

## Ermüdungseigenschaften von additiv gefertigten Titanstrukturen im Hinblick auf den Einsatz im menschlichen Körper

**Dr.-Ing. Andre Riemer** *Universität Paderborn, Fachgruppe Angewandte Mechanik*

**Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard** *Universität Paderborn, Fachgruppe Angewandte Mechanik*

**Dr.-Ing. Britta Schramm** *Universität Paderborn, Fachgruppe Angewandte Mechanik*

### Zusammenfassungen

Das additive Fertigungsverfahren Laserstrahlschmelzen eignet sich in besonderer Weise zur Herstellung von komplexen Strukturen geringer Stückzahlen. Folglich ist dieser Prozess prädestiniert für die Fertigung von Implantaten und Prothesen. Mit Hilfe des Laserstrahlschmelzens lassen sich Strukturen anspruchsvoller Geometrie auf relativ einfache Weise – ausgehend von einem entsprechenden CAD-Datensatz – realisieren. Dabei können metallische Werkstoffe, wie beispielsweise die hochfeste und biokompatible Titanlegierung TiAl6V4, zum Einsatz kommen. Im Hinblick auf die Ermüdungseigenschaften werden an Kompaktzugproben Schwellenwerte gegen Ermüdungsrissoausbreitung und Rissgeschwindigkeitskurven experimentell ermittelt. Dabei zeigt sich, dass bei einer additiv gefertigten Titanstruktur deutlich höhere Risswachstumsraten auftreten als bei vergleichbarem Grundmaterial. Durch entsprechende Wärmebehandlungsverfahren kann die Rissempfindlichkeit der Titanlegierung TiAl6V4 jedoch deutlich gesenkt werden, so dass die bruchmechanischen Kennwerte der additiv gefertigten Strukturen denen des Grundmaterials entsprechen. Beschrieben werden im Rahmen dieses Beitrags zudem Lebensdaueruntersuchungen an einer Hüftprothese. Dabei zeigt sich, dass mittels additiver Fertigung mit anschließender Wärmebehandlung hochfeste Prothesen hergestellt werden können.

The additive manufacturing process Selective Laser Melting (SLM) is well suited for economic production of complex and individual parts in small batches (e.g. hip implants). The melting system in this work was used to process parts consisting of the high-strength and biocompatible titanium alloy Ti-6-4. The presence of the cyclic loadings within the human body requires investigations in terms of the crack growth behavior and the resulting lifetime of the product. For that purpose, fatigue crack growth rate data for various material conditions were obtained in experiments. Based on these information numerical studies regarding crack growth and lifetime of the hip implant, in the as-built and heat treated condition, were performed. It was found that the significant improvement of the fatigue crack growth performance and the increase of the lifetime of a pre-cracked part can only be achieved by elimination of residual stresses using heat treatments.

**Keywords** Additive Fertigung, Additive Manufacturing, Hüftprothese, Implantat, Schwellenwert gegen Ermüdungsrissoausbreitung, Titanwerkstoffe, Wärmebehandlung, fatigue crack growth threshold, heat treatment, hip implant, titanium alloy

URN: urn:nbn:de:0009-2-42949

### 1. Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die Eignung additiv hergestellter Bauteile für den Einsatz im menschlichen Körper zu prüfen und zu forcieren. Hierzu ist zunächst die Kenntnis der statischen bzw. zyklischen Materialkennwerte und -kennkurven der mittels Laserstrahlschmelzens hergestellten Strukturen erforderlich. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das menschliche Skelett häufig zeitlich veränderlichen Belastungen, wie beim Lastfall „Gehen“, ausgesetzt ist, besitzt eine Auslegung nach den Kriterien der Ermüdungsfestigkeit und der Bruchmechanik einen besonders hohen Stellenwert. Darüber hinaus neigt der Prozess Laserstrahlschmelzen verfahrensbedingt zu Eigenspannungen und zu

Materialdefekten, wie Mikroporen und Kaltrissen. Diese begünstigen die Rissausbreitung unter zyklischer Belastung. Damit zeigt sich die hohe Relevanz der oft vernachlässigten bruchmechanischen Betrachtung additiv gefertigter Bauteile. Ein Teilziel dieser Arbeit ist daher das Ermüdungsrissowachstum näher zu beleuchten.

