

DIAMOND

Entwicklung eines biomechanisch optimierten intelligenten Hüftimplantats aus einer Titanlegierung der zweiten Generation

Projektverantwortliche	Dr.-Ing. Lukas Kluy Stefan Kraus M. Sc.
Laufzeit	Januar 2022 – April 2025
Abteilung	Funktions- und Verbundbauweisen
Förderlinie	ZIM IraSME BMWK

Abstract

Im Projekt DIAMOND werden Medizintechnikprodukte aus der Legierung Ti-13Nb-13Zr, einer Titanlegierung der zweiten Generation, entwickelt, die ohne die kritischen Legierungselemente Aluminium und Vanadium auskommt und die das Einstellen einer großen Bandbreite an mechanischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften erlaubt.

Projektbeschreibung

Im Projekt DIAMOND wurden Medizintechnikprodukte aus der Legierung Ti-13Nb-13Zr (TNZ), einer Titanlegierung der zweiten Generation, entwickelt, die ohne die kritischen Legierungselemente Aluminium und Vanadium auskommt und die das Einstellen einer großen Bandbreite an mechanischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften erlaubt. Ziel war es, eine neue Generation von Implantaten und Osteosyntheseprodukten aus TNZ in einer multidisziplinären Herangehensweise mit einer nanoskaligen Oberflächenstruktur einzustellen. In diesem Teilprojekt wurde ein kontinuierlicher Umformprozess (Continuous-Multidirectional-Swaging) zur Herstellung der Nanostruktur entwickelt. Die Nanostrukturierung zeigte sich besonders sensitiv gegenüber Parametern wie Temperatur, Umformgeschwindigkeit und Umformgrad. Die optimalen

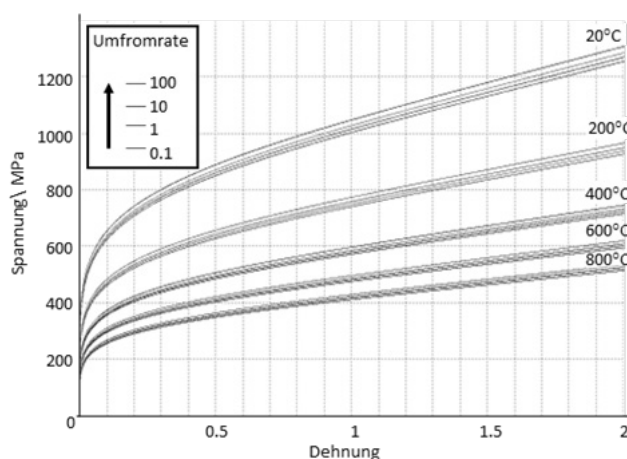
Prozessbedingungen wurden zunächst durch schmiedeähnliche Versuche ermittelt. Anschließend wurde eine NanoTNZ-Knochenplatte hergestellt, die die stabile Produktion einer homogenen Nanostruktur durch die neuartige Prozesskette demonstriert und zugleich die biologischen sowie orthopädischen Anforderungen (homogene Nanostruktur, hohe Festigkeit und dünne Ausführung) erfüllt.

Ergebnisse

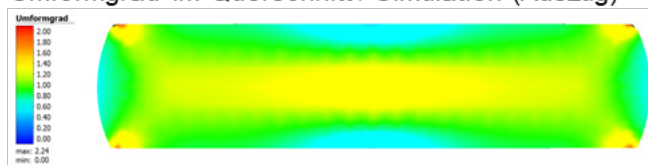
Aufbau der Simulation

Für die virtuelle Prozessauslegung wurde die Umformsimulationssoftware Simufact Forming 2021 mit einem impliziten Solver eingesetzt. Die thermomechanisch gekoppelten dreidimensionalen Finite-Elemente-Simulationen ermöglichten eine detaillierte Bewertung der wirkenden Beanspruchung sowie der Homogenität der Werkstücke in Längs- und Querrichtung. Die Materialmodelle und Prozessparameter wurden auf Basis der am IfW ermittelten Werkstoffkennwerte an den spezifischen Anwendungsfall angepasst. Dabei erfolgte eine Variation der Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur, des Umformgrads und der Umformrate (Abbildung 1). Zusätzlich wurden die tribologischen Bedingungen durch die Modellierung der verwendeten Werkstoff-Schmierstoffpaarungen

