

# Diagnose und Therapiekontrolle – Ein System zur Aufnahme, Verarbeitung und Visualisierung von registrierten Freihand-3D-Ultraschall-Daten

Holger Johannes Hewener<sup>1</sup>, Matthias Hoss<sup>1</sup>, Steffen H. Tretbar<sup>1</sup>,  
Christian G. Günther<sup>1</sup> und Robert M. Lemor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik,  
Ensheimer Str.48, 66386 St. Ingbert  
Email: Holger.Hewener@ibmt.fraunhofer.de

**Zusammenfassung.** Eine Therapiekontrolle wie die Überwachung der interstitiellen Thermotherapie kann mittels Ultraschall durchgeführt werden. Das therapeutische Ergebnis kann hierbei verbessert werden, indem während der Durchführung eine dreidimensionale computerbasierte Auswertung des Fortschritts vorgenommen wird. Mit diesem Gesamtsystem ist eine Ultrachallvolumenerfassung in Echtzeit möglich, die durch HF-Filterungsverfahren und verschiedenen Visualisierungen die Überwachung der Therapien ermöglicht.

## 1 Problemstellung

Die Ultraschallbildgebung ist in Diagnose und Therapieüberwachung als bildgebendes Verfahren stark verbreitet und bewährt. Mit Hilfe einer klassischen zweidimensionalen Darstellung ist jedoch eine Auswertung der Ultraschalldaten in Bezug auf Volumenbestimmung und Streckenbemaßung nur bedingt möglich. Distanzen über mehrere Schichtaufnahmen hinweg durch Schätzung zu bestimmen, basiert auf den Erfahrungswerten des Anwenders und erreicht nicht die Genauigkeit einer maschinellen Auswertung. Eine Aufnahme und die darauf folgende Verarbeitung von Volumendaten kann somit qualitative als auch quantitative Aussagen ermöglichen, die mit herkömmlicher zweidimensionaler Bildgebung nicht möglich sind, so dass die maschinelle Auswertung exaktere Diagnosen und Therapiekontrollen in vielen Bereichen der medizinischen Anwendung auf Basis der Ultraschallbildgebung zulässt. Ein Beispiel für eine solche Anwendung stellt die interstitielle Thermotherapie mit Hilfe von Laser- oder Hochfrequenzapplikatoren dar, bei der fokale Weichteiltumore und Metastasen behandelt werden. Zur Reduzierung der Strahlenbelastung durch eine Röntgenbildgebung und zur Online-Darstellung wird dabei mittlerweile oft die Ultraschallbildgebung zur Unterstützung der Punktion und zur Kontrolle des Therapiefortschritts verwendet [1, 2]. Der für die Überwachung einer Anwendung benötigte Untersuchungs- und Zeitaufwand ist im Vergleich zu tomographischen Methoden durch die Echtzeitfähigkeit der Ultraschallbildgebung entschieden besser. Die Überwachung der Thermotherapie mittels Ultraschall basiert

auf der Bestimmung der lokalen frequenzabhängigen Dämpfung des Gewebes, die sich während der Koagulation verändert. Die dreidimensionale Darstellung und Vermessung einer Veränderung der frequenzabhängigen Dämpfung lässt somit Rückschlüsse auf die Größe des bereits verödeten Gewebeareals zu. Hierdurch besitzt der Anwender die Möglichkeit, die Therapiedauer und -genauigkeit zu überwachen und zu beeinflussen. Auf diese Weise wird der Patient einer möglichst geringen Belastung ausgesetzt. Weitere Schädigungen von gesundem Gewebe im Umfeld können verhindert werden.

## 2 Stand der Forschung

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Aufnahme von Volumendaten in der Ultraschallbildgebung. Einer Möglichkeit liegt die Nutzung von Ultraschallwandlern zu Grunde, bei denen die Elemente in einer Matrix angeordnet sind und somit eine Schallausbreitung nicht nur auf eine Ebene beschränkt, sondern auch in Elevationsrichtung möglich ist. Somit kann ein pyramidenförmiges Volumen abgetastet werden. Diese Technik benötigt Ultraschallwandler mit ungefähr 3000 Elementen, was die Gesamtkosten eines Systems durch die kostenintensive Fertigung stark erhöht.

