 2304 Sender und 9216 Empfänger beläuft. Die Sensoren sind auf Transducer-Array-Systemen (TAS) in einem Zylinder angeordnet, der mit Wasser als Koppelmedium gefüllt ist (Abb. 1). Jeder TAS enthält 32 Empfänger und 8 Sender, wobei der Zylinder für sechs weitere Aufnahmepositionen durch einen Schrittmotor gedreht werden kann.

Um die Entwicklung des USCT zu unterstützen, sollte die Simulation der Schallausbreitung in dieser komplexen Geometrie ermöglicht werden. Für diese Aufgabe kamen nur sehr wenige Programme in Frage, da die meisten, wie Field II von J.A. Jensen [1], die Interaktion des Schalls mit komplexen Objekten (z.B. Brust) nicht simulieren können. Mit Wave3000 stellt die Firma Cyberlogic Inc. ein adäquates Programm zur Verfügung [2]. Komplexe Objekte können als Volumenbilder eingelesen werden und den Voxeln über Lamé-Konstanten die gewünschten Materialeigenschaften zugewiesen werden. Die Schallausbreitung wird mit einer Finite-Differenzen-Methode berechnet. Über diese wird die

**Abb. 1.** Testaufbau des Ultraschall-Computertomographen [4]: Die Abbildung zeigt die um den Zylinder angeordneten Transducer-Array-Systeme.



Ableitung der Wellengleichung an einer finiten Zahl von Gitterzellen im zu simulierenden Volumen über Differenzen approximiert und die Differentialgleichung in eine Differenzengleichung überführt [3].

Da die komplexe Geometrie des USCT wegen der umständlichen Bedienung und Beschränkung der Wandlerzahl nicht direkt mit Wave3000 simuliert werden konnte, musste ein Interface erstellt werden, welches die vorhandenen Geometriedaten in kompatible Simulationen überführt. Die Simulationsergebnisse wurden in der Form der experimentellen Daten gespeichert, um eine direkte Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Um die Simulationengenauigkeit zu evaluieren wurden Vergleiche von realen Experimenten und Simulationen durchgeführt. Zusätzlich wurden auch künstliche Phantome simuliert und mit der verwendeten Bildrekonstruktion abgebildet.

## 2 Methoden

Über das erstellte Interface wird die große Zahl der Sender und Empfänger Kombinationen in Einzelsimulationen zu je einem Sender und max. 64 Empfängern zerlegt. Dazu werden die Geometriedaten der Wandler eingelesen und je eine Simulationsdatei im von Wave3000 verwendeten Dateiformat geschrieben. Die Ergebnisse jeder Einzelsimulation werden in einer vorgegebenen Verzeichnisstruktur hinterlegt. Durch die sequentielle Ausführung der generierten Einzelsimulationen liegt am Ende der Gesamtsimulation ein kompletter Datensatz vor.

Wegen eines Speicherbedarfs von ca. 1,6 GB (2 GB RAM) für die Simulation eines Volumens von nur  $17 \text{ mm}^3$  bei einer Mittelfrequenz des Ultraschallpulses von 3 MHz, konnte nur ein Bruchteil der Geometrie in Originalgröße simuliert werden. Aus diesem Grund wurden die Simulationen in zwei Typen eingeteilt.

Entweder wurde die Geometrie skaliert (Faktor 0,1) oder es wurde nur ein Ausschnitt der Geometrie in Originalgröße simuliert. Für die Evaluierung wurden folgende Experimente durchgeführt:

**Hydrophonmessung.** Eine Hydrophonmessung sollte im Vergleich mit der Simulation die möglichst genaue Nachbildung der Wandlercharakteristik sicherstellen. Dazu wurde ein Puls von einem Ultraschallwandler gesendet und äquidistant an verschiedenen Positionen aufgezeichnet. Dieses reale Experiment wurde durch die Simulation nachgebildet und die Abweichung der Empfangssignale, sowie die Positionen der Maxima in der Amplitudenverteilung über die vorhandenen Empfangspositionen ausgewertet. Der Aufbau des Experiments ist in Abb. 2 (a) zu sehen.

**Eisenkugel.** Mit dem Vergleich von realem Experiment und Simulation der Abbildung einer Eisenkugel sollte die korrekte Modellierung der Interaktion des Ultraschallsignals mit Objekten überprüft werden. Die Eisenkugel wurde zunächst im USCT-Testaufbau vermessen und die Position aus einer Bildrekonstruktion bestimmt. Mit der bekannten Positionierung wurde eine Simulation mit gleichem Aufbau nachgebildet, welche auf eine Volumenhöhe von 0,5 mm beschränkt war, was jedoch keine Auswirkung auf die Empfangssignale hatte. Gemessen wurden die Laufzeiten des ausgesendeten Ultraschallpulses bei der Reflexion an der Kugeloberfläche.