Eine hinsichtlich des Leichtbaus optimale Auslegung von Strukturen erfordert einen möglichst hohen Materialausnutzungsgrad. Ist dieser erschöpft, so kann die Steigerung der Belastbarkeit einer Struktur lediglich durch eine Erhöhung der Materialkennwerte erfolgen. Hierzu werden in dieser Arbeit entsprechende Maßnahmen, wie die Anwendung von Wärmebehandlung und Nachverdichtungsverfahren, ergriffen. Darauf basierend sollen Aussagen zum Einfluss unerwünschter Effekte, wie Eigenspannungen und Poren, auf die Materialdaten abgeleitet werden. Vor dem Hintergrund der prozessintrinsischen Defekte ist darüber hinaus für ausgewählte thermische Nachbehandlungsverfahren zu prüfen, wie sich diese auf die Lebensdauer eines Bauteils bei einer vorgegebenen Defektart, -form und -größe auswirken.

## 2. Laserstrahlschmelzprozess

Der Laserstrahlschmelzprozess, auch Selective Laser Melting (SLM) genannt, gehört nach [1] zu der Gruppe von Additiven Fertigungsverfahren, welche die Generierung von Bauteilen aus der festen Phase umfasst. Die Herstellung von Bauteilen mittels SLM erfordert die Modellierung des Bauteils und der zugehörigen Stützstruktur, die Definition der entsprechenden Prozessparameter sowie die Zerlegung des Bauteils und der Stützstruktur in einzelne Schichten. Im anschließenden Bauvorgang werden die Prozessschritte Beschichten, Belichten und Absenken wiederkehrend durchlaufen. Bild 1 veranschaulicht die Vorgehensweise bei der Herstellung von Bauteilen mittels SLM.

Die Basis der Bauteilherstellung stellt der 3D-Datensatz des zu fertigenden Bauteils dar. Die entsprechenden Geometrieinformationen können entweder mit einer 3D-CAD-Software erzeugt oder aus digitalisierten Vermessungsdaten von physischen Objekten abgeleitet werden. Zwecks Weiterverarbeitung erfolgt eine Ausgabe der 3D-Informationen im STL-Format (Standard Transformation Language).

Die Generierung der erforderlichen Stützstrukturen kann bereits in der CAD-Software während der Bauteilmodellierung erfolgen, lässt sich jedoch durch den Einsatz spezieller Programme, der sogenannten Stützengeneratoren, erheblich vereinfachen. Der Grund hierfür liegt zum einen in der automatischen bzw. halbautomatischen Modellierung von Stützstrukturen und zum anderen in den Programmdateibanken mit einer Vielzahl unterschiedlicher Typen von Stützelementen, auf die – je nach Anforderung – zugegriffen werden kann. Zu den prominentesten Vertretern der Stützstrukturtypen zählen die Block-, Punkt-, Netz-, Kontur- sowie Linien-Supports [2, 3]. Die Herstellung von Bauteilen im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt unter Einsatz von Block-Supports. Zur Erzeugung der Stützstrukturen findet die Software „Magics 14.0“ von der Firma Materialise Anwendung. Bei der Ausgabe der 3D-Informationen der Stützen wird – ähnlich wie zuvor beim Bauteil – ein STL-Datensatz erzeugt.

