

BESTIMMUNG DER BIEGESTEIFIGKEIT VON
RÖHRENKNOCHEN MITTELS DER
PHASENGESCHWINDIGKEIT TRANSVERSALER
WELLEN UND COMPUTERTOMOGRAMMEN

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
ROLAND ERNST HERZOG
dipl. Phys. ETH
geboren am 22. September 1966
von Homburg (TG)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. E. Stüssi, Referent
Prof. U. Wyss, PhD, Korreferent

Zusammenfassung

Mit der ansteigenden Lebenserwartung der Bevölkerung, wird eine frühzeitige Diagnose von Knochenerkrankungen immer wichtiger. In den letzten Jahren zeigte sich, dass die Aussagekraft der radiologisch gemessenen Knochendichte durch die Kombination mit geometrischen Parametern verbessert werden konnte.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von transversalen Wellen in Röhrenknochen ein Parameter ist, der Aussagen über die Knochenqualität zulässt, und dass insbesondere durch die Kombination mit radiologisch ermittelten geometrischen Parametern Rückschlüsse auf mechanische Eigenschaften gemacht werden können.

Die Messung der Phasengeschwindigkeit von Biegewellen in der tibia mit Beschleunigungsaufnehmern wurde verbessert und Messungen an Frauen aller Altersklassen, Paraplegikern und Astronauten vor, während und nach Weltraumflügen durchgeführt. Der Verlauf der Phasengeschwindigkeit in der tibia über das Alter zeigte bei Frauen einen starken Anstieg bis zum zwanzigsten Altersjahr, ein Maximum um das vierzigste Altersjahr und danach eine Abnahme. Vergleiche der Messwerte von Astronauten vor und nach Weltraumflügen zeigten keine signifikanten Unterschiede.

An *in vitro* Präparaten wurde gezeigt, dass sich auch an der humanen ulna Biegewellen anregen lassen, und dass ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen werden kann.

Geometrische Parameter, insbesondere die Querschnittsfläche und die axialen Flächenträgheitsmomente, wurden aus CT-Messungen an diesen Präparaten berechnet. Die Messungen wurden mit Abständen von 1cm entlang der ganzen Länge aller Präparate gemacht. Es zeigte sich, dass die Flächenträgheitsmomente und die Richtung der Hauptachsen in einem mittleren Bereich der ulna die kleinsten Veränderungen aufwiesen.

Aus diesen Daten wurde eine Messanordnung abgeleitet, die es erlaubt mit Beschleunigungsaufnehmern die Ausbreitung von Biegewellen bei einer geeigneten Frequenz im mittleren Bereich der ulnae zu messen. Die Phasengeschwindigkeiten der Biegewellen wurden aus den Signalen der Beschleunigungsaufnehmern berechnet. Eine Beeinflussung der Biegewellen durch andere Schwingungsmoden konnte nicht gefunden werden.

Aus den Phasengeschwindigkeiten und den CT-Messungen wurde die Biegesteifigkeit der ulnae nach dem Bernoulli-Euler Modell und dem Timoshenko Modell berechnet. Die kleinen Unterschiede der Resultate, welche innerhalb der Fehlergrenzen lagen, liessen den Schluss zu, dass das einfachere Bernoulli-Euler Modell, welches zur Berechnung der Biegesteifigkeit nur die Querschnittsfläche und keine Flächenträgheitsmomente benötigt, bereits eine genügend gute Näherung für die Berechnung der Biegesteifigkeit ist.

Zur Validierung der berechneten Biegesteifigkeiten wurden an allen ulnae in demselben Bereich, in dem auch die Phasengeschwindigkeit gemessen wurde, Dreipunktbiegemessungen durchgeführt. Die Korrelation zwischen den aus der Phasengeschwindigkeit und dem Flächenträgheitsmoment berechneten Biegesteifigkeiten mit den Werten aus den Dreipunktbiegemessungen betrug $r^2=0.86$.

Ein mittleres E-Modul der ulnae in axialer Richtung wurde aus der berechneten Biegesteifigkeit und dem axialen Flächenträgheitsmoment ermittelt. Die erhaltenen Werte waren leicht tiefer als Literaturwerte, was sich mit dem Zustand der Präparate erklären liess.

Es wurde ein Vorschlag für eine *in vivo* Anordnung zur Messung der Phasengeschwindigkeit von BiegeWellen in der ulna gemacht. In Kombination mit radiologischen Messungen kann so die Biegesteifigkeit und ein mittleres E-Modul in axialer Richtung der ulna *in vivo* gemessen werden.

Summary

Early diagnosis of bone illnesses is becoming more important as the population's life expectancy increases. Recently it has been shown that the accuracy of bone density measurements made using x-ray absorption could be improved by combining it with geometric parameters. This thesis shows that the bending wave phase velocity in tubular bones is related to bone quality, and that the combination with radiologically derived geometric data allows the prediction of mechanical properties.

The measurement of the bending wave phase velocity in the tibia, with accelerometers, has been improved and measurements were made on women of all ages, paraplegic's and astronauts before and after space flights. The phase velocity in the tibia in women was found to be age dependent, with a rapid rise until the twenties and a maximum around the forties followed by a decrease. Comparisons of the measurements made on the astronauts before and after the flights did not show significant changes.

In vitro specimens were used to show the possibility of releasing bending waves in the human ulna and measuring their velocity with accelerometers. Geometric parameters e.g. the cross-sectional area and the second moment of area were calculated from CT-measurements of the specimens. These measurements were performed at 1cm intervals along the specimens. A region in the middle of the ulna was found to show only small changes in the second moment of area and the directions of the main axes.

These results helped derive an arrangement of accelerometers that was used to measure the propagation of a bending wave, with an appropriate frequency, in the middle of the ulna. The bending wave phase velocities were calculated from the accelerometer signals. No influence of different modes on the bending waves could be found. The bending stiffness of the ulna specimens was calculated from the phase velocities and the CT-measurements using the Bernoulli-Euler Model and the Timoshenko Model. The results of the two models showed small differences that were within the error ranges, and hence it was concluded that the simpler Bernoulli-Euler Model, which uses only the cross sectional area and no second moment of area, is an adequate approximation for the bending stiffness calculations.

Three point bending tests were performed on all specimens, in the same region as the phase velocity was measured, to validate the calculated bending stiffness. The correlation with the bending stiffness calculated from bending wave propagation was $r^2=0.86$.

An average Young's Modulus in the axial direction of the ulna was derived from the calculated bending stiffness and the axial moment of inertia. The derived values were slightly lower than in literature what was explained with the condition of the specimens.

A proposed in vivo arrangement for the measurement of the transversal wave phase velocity in the ulna is provided. Combined with radiological measurements, the bending stiffness and the average Young's Modulus in the axial direction of the ulna could be derived in vivo.