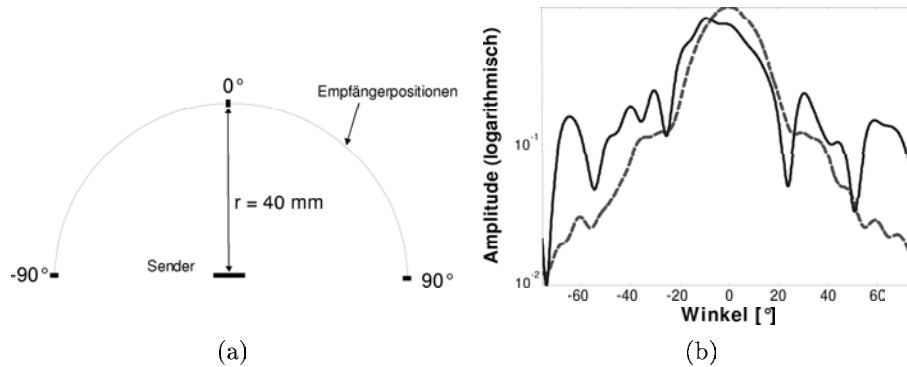
**Nylonfaden-Phantom.** Nach den Vergleichen von realen Experimenten und Simulationen wurde ein Phantom simuliert um die Sensitivität des Rekonstruktionsalgorithmus zu testen, der auf der Reflexionstomographie mit synthetischer Apertur basiert. Für diesen Zweck wurden fünf Nylonfäden verschiedener Durchmesser in die USCT-Geometrie eingebracht (0,2mm, 0,1mm und 0,05 mm, entspricht  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{1}{5}$  und  $\frac{1}{10}$  der Wellenlänge). Aufgenommen wurde in einer Schicht von 2 mm Höhe mit 55 Sendepositionen, sowie 128 Empfangspositionen (Abb. 3 (a) zeigt den Versuchsaufbau mit durchnummerierten Nylonfäden. Im rekonstruierten Bild wurde die Pulsbreite der Maxima bei -6 dB ("full width half maximum") bestimmt.

### 3 Ergebnisse

Der Vergleich der Hydrophonmessung konnte mit einer guten Nachbildung der Realität überzeugen. Die empfangenen Pulsformen waren nahezu identisch, wobei das kurze Nachschwingen der realen Wandler unter idealisierten Bedingungen der Simulation nicht auftrat. Die Abweichung der Maximapositionen in der Amplitudenverteilung war mit maximal  $4^\circ$  und damit 7% zufriedenstellend (Abb. 2 (b)), da die Hydrophonmessung ebenfalls fehlerbehaftet war. Die Simulation hatte eine Laufzeit von ca. 3h (Pentium IV 3,2 GHz).

Die Ergebnisse der Eisenkugelsimulation zeigen, dass die Simulation die Interaktion mit Objekten sehr gut modellieren kann. Bei der Messung der Laufzeiten zu den Empfängern wurde eine mittlere Abweichung von  $0,38 \mu\text{s} \pm 0,24$

**Abb. 2.** Simulationsaufbau und Ergebnis Hydrophon: (a) Aufbau des Hydrophonexperiments. Empfänger sind auf dem Halbkreis in  $40\text{ mm}$  Abstand angeordnet. (b) Amplitudenverteilung Hydrophon – Simulation (gestrichelte Linie), Messung (durchgehende Linie).



$\mu\text{s}$ , was ungefähr vier Abtastpunkten bei benutzter Abtastrate von  $10\text{ MHz}$  entspricht. Die Abweichung wurde durch die Unsicherheit bei der Positionsbestimmung der Eisenkugel und der Detektion des Pulsbeginns in den Signalen hervorgerufen. Ansonsten können alle Effekte der Realität, wie die auf direktem Weg übertragenen Transmissionssignale, in der Simulation beobachtet werden. Da das Volumen bei dieser Simulation relativ groß gewählt wurde, betrug die Laufzeit ca.  $8\text{ h}$ .

