

Entwicklung von Kunstknochen zur mechanischen Belastungsprüfung von Knochenstrukturen mittels Schallemissionsanalyse SEA

Olaf NALIK¹, Miriam DILL¹, Alexander JAHNKE², Udo WOLF³, Gerd MANTHEI¹, Jörg GOLLNICK¹, Markus RICKERT², Hans-Joachim SCHWALBE⁴, Jörg SUBKE¹

¹ THM Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

² Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie, Giessen

³ Hochschule Fulda, Fulda

⁴ BoneDias, Greifenstein

Kontakt E-Mail: joerg.subke@lse.thm.de

Kurzfassung. Das Monitoring der Festigkeit und Stabilität von knöchernen Strukturen und den Verbindungen zu implantiertem Material ist für verschiedene Zweige der Medizin von großem Interesse. Z.B. in der Orthopädie, um die Integrität der Verbindung von Endoprothesen mit dem Knochen überwachen zu können.

Speziell in der Hüftendoprothetik rechnet man mit einer durchschnittlichen Haltbarkeit eines künstlichen Gelenks von 10 Jahren. Mehr als zwei Operationen sind nur selten möglich, so dass nach ca. 20 Jahren die Prognose für die Lebensqualität der Patienten nicht gut ist. Ziel ist es, auf der Basis der Schallemissionsanalyse ein nicht-invasives Verfahren zu entwickeln, dass die Beurteilung des Integritätszustands ermöglicht.

Zu diesem Zweck sind Grundlagenexperimente durchzuführen, die Aufschluss über die Stabilität und die Bruchmechanik solcher heterogener Strukturen geben. Ein erster Schritt in dieser Studie ist die Entwicklung von Kunstknochen, die in erster Näherung Röhrenknochen des Oberschenkels mit der dichten äußeren Schicht der Kompakta und der inneren schwammartigen Schicht der Spongiosa nachbilden.

Die künstlichen Knochen werden mit einem Pedilen®-Schaum aus der Orthopädietechnik (Ottobock Healthcare) aufgebaut und einer typischen natürlichen Belastung in der unteren menschlichen Extremität unterzogen, die einer Torsions-Biegebelastung entspricht (s. hierzu [1]).

Die Riss-Struktur und die aufgezeichnete Impulssumme der SEA des Kunstknochen-Probekörpers wurden mit der Struktur (mit Variation der Dichte der Spongiosa-Ersatzstruktur) und dem lastabhängigen Verlauf der Schallemission SE und somit der Risskinetik eines natürlichen Knochens verglichen.

0. Einführung

Die Entwicklung eines Diagnosesystems für die Gonarthrose mittels Schallemissionsanalyse hat gezeigt, dass die Belastungsvorgänge im menschlichen Knie akustisch im Ultraschallbereich zu einer Bewertung der Gelenkoberflächen eingesetzt



werden kann. Der Vorteil der Schallemissionsanalyse ist, dass die Belastungsvorgänge im Körper als Bruch- und Reibegeräusche hochaufgelöst detektiert werden können. Daraus lässt sich für die orthopädische Diagnose im Bereich der Hüft-Endoprothese ein Verfahren ableiten, mit dem die Stabilität der Verbindung zwischen Endoprothese und Femurknochen gemessen werden kann. Dazu sind grundlegende Versuche durchzuführen, die eine Korrelation zwischen den akustischen Signalen und den mechanischen Vorgängen zwischen dem Femurknochen und der Endoprothese aufzeigen. Hinsichtlich der mechanischen Belastungen und bruchmechanischen Vorgänge sind die Grenzflächenphänomene zwischen dem Femurknochen und der Endoprothese zu untersuchen. Aus ethischen Gründen sollen eigens zur Bestimmung der Grenzflächenphänomene Kunstknochen eingesetzt werden, die annähernd die Eigenschaften von Knochen wiedergeben.

1. Methode

1.1 Aufbau des Kunstknochens

Der Aufbau eines Röhrenknochens kann anatomisch gesehen in zwei Strukturen unterteilt werden; die Kompakta im Knochenquerschnitt gesehen ist der feste äußere Ring und die Spongiosa, die schwammartige innerer Struktur des Knochens. Nach Wolff [2] bildet der Knochen als Antwort auf die äußeren Belastungen die schwammartige Struktur in der Weise aus, dass sich die knöchernen Streben (Trabekel) vornehmlich in Richtung der Druck- und Zugbelastungen ausrichten.