Materialdaten



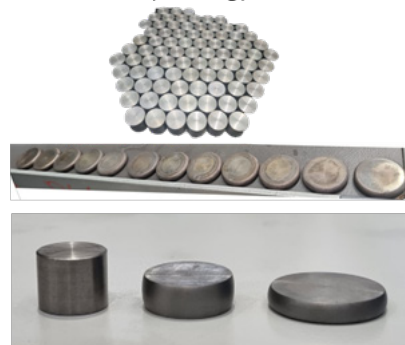
Umformgrad im Querschnitt / Simulation (Auszug)



Parameter

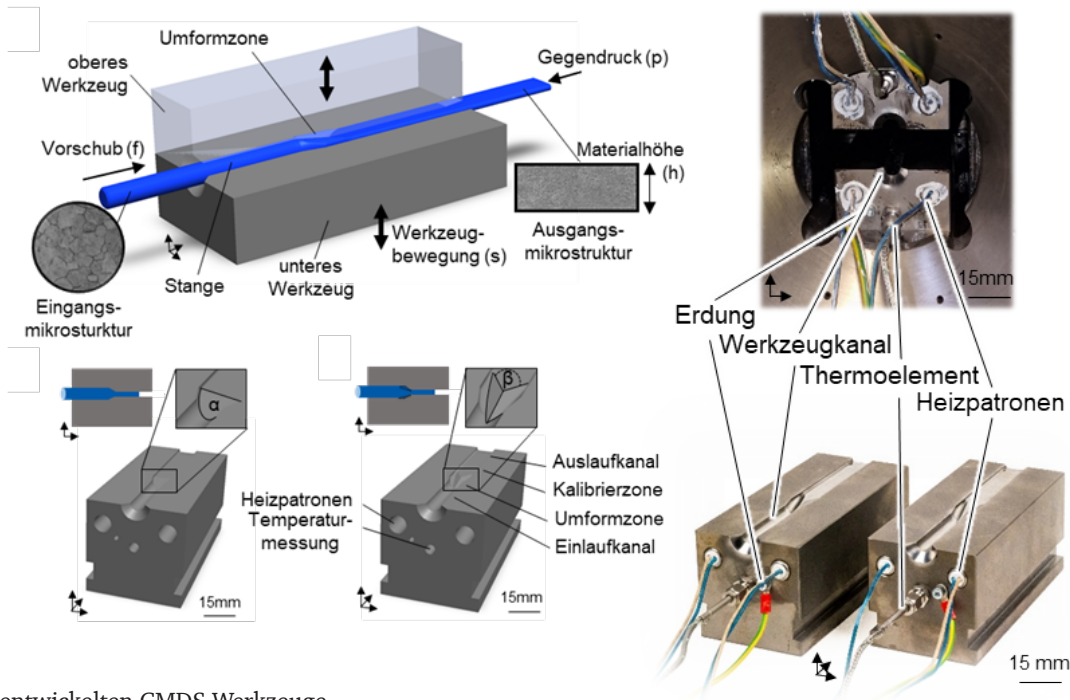
- Temperatur ($20^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$)
- Umformgrad ($0.5 < \phi < 1.5$)
- Umformrate ($0.1 \text{ 1/s} < \dot{\phi} < 1 \text{ 1/s}$)

Schmiedeteile (Auszug)



[1] Schmiedeähnliche Zylinderstauchversuche für die Rekristallisationsversuche

CMDS-Werkzeuge



[2] Die entwickelten CMDS-Werkzeuge

abgebildet, wobei tangentielle, isotrope kinematische Kontaktmodelle zum Einsatz kamen. Die Werkzeuge des Continuous-Multidirectional-Swaging Prozesses (CMDS) wurden als starre Körper mit Wärmeleitung ausgelegt. Zur Nachbildung eines kontinuierlichen Prozesses wurden Umformlängen von 50 mm simuliert. Die Simulationsergebnisse wurden hinsichtlich Konvergenz überprüft und geometrisch sowie analytisch validiert (Abbildung 3, vgl. auch AP4). Für die geometrische Validierung wurde das Gerät GOM ATOS 5 verwendet, mit dem die realen Proben dreidimensional eingescannt wurden. Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment blieben dabei unter 3 %, was eine hohe Übereinstimmung belegt. In der Simulation wurden zunächst verschiedene Werkzeuggeometrien untersucht, um vielversprechende Werkzeuge für die weiterführenden Untersuchungen abzuleiten. Anschließend erfolgte eine systematische Variation des Gegendrucks, der Materialstärke (Reduktion) und der Anzahl der Umformdurchgänge, um eine optimale Prozessroute für eine gleichmäßige Dehnungsverteilung zu entwickeln.