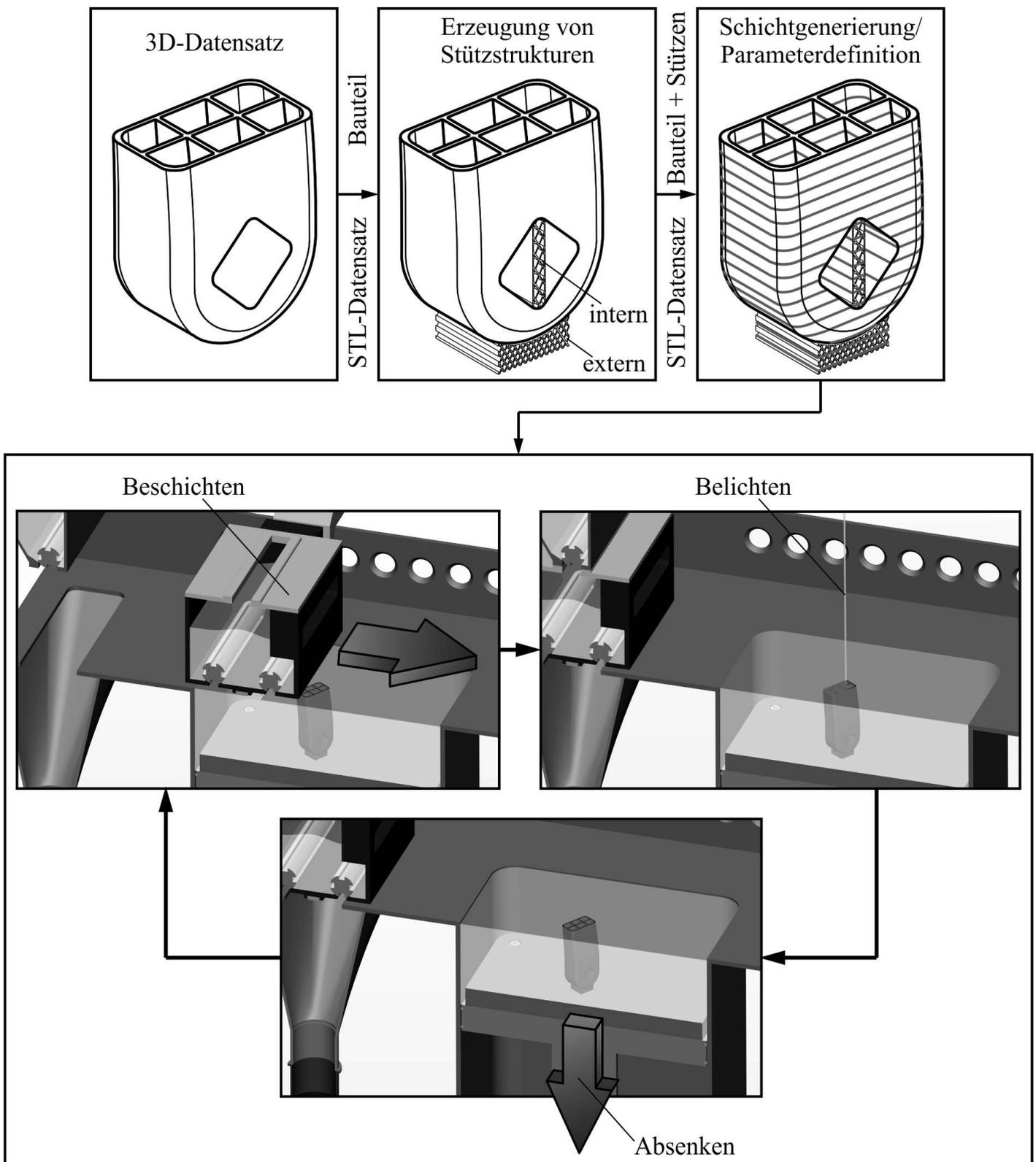


Bild 1 Prinzipielle Vorgehensweise beim SLM-Verfahren

Die Realisierung der weiterführenden Datenaufbereitung findet mithilfe der Software „MTT AutoFab“ von der Firma Marcam Engineering statt. Darin erfolgt die Auswahl der Materialdatei entsprechend dem verwendeten Werkstoff und den gestellten Anforderungen. Die Materialdatei beinhaltet Informationen über die Prozessparameter, die Belichtungsstrategie und die Belichtungsabfolge, welche je nach Anforderung variiert werden können. Im Anschluss findet das Zerlegen des Bauteils inklusive der Stützstruktur in einzelne Schichten, Bild 1, sowie die Positionierung des Bauteils auf der Substratplatte statt. Die hieraus resultierenden Informationen münden in einem Datensatz im MTT-Datenformat, welcher die Kompatibilitätsbedingungen der Steuerungssoftware der Strahlschmelzanlage erfüllt. Vor dem Beginn des Herstellungsprozesses ist die anlagentechnische Präparation, wie die Einstellung der Position der Substratplatte, der Auftrag der ersten Metallpulverschicht, die Inertisierung der Prozesskammer und das Aufheizen der Montageplattform auf die Betriebstemperatur, erforderlich. Der eigentliche