Von Kellotat [3] wurde ein erster Kunstknochen entwickelt, der aus einem Hohlzylinder (künstliche Kompakta) und einem ausgeschäumten Kern bestand. Es wurde als Material Pedilen (E-Modul 36,2 MPa nach [3]) verwendet, das typischerweise in der Orthopädietechnik eingesetzt wird. Die ersten Versuche zeigten, dass mit diesem Kunstknochen das typische Bruchsystem hergestellt werden konnte, aber die Impulssumme der Schallsignale des Versagens noch nicht mit dem natürlichen Knochen vergleichbar war. Aus diesem Grund wurde der Aufbau variiert, indem in den ausgeschäumten Kern ein Hohlraum eingebaut wurde, der den anatomischen Verhältnissen vergleichbar ist [4]. Durch Zumischung unterschiedlicher Wasseranteile (2%, 4%, 6%) wurden drei verschiedene Knochenproben erzeugt (siehe Abb.1 und Tabelle 1).



Abb. 1. Kunstknochen aus Pedilen; Länge=126mm, Durchmesser=27mm, Kortikalisdicke=6mm.

Tabelle 1. Kunstknochen

Probennummer	Mischung H ₂ O	Länge	Durchmesser	Hohlraummaße
P_2	2%	126mm	27mm	Länge 55mm, Breite 15mm
P_4	4%	126mm	27mm	Länge 55mm, Breite 15mm
P_6	6%	126mm	27mm	Länge 55mm, Breite 15mm

Zur Aufnahme in die Prüfmaschine wurden die Proben an den Enden mit einer Halterung versehen, die einen quadratischen Querschnitt 40mm x 40mm und eine Dicke von 28mm aufwies.

1.2 Belastungseinheit

Die Proben des Kunstknochens wurden in einer Torsions-Biegevorrichtung belastet (Abb. 2), die im Rahmen der Diplomarbeit für Femurknochen-Proben entwickelt worden ist [5]. Die in der Belastungsvorrichtung vorgegebene Bewegung der Probe aus Torsion und Biegung entspricht im weitesten der natürlichen biomechanischen Belastung des Oberschenkelknochens beim Menschen.



Abb. 2. Belastungseinheit nach Schmidt [5] mit Schenk Hydropuls Prüfmaschine PSA.

Die Torsions-Biegevorrichtung wird an die servohydraulische Universal-Axialprüfmaschine PSA der Firma Schenk angekoppelt und mittels einer Steuer- und Regelungseinheit (4900 Digital Controller Pegasus) über eine Zahnstange weggesteuert. Die Vorrichtung besteht aus zwei Bauteilgruppen, die über ein Scharniergelenk in der Mitte verbunden sind. Die rechte Bauteilgruppe besteht aus einer Spannbacke, die durch die Prüfmaschine in Rotation gebracht wird. Diese Spannbacke wird gleichzeitig angehoben und bewegt die Vorrichtung um das Scharniergelenk, so dass die Probe eine Torsion und Biegung gleichzeitig erfährt. Die Kraft wurde mit einem Sensor PM 40 Rn (10V = 40 kN) und die Weglänge mit einem induktiven Sensor WA50, HBM (10V = 50mm) aufgenommen. Für das Bruchexperiment wurde die Weglänge schrittweise um 1mm bis zum Bruch erhöht.

1.3 Messkette Schallemissionsanalyse

Zur Aufnahme der Schallsignale wurde das Messsystem 1283 USB AE Node von Physical Acoustics Corporation, Mistras Group mit der Sonde AE R6D und Software AEWIN USB E5.32 verwendet (Abb. 3). Die Sonde AE R6D hat einen Frequenzumfang von 0.0 bis 0.2 MHz und weist im Bereich von 50.78 kHz das Amplitudenmaximum von 78.55 dB auf. Mit dem Vorverstärker Power Preamplifier IL-LP-15D wird die Bandbreite auf 50 kHz bis 770 kHz eingeschränkt. In der Software AEWIN wurden die analogen Filter auf Lower = 40 kHz und Upper=120 kHz eingestellt. Als Samplerate wurde 500 kSPS gewählt. Für die weiteren Parameter (Pretrigger, Length, PDT, HDT, HLT) wurden die Default-Werte übernommen.



Abb. 3. Komponenten der SEA-Messkette und Hsu-Nielsen-Tester.

Um die biologischen Verhältnisse um den Knochen nachzubilden, wurde ein Stück Schweinefilet als Koppelmaterial zwischen Kunstknochen und Schallsonde verwendet (Abb. 4). Die Funktionstüchtigkeit des Messsystems wurde über den Standard-Penciltest Hsu-Nielsen Source 0.5 geprüft.