Werkzeuggeometrie

Die Abbildung 2 zeigt die Werkzeuggeometrien des Flach- und Keil-CMDS. Die Flach-CMDS-Probe ist durch einen inhomogenen Umformgrad (inhomogene Werkstoffverdrängung) und die Ausbildung eines Schmiedekreuzes gekennzeichnet. Insbesondere ist die Umformgradverteilung an den Oberflächen inhomogen, wohingegen eine homogene Umformgradverteilung an den Oberflächen zur Ausbildung der Nanostruktur für die Osteosyntheseplatten gewünscht ist. Wird eine Keilgeometrie in die Umformzone eingebracht, so führt diese zu einer homogenen Werkstoffverdrängung. Daher wird die Keil-CMDS-Geometrie für die weiteren Untersuchungen eingesetzt.

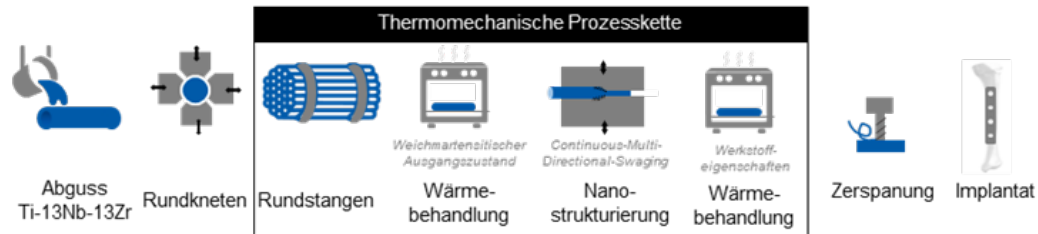
Gegendruck

Der Einfluss des Gegendrucks auf die Dehnungsverteilung ist in der Abbildung 4 zu sehen. Ohne Gegendruck ist die Dehnungsverteilung im Querschnitt inhomogen, was auf eine unzureichende Werkzeugfüllung zurückzuführen ist. Mit zunehmendem Gegendruck wird eine bessere Werkzeugfüllung erreicht. Bei einem Gegendruck von 12 MPa und 24 MPa nimmt die Homogenität der Dehnungsverteilung zu. Neben der Homogenisierung der Dehnungsverteilung wird ein Druckspannungszustand in der Umformzone induziert, der eine schadungsfreie Umformung ermöglicht. Ein Gegendruck von 36 MPa führt zu einer vollständigen Werkzeugausfüllung und einer vergleichsweise homogenen Dehnungsverteilung, auch an den Rändern. Allerdings zeigt die Simulation ein Ausknicken des Stabes vor den CMDS-Werkzeugen, was im realen Prozess zu einem beschädigten Stab führen würde. Für die folgenden Untersuchungen wird ein Gegendruck von 24 MPa gewählt, der einen Kompromiss zwischen Homogenität und Umformbarkeit darstellt.