Fertigungsprozess beim Laserstrahlschmelzen kann in drei grundlegende Prozessschritte nach Bild 1 unterteilt werden:

**Beschichten:** Dieser Arbeitsschritt beinhaltet das Auftragen des Metallpulvers, entweder auf die Bauplattform bei der Erstbeschichtung oder auf eine zuvor aufgetragene sowie bereits belichtete und erstarrte Metallpulverschicht bei allen nachfolgenden Beschichtungsvorgängen.

**Belichten:** Durch den Eintrag der Laserstrahlung erfährt das aufgetragene Metallpulver in Bereichen, die gemäß dem 3D-Datensatz zum Bauteilvolumen gehören, ein lokales Aufschmelzen. Die Einschmelztiefe ist hierbei größer als die Tiefe einer Pulverlage, was zu einer schmelzmetallurgischen Verbindung mit dem darunterliegenden – bereits erstarrtem – Material führt [4].

**Absenken:** Die Zustellung erfolgt durch die Absenkung der Bauplattform und damit des gesamten Pulverbetts um genau eine Schichtdicke. Der auf diese Weise entstandene Raum bietet Platz für die Aufnahme des Metallpulvers im nachfolgenden Beschichtungsvorgang.

Diese Prozessschritte werden in der beschriebenen Abfolge bis zur Fertigstellung des Bauteils iterierend ausgeführt. Im Anschluss an den Herstellungsvorgang kann das in den Überlaufbehältern sowie das im Bauraum vorliegende Metallpulver gefiltert und wiederverwertet werden. Die Entfernung von Stützstrukturen vom Bauteil erfolgt mechanisch. Die durch die Anbindung der Stützen resultierende Oberflächenrauheit kann mittels Sandstrahlens reduziert werden.

### 3. Bruchmechanische Charakterisierung

Zur bruchmechanischen Charakterisierung rissbehafteter Bauteile muss ausgehend von der globalen Bauteilbeanspruchung die Beanspruchungssituation an der Rissfront ermittelt werden. Die ermittelten Beanspruchungsdaten werden im nächsten Schritt den bruchmechanischen Materialkennwerten des eingesetzten Werkstoffs gegenübergestellt. Dabei lässt diese Vorgehensweise Aussagen zu, ob der betrachtete Riss ausbreitungsfähig ist oder nicht. Für den Fall, dass Risswachstum vorliegt, lässt sich abschätzen, ob die Rissausbreitung stabil oder instabil verläuft. Liegt ein stabiles Risswachstum vor, so lässt sich eine Prognose über die bis zum Bruch zu ertragende Lastzyklenzahl aufstellen. Während die Beanspruchungssituation an der Rissfront analytisch bzw. numerisch bestimmt werden kann, ist für die Ermittlung bruchmechanischer Materialkennwerte die experimentelle Untersuchung unabdingbar. Die hierzu verwendeten Proben werden aus der Titanlegierung TiAl6V4 an der SLM-Anlage SLM 250<sup>HL</sup> (SLM Solutions GmbH) erzeugt. Ein Yttrium-Faser-Laser mit einer maximalen Leistung von 400 Watt stellt den Kern dieser Anlage dar. Die bei der Herstellung der Proben verwendeten Schichtdicken betragen 30 µm. Die mittlere Pulverpartikelgröße beträgt hierbei ca. 40 µm. Zur Vermeidung einer Kontamination des Werkstoffs wird die Baukammer der SLM-Anlage mit Argon geflutet.