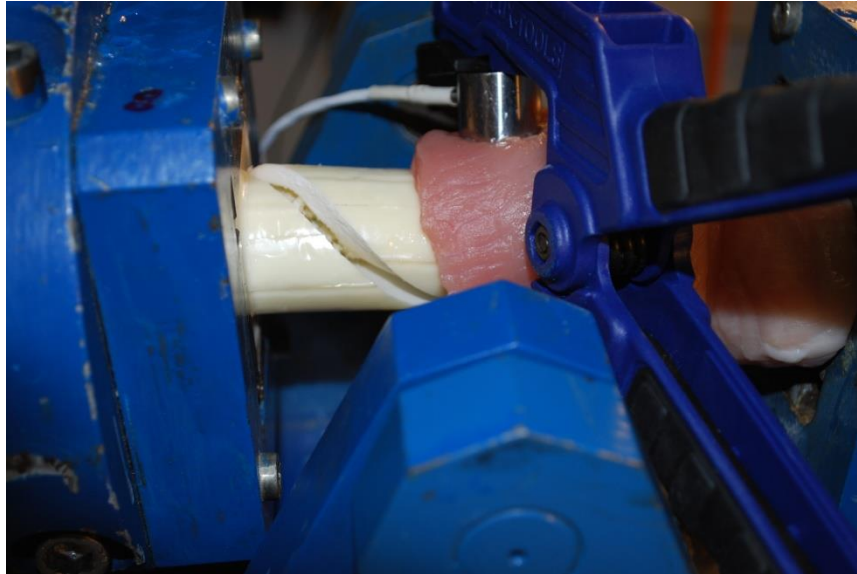


Abb. 4. Ankopplung der Sonde an den Kunstknochen mittels Schweinefilet.

1.4 Belastungsprozedur

Für die Analyse der Proben wurden die Weglängenänderung, die Kraft, und die Schallsignale mit den o.g. Sensoren und Messsystemen aufgenommen. Die Proben wurden nach Schwalbe [6] dreimal zyklisch bis zur der Wegposition belastet, bei der das erste Burstsignal im 1. Zyklus aufgetreten ist, um kleine Verspannungen, die bei der Herstellung der Proben im Material entstanden sind, abzubauen. Anschließend wurden die Proben bis zum Bruch belastet (Abb. 5). Die Optimierung der Prozedur wurde von Nalik [7] vorgenommen.



Abb. 5. Bruchstücke der belasteten Probe P_6.

2. Ergebnisse

Zur Analyse der Kunstknochenproben wurden die zeitlichen Verläufe der durch die Wegsteuerung entstandenen Kraft und die Emission der Schallsignale betrachtet. Um die

unterschiedlichen Proben miteinander vergleichen zu können, wurden die Kraftwerte der einzelnen Proben auf die maximale Kraft beim Bruch der jeweiligen Probe skaliert. Dasselbe wurde bei der Darstellung der Anzahl der Schallsignale (Hits) berücksichtigt (Abb. 6).