Um auch vorhandene Geräte und Ultraschallwandler für eine Aufnahme von Volumendaten zu nutzen, werden diese durch ein Trackingsystem erweitert, so dass Positionsdaten der einzelnen Schichtaufnahmen erfasst und somit einzelne Messwerte exakt im Raum lokalisiert werden können. Hierfür existieren verschiedene Verfahren, die sich vor allem in ihrer Flexibilität unterscheiden, wobei die Freihand-3D-Aufnahme, bei der ein Ultraschallwandler nicht mechanisch, sondern frei geführt werden kann, oft auf Basis eines Stereokamerasystems erfolgt. So kann die Position und die Lage eines "Rigid-Bodies", einer optisch gut detektierbaren und asymmetrisch aufgebauten Struktur, eindeutig bestimmt werden. Die Tracking-Strukturen werden an dem Ultraschallwandler fest fixiert. Ein Arbeitsvolumen von einem Kubikmeter kann mit einem solchen System erfasst werden, in diesem dann eine freie Führung des Wandlers während der Aufnahme möglich ist. Zusammen mit diesen Informationen ist eine Rekonstruktion der Ultraschallschichten zu einem Volumendatensatz möglich, der als Grundlage zur Verarbeitung und Visualisierung genutzt werden kann. Um aus der gemessenen Position des optischen Markers die Lage und Position der aufgenommenen Schicht zu berechnen, benötigt man die Korrektur des Rigid-Body-Koordinatensystems auf das Wandlerkoordinatensystem in Form einer Transformationsmatrix. Diese muss einmalig für jeden Ultraschallwandler mit Hilfe speziell entworfener Ultraschallfadenphantome erstellt werden [3, 4, 5]. Dort ist die räumliche Lage der Fäden im Phantom bekannt, so dass aus einem Ultraschallbild eindeutig von der Position der Fäden im Wandlerbild auf die Lage der Ultraschallschicht im Phantom geschlossen und somit die Transformation auf das "Rigid-Body"-Koordinatensystem transformiert werden kann.

### 3 Methoden

Die Hardwarebasis des Systems wird durch ein digitales Ultraschall-System (Di-PhAS) [6] gebildet, das mit Schallköpfen der Firmen Hewlett Packard, Edan Instruments Inc. und Vermont ausgestattet wurde. Das System erlaubt die digitale Übertragung der Ultraschallrohdaten in Echtzeit an einen PC mit einer Bildrate von ca. 25 Datensätzen pro Sekunde. Die Rohdaten werden im PC zu Amplitudendaten prozessiert, so dass eine hohe zeitliche und räumliche Genauigkeit der Abbildung gewährleistet ist. Zeitsynchron zur Erfassung der Ultraschallrohdaten werden mittels eines optischen Positionserfassungsgerätes („Polaris Accedo“, Northern Digital Instruments) die räumliche Lage und Ausrichtung des Ultraschallkopfes erfasst. Durch diese Kombination ist es möglich, bei Nutzung frei wählbarer Bildgeometrien (Curved, Sektor, Linear), pro Sekunde bis zu 25 dreidimensional registrierte Datensätze, bestehend aus Positionsdaten und Hochfrequenzmessdaten zur 2D-Visualisierung und 3D-Verarbeitung, durch Volumenrekonstruktion zu erzeugen. Die mittels Freihand-3D erfassten Daten liegen in unregelmäßiger Form vor, so dass diese beliebig positionierten Messpunkte in eine reguläre Volumenstruktur überführt werden. Hierfür wird ein Gitter gewählt, das die Grundlage für das Volumen bildet. Da Ultraschall mit herkömmlichen Wandlern eine höhere Auflösung parallel der Schallausbreitung besitzt als senkrecht zu dieser Ausbreitungsrichtung, wählt man ein reguläres Gitter mit höherer Auflösung in die Tiefe. Auf dieser Basis ist in den Aufnahmen eine Zellenvolumengröße von circa  $0,06 \text{ mm}^3$  möglich. Auf Basis der Gitterstruktur erhält man eine Volumenfunktion, die sich aus der Abbildung von Positionen auf mit 8 Bit diskretisierten Amplitudenwerten der Reflektionsstärken und einer Maskenfunktion zusammensetzt. Mit Hilfe der Maske ist es möglich, verschiedene zusätzliche Parameter pro Volumenelement zu speichern, so dass es unter anderem möglich ist, undefinierte Voxel (die den Grauwert Null besitzen) von Voxel mit dem Messwert Null zu unterscheiden.