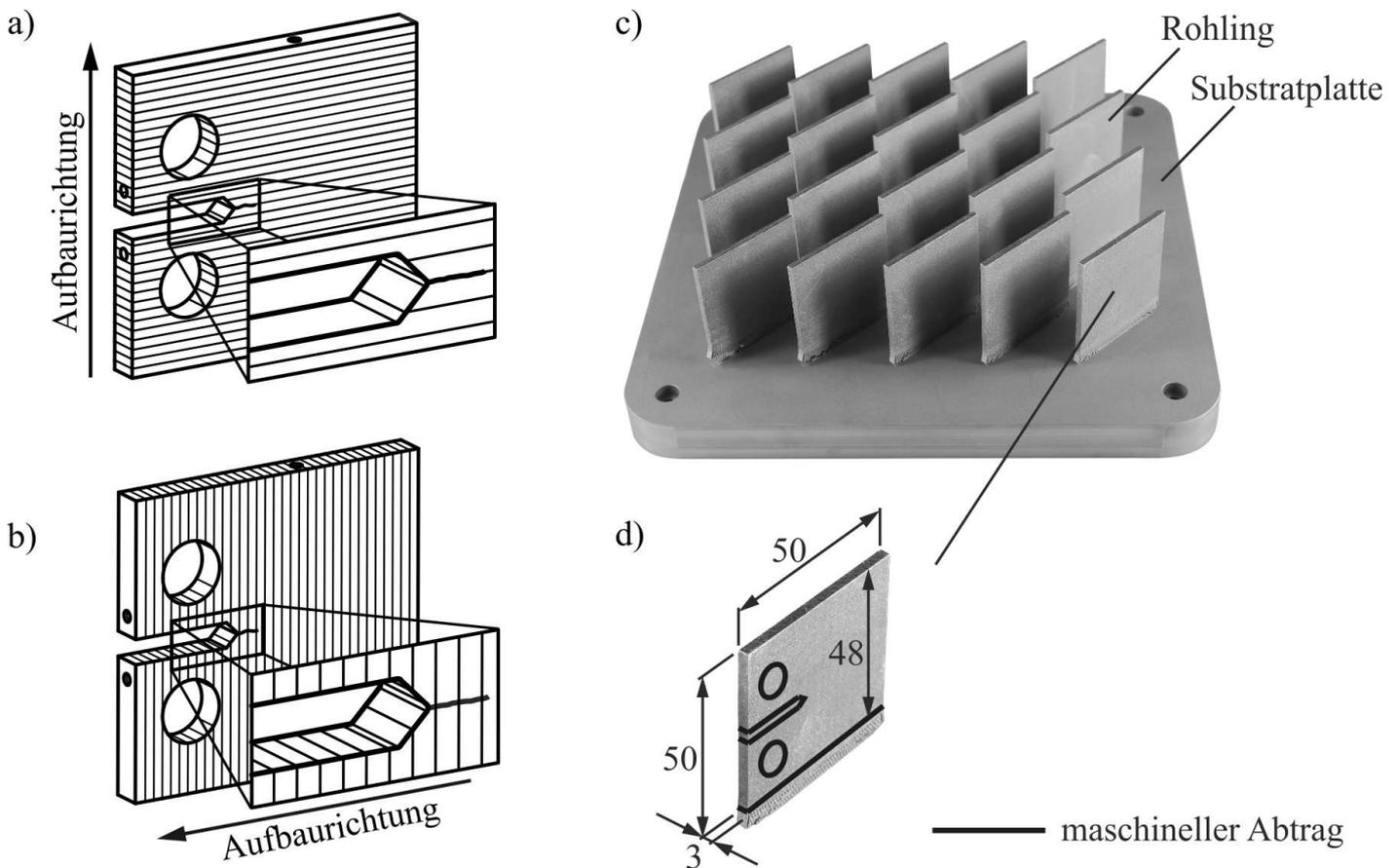


Bild 2 Definition der Anordnung von Baurichtung und Rissrichtung in CT-Proben zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit von Rissfortschrittsdaten

- a) Rissrichtung senkrecht zur Baurichtung
- b) Rissrichtung parallel zur Baurichtung
- c) Rohlinge zur Entnahme von CT-Proben auf der Substratplatte
- d) CT-Probe

Zur Analyse der Richtungsabhängigkeit der bruchmechanischen Kennwerte werden Proben mit zwei unterschiedlichen Aufbaurichtungen hergestellt. Zum einen soll der Fall untersucht werden, bei dem der Ausgangsriss senkrecht zur Aufbaurichtung, Bild 2a, und zum anderen bei dem der Riss parallel zur Aufbaurichtung, Bild 2b, angeordnet ist. Bild 2c zeigt mehrere Probenrohlinge, wie sie auf einer Substratplatte aufgebaut wurden. Bei der Modellierung der Rohlinge wird eine Zugabe im Bereich der Stützstrukturen gewährt, welche der restlosen Entfernung der Stützen dient. Die Einbringung der Endkontur erfolgt dabei mechanisch, nach Bild 2d, im Anschluss an die Herstellung.