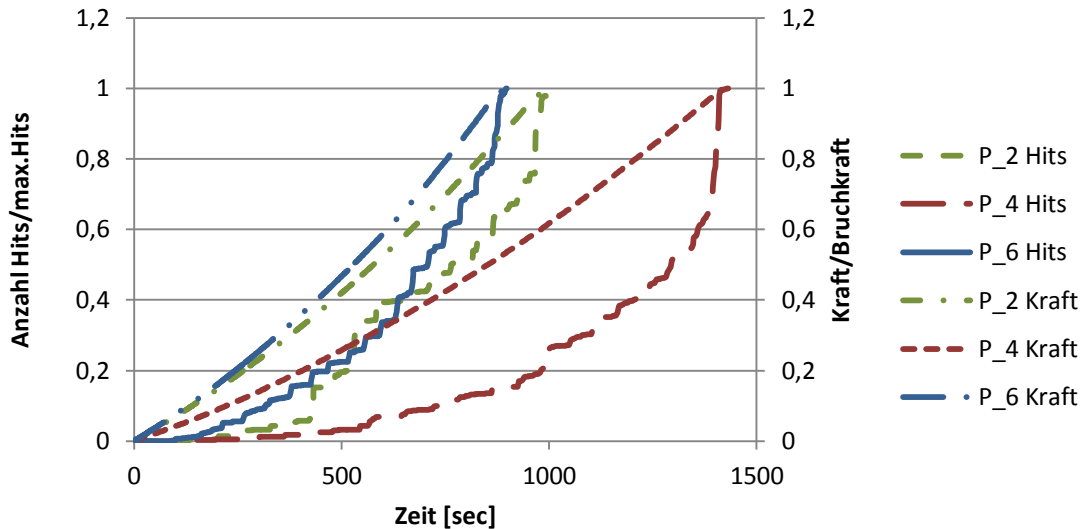


Abb. 6. Zeitliche Verläufe der durch die Wegsteuerung erzeugten Kräfte, auf die Bruchlast skaliert, im Vergleich mit den Impulssummen der SEA-Signale (Hits / max. Hits).

3. Diskussion

Unter Beachtung der Veränderung der Position der unteren Spannbackeneinrichtung der Prüfmaschine erkennt man in Abbildung 6 deutlich das unterschiedliche Verhalten der Proben in Bezug auf den Kraftverlauf. Die Probe P_6 zeigt den größeren Widerstand gegenüber der Weglängenänderung als Probe P_2; Probe P_4 hingegen zeigt sich als schwächste Probe. Betrachtet man die Reihenfolge der Steigungen der Kraftkurven, entsteht die Reihenfolge P_2, P_6, P_4. Das Gleiche gilt für die Reihung des Bruchereignisses der Proben. Für den Prozentanteil H₂O bei der Herstellung der Proben entsteht die Reihung P_2, P_4, P_6. D.h. dass die bei der Herstellung der Kunstknochen durch die Beimischung von H₂O erwartete Änderung des Materials sich nicht im Bruchverhalten dieser Proben widerspiegelt. Hingegen zeigen alle Proben das typische Rissystem, das sich beim Brechen realer Knochen ergibt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Herstellung von Kunstknochen werden zwei Forderungen gestellt:

1. Der Kunstknochen soll nach der Belastung bis zum Bruch das typische Rissystem zeigen.
2. Der Kunstknochen soll den Mechanismus des Versagens mittels Schallsignalen wiedergeben.

Bei den bisherigen Versuchen konnte die erste Forderung erfüllt werden. Die zweite Forderung konnte bisher noch nicht erfüllt werden. In dieser Untersuchung wurde der

Parameter Material betrachtet. Dazu wurde bei der Herstellung der Proben der Parameter H_2O variiert.

Die Erwartungen, die durch den Parameter H_2O -Anteil bei der Herstellung an das Bruchverhalten gestellt wurden, wurden bisher noch nicht erfüllt.

Bei der Herstellung von Kunstknochen zeigen sich verfahrenstechnische Schwierigkeiten und neue Fragenstellungen, die durch weitere Experimente untersucht werden müssen. Die ersten Ergebnisse zeigen, in welchen Größenordnungen die Belastungsdaten der Kunstknochenproben liegen. Ein Thema ist der Aufbau der schwammartigen Struktur, deren Modifikation im nächsten Schritt vorgenommen werden soll. Das zweite Thema ist, das Material, die Mischungsverhältnisse der Komponenten für die nächsten Versuche, zu planen.

Referenzen

- [1] Burk O. Bruchmechanische Untersuchung am humanen Femur mit Hilfe der Schallemissionsanalyse. Fachbereich Maschinenbau und Feinwerktechnik, Fachhochschule Gießen-Friedberg, 1998
- [2] Wolff, J. Das Gesetz der Transformation der Knochen - 1892. Reprint: Pro Business, Berlin 2010, ISBN 978-3-86805-648-8.
- [3] Kellotat A. Entwicklung und Herstellung eines künstlichen Femurs zur Reproduktion des Knochenschalls. Bachelorarbeit, Fachbereich Life Science Engineering, THM 2014
- [4] Dill M. Interner Bericht. Biomechanik-Labor, Fachbereich Life Science Engineering, THM 2016
- [5] Schmidt H-O. Zerstörungsfreie Prüfung am menschlichen Femur. Fachbereich Maschinenbau und Feinwerktechnik, Fachhochschule Gießen-Friedberg, 1997
- [6] Schwalbe H-J. Reißfähigkeit glasfaserverstärkter Kunststoffe. Fakultät für Maschinenbau, Dissertation RWTH Aachen, 1981
- [7] Nalik O. Bestimmung der Rissbildungsgrenze bei osteoporotischen Knochen und Kunstknochen mittels Schallanalyse. Bachelorarbeit, Fachbereich Life Science Engineering, THM 2016