Die Rekonstruktion des Volumens auf Basis der einzelnen Schichten basiert auf einer linienweisen Transformation der Ultraschallrohdaten in die Gitterstruktur. Jeder Messpunkt wird durch den Aufpunkt und Richtungsvektor seiner A-Scan-Linie und dem Abstand des Messpunktes vom Aufpunkt eindeutig bestimmt und in das passende Voxel des Volumens in Bezug zu einer Volumenreferenz eingefügt.

Da die Ultraschallschichten nicht ideal dünn sind, kann die Schallfeldform dieser Ebene berücksichtigt werden, wenn sie vermessen und somit bekannt ist. Kommt es bei der Rekonstruktion zu mehrfachem Auftreten von Messwerten für einen Voxel durch beispielsweise Mehrfachscans der gleichen oder ähnlichen Linie und aus unterschiedlichen Richtungen, so muss auf Basis der unterschiedlichen Messwerte ein Voxelamplitudenwert bestimmt werden. Hierbei kann eine Ersetzungsstrategie nur den zeitlich neuesten Messwert berücksichtigen, eine Kombination des erneuten Vorkommens mit den letzten Messwert durchführen oder das Amplitudenmaximum wählen.

Für die echtzeitfähige Aufnahme und Darstellung der Ultraschallvolumendaten wurde ein Framework in der Programmiersprache C++ nach ANSI-Standard

entwickelt, das aus den Teilbereichen Filterung, Visualisierung und Rekonstruktion besteht. Weiterhin wurden Applikationen zur Benutzung und für Testzwecke mit graphischer Benutzeroberfläche auf Basis von "Microsoft Visual C++" entwickelt, welche die Szenarien der Punktionshilfe und der Volumenerfassung und -auswertung umfassen. Für die Darstellung von Volumenrepräsentationen wird die OpenGL-Bibliothek genutzt. Der Systemaufbau besteht aus den Hauptkomponenten "DiPhAS-PC-System" zur Aufnahme der Ultraschallrohdaten (HF-Daten) [6], das einen frei programmierbaren Beamformer für codierte und invertierte Pulsformen bietet, dem Kamera-System zum optischen Tracking des Ultraschallwandlers und dem "3D-Ultraschall-PC-System" zum Empfang und zur Verarbeitung der Ultraschallamplitudendaten. Der Visualisierungsrechner kann auch mit dem DiPhAS-System zusammengefasst werden, wenn ausreichend Rechnergeschwindigkeit ( $>2$  GHz) vorhanden ist. Die Datenübertragung kann auf Basis des Netzwerkprotokolls TCP/IP erfolgen, was eine Verteilung der Teilaufgaben auf mehrere Rechner erlaubt.

## 4 Ergebnisse

Für die Visualisierungen von Volumendaten wurden indirekte Verfahren wie die Berechnung und Darstellung von Iso-Oberflächen und direkte Verfahren wie unterschiedliche Methoden des Volume-Rendering modifiziert und getestet. Eine Entscheidung bezüglich der Wahl einer für Ultraschalldaten adäquaten Volumenvisualisierungsmethode wurde daraufhin unter Betrachtung ihrer Effizienz und des Darstellungsvermögens gefällt. Diese Bewertung der Darstellungseffizienz wurde unter Rücksicht auf die Nutzung eines herkömmlichen PC-Systems vorgenommen, da durch Verzicht auf eine Grafik-Workstation ein kostengünstiges Gesamtsystem konzipiert werden kann. Es zeigte sich, dass nicht alle gängigen Volumenvisualisierungstechniken zur Darstellung von dreidimensionalen Ultraschallmessdaten geeignet sind. Die Berechnung einer Oberflächenvisualisierung mittels "Marching-Cubes" als indirektes Verfahren und die Nutzung der "Ray-Casting"-Technik zur Oberflächendetektion mit anschließender Schattierung auf Basis von Gradient und Tiefenlage als direktes Verfahren sind am Besten zur Darstellung starker Reflektionen in dreidimensionalen Ultraschalldaten geeignet. Gängige Visualisierungstechniken wie die in der NMR genutzten Visualisierung mittels Transferfunktionen und die aus dem Röntgen bekannte "Average-Intensity-Projection" sind für die Visualisierung medizinischer Ultraschalldaten kaum geeignet.

