

Markus C. Hesse: Nichtlineare quantitative Rekonstruktion akustischer Materialparameter in der niederfrequenten 2D/3D Ultraschall-Reflexionstomographie

Ultraschallbasierte Abbildungsverfahren werden seit den 1950er Jahren routinemäßig in vielen medizinischen Fachgebieten zur morphologischen Untersuchung von Weichgewebe eingesetzt. Dabei wird mit dem in der klinischen Praxis häufig benutzten linearen B-Mode-Verfahren auf Basis eines vereinfachten Modells für die Ultraschallwellenausbreitung eine 2D Reflexionsverteilung des zu untersuchenden Gewebes rekonstruiert. Aufgrund von Modellfehlern in dem zugrunde liegenden Wellenausbreitungsmodell, bei welchem unter der Annahme einer linienförmigen Wellenausbreitung die Wellenausbreitungseffekte der Beugung, Brechung, Reflexion, Transmission, Streuung und Dämpfung nicht oder nur in vereinfachter Form berücksichtigt werden, ist die rekonstruierte Reflexionsverteilung lediglich qualitativ, und somit eine Beurteilung des Gewebes mittels bekannter Referenzwerte nicht möglich.

In der vorliegenden Arbeit werden die bekannten linearen analytischen Ultraschall-Rekonstruktionsverfahren der direkten Fourier-Inversion (DFI-Verfahren) und der gefilterten Rückpropagation (FBP-Verfahren) zur quantitativen Rekonstruktion der gemischten Materialparameterverteilung sowie die nach Natterer bekannten nichtlinearen iterativen Ultraschall-Rekonstruktionsverfahren auf Basis des Kaczmarz-Verfahrens zur simultanen quantitativen Rekonstruktion der Kompressibilität und Massendichte in verallgemeinerter Form für 2D/3D Anregungen des Mediums mit breitbandigen ebenen Wellen und breitbandigen Zylinder- bzw. Kugelwellen hergeleitet. Die Theorie der Verfahren basiert auf einer akustischen Wellengleichung für verlustfreie inhomogene Medien mit Kompressibilitäts- und Massendichteschwankungen, durch welche zum einen die Wellenausbreitungseffekte der Beugung, Brechung, Reflexion und Transmission bei den linearen Verfahren in Einfachstreuung und bei den nichtlinearen Verfahren in Mehrfachstreuung berücksichtigt werden, und zum anderen eine quantitative Rekonstruktion der modellierten akustischen Materialparameter durch Lösen eines nichtlinearen inversen Problems möglich ist. Dabei werden im Hinblick auf eine praxisorientierte Anwendbarkeit die Verfahren für 2D/3D Messdatenaufnahmen im Reflexionsmodus mit einem festen linearen bzw. planaren Ultraschallwandler-Array vorgestellt sowie zum besseren Verständnis der linearen und nichtlinearen Rekonstruktionstheorie zusätzlich Messdatenaufnahmen im Transmissionsmodus bei den linearen Verfahren untersucht.

Zur Validierung der vorgestellten Verfahren wurden für den praxisrelevanten Fall einer 2D Messdatenaufnahme im Reflexionsmodus mit breitbandigen ebenen Wellen und Zylinderwellen für verschiedene Fragestellungen numerische Rekonstruktionsexperimente mit einem gewebeimitierenden numerischen Brustphantom durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass mit den nichtlinearen Verfahren eine quantitative Rekonstruktion der Kompressibilität und Massendichte im Reflexionsmodus möglich ist. Ferner ergab sich, dass bei Medien mit Kompressibilitäts- und signifikanten Massendichteschwankungen zur Reduzierung von Rekonstruktionsartefakten und zur Verbesserung der Ortsauflösung die Massendichte mitrekonstruiert werden sollte. Des Weiteren stellte sich heraus, dass mit den nichtlinearen Verfahren auch unter Verwendung verrauschter Messdaten robuste Materialparameterrekonstruktionen berechnet werden können. Bei Rekonstruktionsexperimenten mit den DFI- und FBP-Verfahren sowie den zusätzlich benutzten praxiserprobten linearen analytischen DAS- und SAFT-Verfahren wurde unter Verwendung derselben Messdatensätze aufgezeigt, dass entsprechend der bekannten linearen Rekonstruktionstheorie mit den linearen Verfahren lediglich qualitative Rekonstruktionen der gemischten Materialparameterverteilung und der Reflexionsverteilung im Reflexionsmodus berechnet werden können. Zudem konnte numerisch validiert werden, dass in der Vielzahl der untersuchten Fälle das Auflösungsvermögen der nichtlinearen Verfahren besser ist als das Auflösungsvermögen der linearen Verfahren.