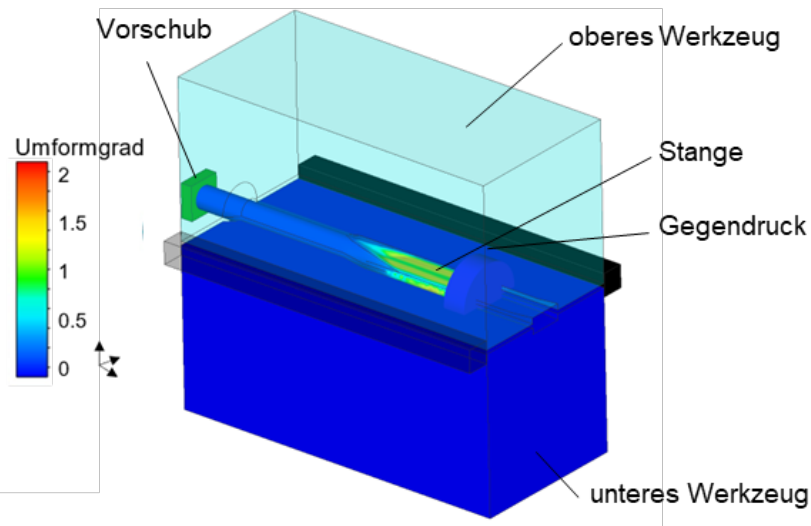
Reduktion und Anzahl der Durchgänge

Um die Homogenität der Dehnungsverteilung zu erhöhen, werden eine unterschiedliche Reduktion (Variation der Materialhöhe durch die Zustellung der Werkzeuge) und Anzahl von Durchgängen (1 bis 2 Pass) bei 24 MPa Gegendruck als Parameter für den Umformgrad und die Dehnungsverteilung untersucht. Die Dehnungsverteilung für die Reduktion von 50 % zeigt eine inhomogene Dehnungsverteilung bei geringer Gesamtdehnung. Wird die Zustellung erhöht und damit die Materialhöhe verringert, so steigt auch die Dehnung. Bei einer Reduktion von 60 % zeigt die Simulation eine homogene Dehnungsverteilung. Bei 65 % Reduktion kommt es zum Fließen des Materials in die Werkzeughälften und zur Flügelbildung, weshalb dieser Weg nicht weiterverfolgt wird. Wird die Stange mehrfach durch das

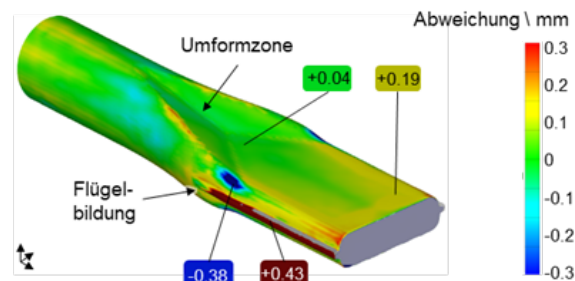
Prozesskette zur Herstellung von NanoTNZ



