

Kurzfassung der Dissertation

Signalverarbeitung quantitativer Ultraschallmessungen am proximalen Femur

Dipl.-Ing. Stefanie Dencks

Lehrstuhl für Medizintechnik, Ruhr-Universität Bochum

Für die Abschätzung des osteoporotischen Frakturrisikos stellt der quantitative Ultraschall (QUS) eine kostengünstige und schonende Alternative zu anderen Verfahren wie z.B. Röntgentechniken oder der Magnetresonanztomographie dar. Bei QUS Messungen werden kurze Schallimpulse mit Mittenfrequenzen zwischen 0,5 und 1 MHz durch den Knochen transmittiert. Aus den empfangenen Signalen werden die charakteristischen Übertragungsparameter des Knochens bestimmt, die mit seiner mechanischen Festigkeit assoziiert sind. Im Rahmen von zwei Forschungsprojekten wurde ein Scanner entwickelt, um diese Technik, die bisher an peripheren Messorten wie der Ferse eingesetzt wurde, auch am proximalen Femur anwenden zu können, da dieser einer der Hauptfrakturorte ist. Auf Grund der komplexen Mehrwegeausbreitung von Schallwellen im Knochen schlug jedoch die konventionelle Signalverarbeitung häufig fehl. Ziel dieser Arbeit ist deswegen die Entwicklung einer Signalanalyse, die eine Charakterisierung der einzelnen Schallwege ermöglicht. Aufbauend auf einer Zusammenstellung theoretischer Überlegungen zur Schallausbreitung im Knochen und der Darstellung der QUS Standardparameter werden zunächst die Auswirkungen einer Mehrwegeausbreitung auf die Berechnung dieser Parameter analytisch und mit Hilfe von Simulationen veranschaulicht und diskutiert. Außerdem werden die Messaufbauten für die *ex vivo* und *in vivo* Messungen kurz dargestellt.

Schwerpunkt der Arbeit ist die Signalanalyse. Für die Zerlegung eines QUS-Transmissionssignals in die Signalkomponenten verschiedener Schallausbreitungswege wird zunächst eine modellbasierte Signalanalyse aus dem Bereich der zerstörungsfreien Materialprüfung an die konkrete Problemstellung adaptiert. Der Algorithmus beruht auf einer analytischen Beschreibung des empfangenen Ultraschallpulses im Zeitbereich als Überlagerung mehrerer Gaborpulse mit additivem, normalverteiltem, weißem Rauschen. Mit Hilfe von nichtlinearen Optimierungsalgorithmen basierend auf Kleinste Quadrate Schätzern, die in einen iterativen Space-Alternating-Generalized-Expectation-Maximization-Algorithmus (SAGE) integriert sind, werden die Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Signal minimiert und so die Modellparameter für jede Signalkomponente bestimmt. Aus der Verschiebung der Parameter zwischen Referenzsignal und Transmissionssignal können anschließend die Übertragungsparameter berechnet werden. Dieses Verfahren ist auf Signale beschränkt, die analytisch im Zeitbereich beschreibbar sind.

Um diese Restriktion aufzuheben, wird ein neues Verfahren unter Anwendung parametrischer Modellansätze zum Übertragungsverhalten im Frequenzbereich entwickelt. Dafür werden die Ultraschallsignale in den Frequenzbereich transformiert und die Übertragungsfunktionen des zwischenliegenden Gewebes durch den oben beschriebenen, iterativen Optimierungsalgorithmus bestimmt. Damit ist das Verfahren für beliebige Signalformen einsetzbar und prinzipiell für abweichende Übertragungsmodelle erweiterbar. Unter Verwendung von Beispielsignalen werden die Leistungsfähigkeit des neuen Algorithmus veranschaulicht und Grundlagen für die Untersuchung der unterschiedlichen Eignung von Schallpulsformen zur Verbesserung der Signalanalyse in Bezug auf die Genauigkeit der Parameterschätzung gelegt.

Sowohl das Zeit- als auch das Frequenzbereichsverfahren werden in Hinsicht auf ihre Genauigkeit und ihre Robustheit untersucht. Für normalverteiltes Rauschen im Zeit bzw. Frequenzbereich ist bekannt, dass die eingesetzten Schätzer asymptotisch wirksam und erwartungstreu sind. Der Vergleich der theoretisch berechneten Cramér-Rao Schranken mit den Ergebnissen aus Monte-Carlo-Simulationen zeigt, dass beide Verfahren bereits für die verfügbare endliche Anzahl von Abtastwerten die richtigen Parameterwerte und die minimal zu realisierende Varianz annähernd erreichen. Zur Evaluierung der Grenzen dieser Algorithmen bzw. zur Bestimmung der zu erwartenden Fehler für die einzelnen Parameter im Falle von überlagerten Wellen werden Simulationen durchgeführt. Durch den Vergleich der konventionellen Verfahren mit der modellbasierten Signalanalyse kann eine deutliche Verbesserung der Parameterschätzung durch Signalzerlegung demonstriert werden.

Die Auswertung von *ex vivo* und *in vivo* Daten mit Hilfe der entwickelten Signalanalyseverfahren bestätigt die erfolgreiche Lösung des Problems der Mehrwegeausbreitung und die damit gewonnene medizinische Aussagekraft von QUS-Messungen am proximalen Femur.