

Titel: Mikrocomputertomographie für die Materialcharakterisierung in biomedizinischen Anwendungen

Einleitung: Radiologische Bildgebungsverfahren wie die Mikro-Computertomographie (Mikro-CT) ermöglichen die dreidimensionale, zerstörungsfreie Charakterisierung der Mikrostrukturen in verschiedensten Materialien. Besonders Leichtbaumaterialien wie Polymerschäume, Kohlenstoff-faserverstärkte Kunststoffe oder Titanlegierungen, welche in der Medizintechnik weit verbreitet sind, zeigen oft interne Defekte. Durch eine zerstörungsfreie Untersuchung von Implantaten, bei denen ein Versagen während der Nutzung unter allen Umständen zu vermeiden ist, kann eine fehlerfreie Funktion gewährleistet werden. In dieser Studie wurden Proben künstlicher Knochenschäumen untersucht, um das haptische Feedback von physiologischen und pathologischen Knochenschäumen für Trainingszwecke zu optimieren. Die Kombination von zerstörungsfreier Prüfung mit Mikro-CT, moderner Bildverarbeitung und Finite-Elemente-Methoden kann außerdem zur Prognose des Bauteilverhaltens angewendet werden. Ein Beispiel wird in dieser Arbeit durch die Simulation der mechanischen Eigenschaften von 3D-gedruckten Ti6Al4V Pedikel-Schrauben gezeigt.

Methode: Titanlegierungen sind aufgrund ihrer herausragenden Festigkeit bei geringem Gewicht und ihrer Biokompatibilität ein unverzichtbares Material für medizinische Anwendungen. Poren und Defekte in additiv gefertigten Bauteilen können jedoch deren mechanische Stabilität beeinträchtigen. Zu diesem Zweck wurde eine Serie von sieben Ti6Al4V Pedikel-Schrauben durch Selektives Laserschmelzen hergestellt. Alle Proben wurden in einer Auflösung von 5 μm mittels eines industriellen Mikro-CT (Nanotom 180) untersucht. Anschließend wurden insgesamt 56 kubischen Regionen aus den Daten extrahiert, um eine Finite Elemente Analyse (FEA) zur Simulation der mechanischen Eigenschaften mittels Medtool (Dr.Pahr Ingenieure eU) und Abaqus (Simulia) durchzuführen.

Außerdem untersuchten wir fünf Proben von künstlichen Knochenschäumen, die entwickelt wurden, um das haptische Feedback von physiologischem Knochen für Trainingszwecke nachzubilden. Speziell die Verteilung von Calciumphosphat (CaP)-Einschlüssen, die dem Material zugefügt wurden, um seine Dichte zu erhöhen, wurden im Detail analysiert. Zuletzt wurde in einer kombinierten Untersuchung eine Titanschraube in eine künstliche Knochenschäumprobe eingebracht, um die Auswirkung der Oberflächenrauigkeit auf das Interface zwischen Schraube und Schaum zu untersuchen. Zudem wurden an ausgewählten Schäumen Auszugstest durchgeführt.

Ergebnisse: Im Halsbereich der Titanschrauben, welcher üblicherweise der höchsten Belastung z.B. bei mechanischen Auszugsversuchen ausgesetzt ist, zeigen die Proben eine Porosität von $1,16 \pm 0,12\%$. Die Poren sind exponentiell verteilt, was eine höhere Anzahl

kleiner Poren bei einem mittleren Durchmesser von $0,08 \pm 0,002$ mm und einem mittleren Volumen von $6,63 \cdot 10^{-5} \pm 8,3 \cdot 10^{-6}$ mm³ ergibt. Dennoch weisen die größten gefundenen Poren ein Volumen von bis zu $12,3 \cdot 10^{-3}$ mm³ oder 0,95 mm Durchmesser auf. Die räumliche Ausdehnung der Poren in X-, Y- und Z-Richtung wurde ebenfalls näher untersucht. Die projizierte Größe der Poren ist im Durchschnitt $19,3 \pm 1,25\%$ größer in der Transversalebene im Vergleich zur 3D-Druckrichtung, was zu einer mittleren Anisotropie von $0,174 \pm 0,048$ führt. Das via FEA evaluierte mittlere Elastizitätsmodul der Titanschrauben liegt mit $105667,9 \pm 932$ N/mm² erwartungsgemäß im Bereich geringfügig unterhalb von geschmiedeten Ti6Al4V ($114 \cdot 10^3$ bis $120 \cdot 10^3$ N/mm²). Dies bedeutet jedoch eine Reduktion des Elastizitätsmoduls um bis zu 14,88% je nach Porosität in der untersuchten Probe. Darüber hinaus ist die Steifigkeit in 3D-Druckrichtung um 0,69% geringer als in der Transversalebene.

Die Mehrheit der in den künstlichen Knochenschäumen untersuchten CaP-Einschlüsse treten bei Durchmessern unter 0,2 mm auf. Eine breite Streuung der Verteilung wird durch größere CaP-Agglomerationen von bis zu 0,176 mm³ oder 1,34 mm Durchmesser verursacht. Die maximalen Auszugskräfte der in die Knochenschäume eingebrachten Titanschrauben reichten von 113 bis 803,5 N in Abhängigkeit von der Menge des Treibmittels welches zur Herstellung der Schäume eingesetzt wurde.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen: Obwohl 3D-Druck eine hohe Flexibilität bei der Herstellung komplexer metallischer Bauteile bietet, ist es schwierig, die Porosität der inneren Mikrostruktur zu kontrollieren. Unsere Untersuchungen zeigen, dass die Porosität und Porengrößenverteilung in 3D-gedruckten Titanbauteilen deren mechanische Eigenschaften stark beeinflussen. Während des Fertigungsprozesses entstehen dabei durch die gewählte 3D-Druckrichtung orientierungsabhängige Unterschiede in der Bauteilsteifigkeit. Analog dazu wurden auch in künstlichen Knochenschäumen Agglomerationen von CaP detektiert, welche zwar als Ausreißer betrachtet werden können, jedoch durch ihre Größe die mechanische Stabilität bzw. das haptische Feedback des künstlichen Knochens lokal beeinflussen können. Dennoch stimmen die bei Auszugstests ermittelten Auszugskräfte gut mit den eines natürlichen Knochens überein, wodurch die Funktionsfähigkeit des künstlichen Knochenschaums bestätigt werden kann. Außerdem wurde bei der Applikation der Titanschrauben in die künstlichen Knochenschäumproben entdeckt, dass sich teilweise geschmolzene Titanpartikel von der Oberfläche der schraube lösen und in das Knochenschäumgerüst einwandern. Dies zeigt den zusätzlichen Bedarf an Oberflächenbehandlungen für additiv gefertigte Titanimplantate.

Danksagung: Dieses Projekt wurden finanziert von den Projekten „MetAMMI“ (EMPIR, Projektnummer: 15HLT09) und dem Projekt "Com3d-XCT" (Projektnummer: ATCZ38), finanziert von EFRE im Rahmen des Interreg V Programms.