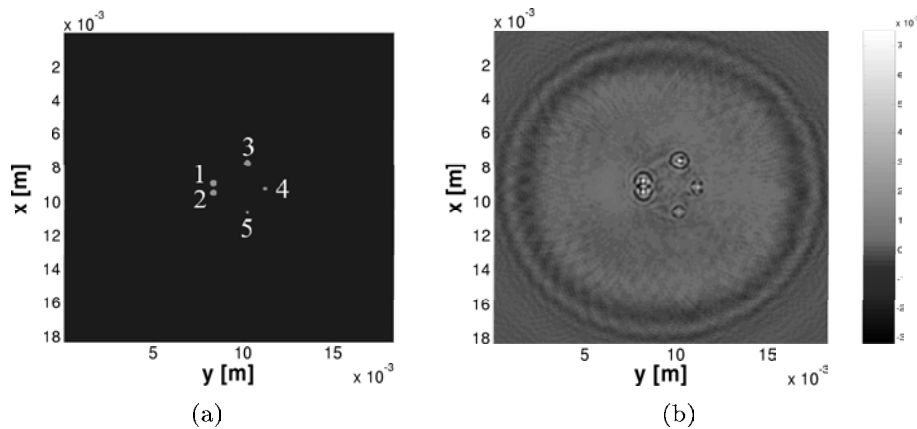
Das letzte Experiment überzeugte, dass die Simulationsergebnisse zur direkten Weiterverarbeitung durch den Rekonstruktionsalgorithmus genutzt werden können. Die Rekonstruktion zeigte alle fünf Nylonfäden (Abb. 3 (b)) und so konnte selbst der kleinste Nylonfaden, dessen Durchmesser  $\frac{1}{10}$  der Wellenlänge entsprach, abgebildet werden. Bei der Auswertung der FWHM (“full width half maximum“) ergab sich eine Pulsbreite der Nylonfäden von ca.  $0,2\text{ mm}$ , die etwas kleiner als die halbe Wellenlänge ausfällt. Dadurch wurde gezeigt, dass die Sensitivität des Algorithmus ausreicht, um auch sehr kleine Objekte abzubilden. Es ist allerdings auch eine Auflösungsgrenze zu erkennen, da kleine Objekte die nahe zusammen liegen nicht mehr aufgelöst werden könnten. Dies soll in Zukunft durch die Weiterentwicklung des Rekonstruktionsalgorithmus verbessert werden.

Diese Simulation war die komplexeste und damit auch die mit der längsten Laufzeit. Das in  $110$  Einzelsimulationen aufgeteilte Experiment benötigte ca.  $190\text{ h}$ .

## 4 Diskussion

Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die entwickelte Simulation die Realität sehr gut nachbilden kann. Die Einschränkungen liegen dabei in der Laufzeit und dem Speicherbedarf der Simulation. Mit dem erstellten Interface

**Abb. 3.** Simulationsaufbau und Rekonstruktion Nylonfaden-Phantom: (a) Aufbau der Simulation. Materialien: Wasser, Nylonfäden (nummeriert). (b) Deconvolution-Bild der Rekonstruktion. Umschließender Kreis zeigt die Positionen der Wandler.



können nun komplexe Projekte in für Wave3000 compatible Simulationen umgewandelt und durchgeführt werden. Nicht nachgebildet werden konnten spezielle Strukturierungen der Wandleroberflächen. Auch Reflexionen des Schalls von Grenzflächen des Simulationsvolumens waren unerwünschte Nebeneffekte. Diese Einschränkungen erwiesen sich bei Kenntnis allerdings als beherrschbar.

Die Simulationsumgebung soll in Zukunft zur Optimierung der Ultraschall-Computertomographie eingesetzt werden. Wirkliche Verbesserungsmöglichkeiten müssen in weiteren Arbeiten mit der Simulation erforscht werden. Erhoffte Erkenntnisse liegen in der Untersuchung von Gewebemodellen in der Simulation und deren Abbildungseigenschaften durch den Rekonstruktionsalgorithmus. Zusätzlich können andere Anordnungen von Ultraschallwandlern simuliert werden, um eventuelle Vorteile anderer Geometrien zu untersuchen.

## Literaturverzeichnis

1. Jensen JA. <http://www.es.oersted.dtu.dk/staff/jaj/field/>. Developer of Field II.
2. Cyberlogic. <http://www.cyberlogic.org/>. Developers of Wave3000.
3. Delsanto PP, Schechter RS, Mignogna RB. Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials III: The three-dimensional case. *Wave Motion* 1997;26(4):329–339.
4. Ruiter NV, Zapf M, Stotzka R, Müller TO, Schlote-Holubek K, Göbel G, et al. First Images with a 3D-Prototype for Ultrasound Computer Tomography. In: *IEEE International Ultrasonics Symposium*; 2005.