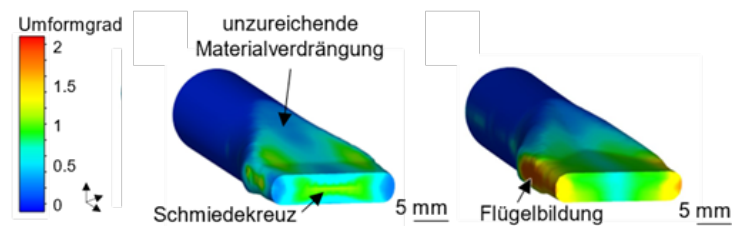
FEM Simulation



Validierung



Flach- und Keil-CMDS

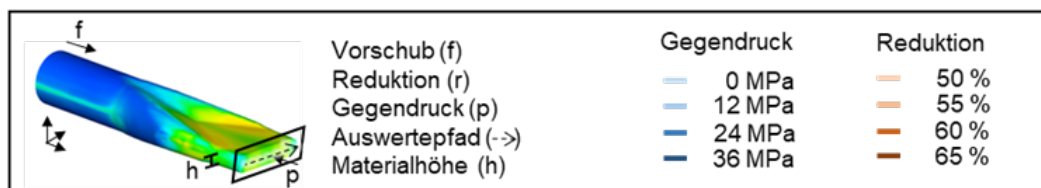
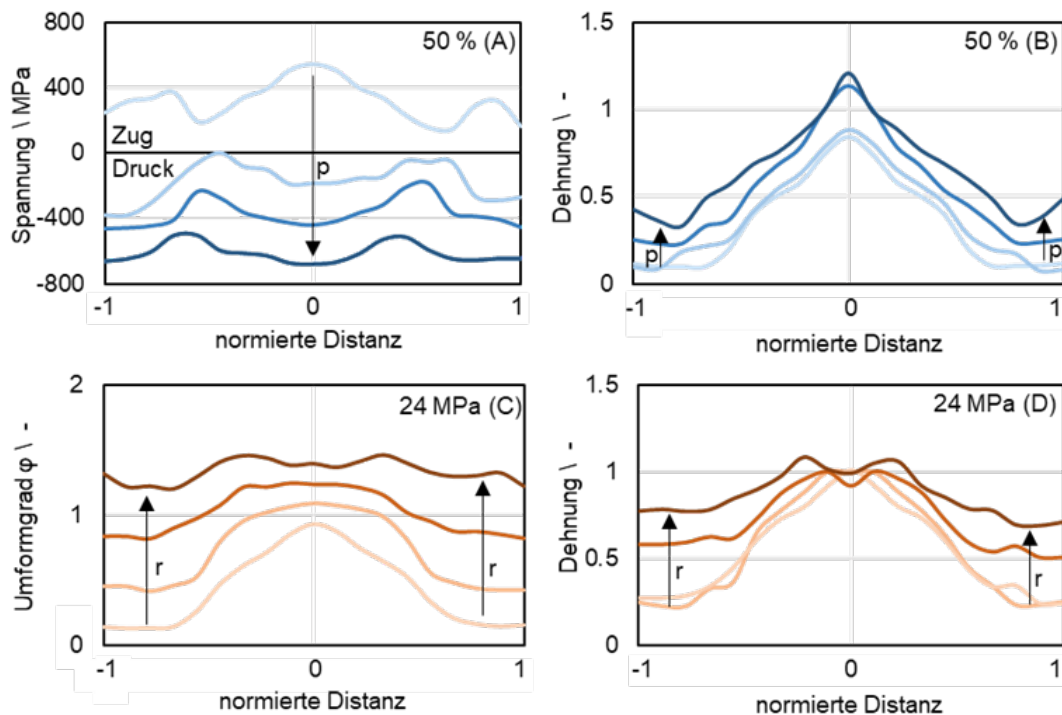
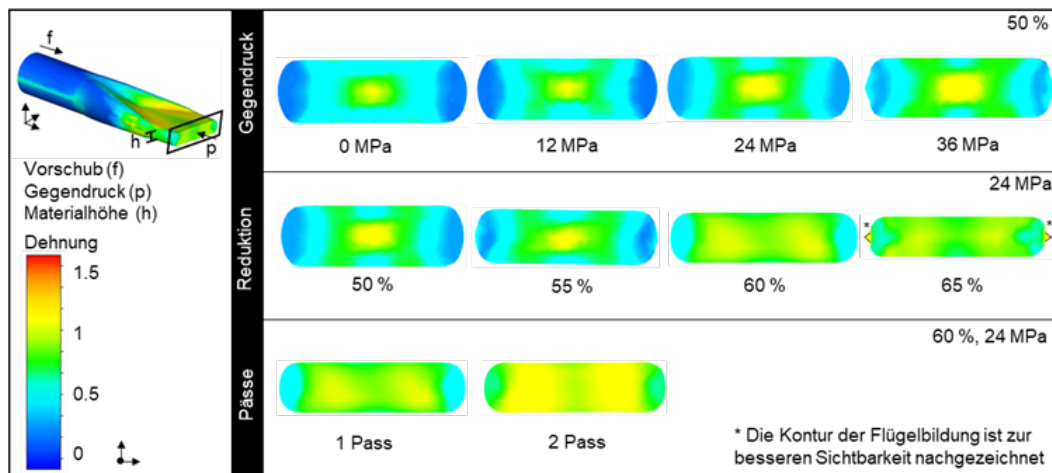


[3] Prozesskette und FEM mit Validierung, Geometrievergleich zwischen realer Probe und simulierter Probe

Werkzeug gegeben, steigt nach dem Superpositionsprinzip die Gesamtdehnung. Insbesondere zeigt 2-Pass-CMDS eine homogenere Dehnungsverteilung als 1-Pass-CMDS.

Fazit

Die Simulationsergebnisse führten zur Identifikation einer optimalen Prozessstrategie für 1-Pass-CMDS. Bei einem Gegendruck von 24 MPa und einer Reduktion von 60 %, um sowohl eine homogene Dehnungsverteilung als auch einen hohen Umformgrad zu erzielen.

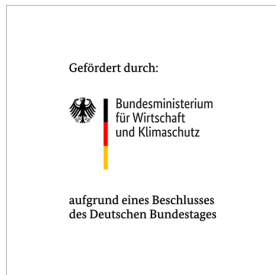


[4] Einfluss der Parameter Gegendruck, Reduktion und Pässe auf die Homogenität der Dehnungsverteilung und auf den Umformgrad

Danksagung

Das Projekt DIAMOND wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) gefördert. Zusätzlich gilt der Dank an die Projektpartner ADVANTIQX, Institut für Werkstoffe der TU Braunschweig und Schweizer Feinwerktechnik.“

Gefördert durch



Projektpartner