In der zweidimensionalen Ultraschallbildgebung treten Effekte auf, die zu Störungen in den erzeugten Messdaten führen. Diese Effekte wirken sich auch auf die Rekonstruktion eines 3D-Volumens aus. So übertragen sich Störungen wie Doppelreflektionen, Streuermuster durch zufällige Addition von vielen schwachen Reflektoren eines nicht komplett homogenen Gewebes, Schallschatten, distale Schallverstärkung, fehlende Darstellbarkeit von vertikalen Strukturen und die problematische Lokalisierung in der Tiefe auch auf die dreidimensionale Rekonstruktion.

Die Aufnahme der Volumendaten umfasst auch die Darstellung beliebig orientierter Schichten im Inneren des Datensatzes. Dies eröffnet dem Anwender somit die Möglichkeit, Ebenen zu betrachten, die durch eine herkömmliche 2D-Schichtaufnahme nicht einsichtig sind, da sich diese orthogonal zu der Ebene des Wandlerbildes befinden können. Das System ist als Forschungsplattform flexibel einsetzbar und erlaubt eine problemlose Anpassung auf spezielle Anwendungsgebiete wie beispielsweise die Thermotherapie. Die onlinefähige Datenaufnahme, Verarbeitung und Visualisierung der Volumendaten ist zusätzlich zu weiteren Werkzeugen wie einer mit 3D-Ultraschall unterstützten Punktionshilfe zur Verbesserung der Platzierung von Applikatoren durch eine gezielte visuelle Führung der Werkzeuge in dieses System integriert worden, um eine umfangreiche Komplettlösung für die Thermotherapie zu entwickeln. Das System wurde an Phantomen getestet und wird in einer klinischen Tierversuchsstudie zur Thermotherapie von fokalen Weichteiltumoren evaluiert.

## 5 Diskussion

Unser Hardwaresystem ermöglicht mit diesem Software-Konzept eine Aufnahme und Rekonstruktion von Ultraschallvolumendaten in Echtzeit durch die Aufnahme von über 30 Hochfrequenz-Datensätzen pro Sekunde mit zusätzlicher Onlinedarstellung des hierdurch erzeugten Volumens. Die Verarbeitung der gemessenen HF-Daten kann weiterhin durch unterschiedlichste Bildoptimierungs- und Segmentierungsfiler erfolgen. Das entwickelte 3D-Ultraschallsystem stellt für die Anwendungsgebiete der ultraschallunterstützten Punktion und Thermotherapiekontrolle eine günstige Alternative zu anderen bildgebenden Verfahren oder der Nutzung von Matrixschallköpfen in der dreidimensionalen Ultraschallbildung dar.

## Literaturverzeichnis

1. Hewener H, Hoss M, Tretbar SH, Lemor RM. 3-D Ultraschall Punktionshilfe zur Verbesserung der Applikatorführung bei der interstitiellen Hochfrequenz Therapie (HFITT). 38 Jahrestagung DGBMT (Ilmenau) 2004.
2. Lemor RM, Hoss M, Weiss EC, Schreiner S, Tretbar SH. Ultraschall-Kontrolle thermischer Tumor Therapien; 2002.
3. Amin DV, Kanade T, Jamaraz B, DiGioia AM, et al. Calibration Method for determining the physical location of the ultrasound image plane; 2001.
4. Blackall JM, Rueckert DCR, Maurer J. An image registration approach to automated calibration for freehand 3D ultrasound. vol. 1935; 2000. p. 462–471.
5. Rousseau F, Hellier P, Barillot C. A fully automatic calibration procedure for freehand 3d ultrasound; 2002.
6. Weber P, et al. A Phased Array System for the Acquisition of ultrasonic RF-Data up to 20 MHz. vol. 27; 2004. p. 25–33.