

Photoakustische Bildgebung in akustisch heterogenen Medien

Atherosklerose und die damit verbundenen Folgeschäden gelten als eine der häufigsten Todesursachen in der westlichen Welt. Für die Charakterisierung von atherosklerotischen Plaques gilt die photoakustische Bildgebung als vielversprechendes Verfahren, da sie es ermöglicht, optische Absorptionsspektren in großer Gewebstiefe aufzunehmen. Allerdings erschweren dabei Bildartefakte, die ihre Ursache in akustischer Streuung haben, die Diagnose. In dieser Arbeit wird die Entstehung von Streu-Artefakten in der photoakustischen Bildgebung beschrieben und es werden Lösungsstrategien entwickelt, diese durch neuartige Signalverarbeitungsansätze zu unterdrücken.

Bei einer photoakustischen Messung wird das zu untersuchende Gewebe mit Laserpulsen beleuchtet und die durch thermische Ausdehnung entstehenden Schallwellen an verschiedenen Positionen, z. B. entlang eines linearen Ultraschallarrays, detektiert. Durch eine Rekonstruktion der Schallquellen im Gewebe können somit Rückschlüsse auf das optische Absorptionsverhalten jedes abgebildeten Raumpunktes gezogen werden. Bei konventionellen Rekonstruktionsverfahren werden homogene akustische Eigenschaften des Ausbreitungsmediums angenommen. Streuungen der Welle an Materialübergängen werden also nicht berücksichtigt, was zu einer Fehllokalisierung der photoakustischen Quellen und damit zu Bildartefakten führt.

In dieser Arbeit wird zunächst die Streuung einer photoakustischen Welle mathematisch beschrieben. Dann werden die damit assoziierten Probleme in der Bildgebung herausgestellt und bisherige Lösungsansätze in der Literatur aufgeführt. Die Bildfehler, die durch Streuung hervorgerufen werden, werden in Clutterartefakte und Aberrationsartefakte unterteilt, wobei es sich bei Clutter um einen reflektionsbezogenen Vorgang und bei Aberrationen um einen brechungsbezogenen Vorgang handelt.

Zur Berücksichtigung der akustischen Streuung wird daraufhin ein modellbasiertes Rekonstruktionsverfahren eingeführt, das die Verteilung der photoakustischen Quellen bei gegebener Verteilung der akustischen Eigenschaften des Gewebes durch eine Landweber-Iteration annähert. Eine Anfangsschätzung wird dabei durch abwechselnde Vorwärts- und Rückwärtsausbreitung iterativ verbessert. Anhand von Simulationsdaten wird gezeigt, dass sich so die Ortsauflösung von Messungen mit räumlich begrenzter Apertur erheblich verbessern lässt. Die Berücksichtigung der akustischen Streuung bewirkt nicht nur eine Unterdrückung der Artefakte, sondern ermöglicht auch die Abbildung von Strukturen, die in einem homogenen Medium aufgrund der begrenzten Apertur nicht rekonstruiert werden könnten. Die Überwindung der physikalischen Auflösungsgrenze kann hierbei nicht beobachtet werden, jedoch stellt das Verfahren auch ein effektives Filter zur Bandwiederherstellung selbst bei hohem Rauschpegel dar. Nachteile des Verfahrens ergeben sich aus dem hohen Rechenaufwand sowie aus der Abhängigkeit von genauen Kenntnissen der akustischen Heterogenitäten. Daher werden im weiteren Verlauf zwei neuartige Verfahren vorgestellt, die die Probleme des Clutters und der Aberrationen getrennt voneinander betrachten und auf Grundlage von vereinfachten Modellen eine robuste und recheneffiziente Lösung liefern.

Das erste Verfahren behandelt das Problem der Aberrationen. Aberrationen sind Verzerrungen der rekonstruierten Quellen, welche sich auf Ablenkungen der Wellenfronten an Schallgeschwindigkeitsübergängen zurückführen lassen. Das Verfahren führt eine Rückpropagation der gemessenen Wellen auf Grundlage einer paraxialen Näherung der Wellengleichung durch. Dabei werden Beugung und Brechung als zwei unabhängige Mechanismen aufgefasst, was in einen effizienten Algorithmus zur inversen Wellenausbreitung resultiert. Auch für dieses Verfahren sind Informationen über die Verteilung der Materialeigenschaften erforderlich. Es kann jedoch gezeigt werden, dass schon schwach aufgelöste Schallgeschwindigkeitsverteilungen, wie sie aktuelle Verfahren zur Schätzung der Schallgeschwindigkeitsverteilung liefern, ausreichen, um Aberrationsartefakte signifikant zu unterdrücken.

Das Verfahren zur Reduktion von Clutter, also von Reflektionsartefakten, kommt ganz ohne a-priori Wissen der Materialeigenschaften aus, da die Informationen zur akustischen Streuung direkt aus Reflektions-Ultraschallmessungen gewonnen werden. Dazu wird ein Vorwärtsmodell einer reflektierten photoakustischen Welle aufgestellt und ein Zusammenhang mit zusätzlich aufgenommenen Ultraschallaufnahmen mit ebenen Wellen hergeleitet. Durch die Inversion dieses Modells kann eine reflektionsfreie Messung berechnet werden. Es werden zwei Inversionsverfahren vorgestellt, die jeweils einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Robustheit darstellen. Außerdem wird ein effektives Vorgehen zur Unterdrückung des Einflusses der Impulsantwort der Ultraschallmessung vorgestellt. Um den Zeitaufwand zu reduzieren, wird weiterhin ein verbessertes Interpolationsverfahren aufgezeigt, welches es ermöglicht, mit deutlich weniger Ultraschallaufnahmen gleich gute Artefaktreduktionen zu ermöglichen. Zusammenfassend wird in dieser Arbeit gezeigt, welchen Vorteil eine Berücksichtigung der akustischen Streuung in der photoakustischen Rekonstruktion bewirken kann. In diesem Zuge werden zwei Verfahren untersucht, die jeweils einzelne Probleme mit akustischen Heterogenitäten behandeln und in Kombination eine schnelle und genaue Bildgebung ermöglichen.