## 4. Einflüsse auf das Ermüdungsrisswachstum

Die Ermittlung der Rissgeschwindigkeitskurven und der Schwellenwerte gegen Ermüdungsrisswachstum erfolgt nach der ASTM E647. Dabei werden Versuche mit abfallendem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K$  (zur Ermittlung des unteren Bereichs der Rissgeschwindigkeitskurve und des Schwellenwertes  $\Delta K_{th}$ ), als auch mit ansteigendem  $\Delta K$  (zur Ermittlung der Rissgeschwindigkeitskurve im oberen Bereich) durchgeführt. Die Versuchsbeschreibung findet sich z.B. in [5, 6, 7].

Das Bild 3c zeigt Rissfortschrittsdaten für eine laserstrahlgeschmolzene Titanlegierung TiAl6V4. Hierbei stellt die Datenreihe „Bauzustand“ den unbehandelten Materialzustand dar. Dem gegenüber zeigt der auf konventionelle Weise hergestellte Werkstoff „Grundmaterial A, B, C und D“<sup>1</sup> ein deutlich besseres Rissfortschrittsverhalten. Der mittlere Schwellenwert  $\Delta K_{th}$  gegen Ermüdungsrissausbreitung bei den in Bild 3c gezeigten Datenreihen „Bauzustand“ beträgt  $1,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Demgegenüber wurde in [8] und [9] für ein konventionell hergestelltes Material ein Thresholdwert von  $\Delta K_{th} = 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ermittelt. Somit liegen die Kennwerte für den konventionell gefertigten Werkstoff um einen Faktor von etwa 3 höher als für den laserstrahlgeschmolzenen Werkstoff.

Die Optimierung der bruchmechanischen Werkstoffkennwerte laserstrahlgeschmolzener Bauteile aus TiAl6V4 erfolgt durch gezielte Maßnahmen, wie Abbau von Eigenspannungen, Minimierung der Porengröße sowie Einstellung einer bestimmten Mikrostruktur. Bild 3a fasst die zu diesem Zweck verwendeten, thermischen Nachbehandlungsverfahren sowie deren wesentlichen Prozessparameter zusammen.

Die Wärmebehandlung bei einer Temperatur von 800°C findet unter Argon-Schutzgasatmosphäre statt. Hierbei werden die Bauteile bis auf einen Wert von 800°C erwärmt, auf diesem Niveau für 2 h gehalten und daraufhin einer Ofenabkühlung unterzogen. Diese Wärmebehandlung erfolgt unterhalb der  $\beta$ -Transus-Temperatur und dient daher dem reinen Eigenspannungsabbau – ohne einer Änderung der Mikrostruktur.

Im Rahmen des Heißisostatischen Pressens befinden sich laserstrahlgeschmolzene Bauteile in einer Druckkammer, welche mit Argon-Schutzgas gefüllt ist. In dieser Kammer werden die CT-Proben – neben einer hohen Temperatur von 920°C – einem zusätzlich auf das Bauteil einwirkenden isostatischen Druck von 1000 bar für eine Haltezeitdauer von 2 h ausgesetzt. Dabei werden Eigenspannungen abgebaut und gleichzeitig Diffusionsvorgänge sowie örtliche plastische Deformationen eingeleitet. Diese führen schlussendlich zu einer Reduktion der Poren und der damit einhergehenden Verdichtung des Werkstoffs [10].

Die Wärmebehandlung bei 1050°C wird unter Vakuum<sup>2</sup> durchgeführt. In diesem Fall wird die Probe für 2 h auf einem Temperaturniveau von 1050°C gehalten und anschließend im Ofen abgekühlt. Das Ziel dieser Wärmebehandlung besteht – neben dem Eigenspannungsabbau – darin, einen größeren Anteil der  $\beta$ -Phase zu erwirken und durch die Kornneubildung ein feines globulares Gefüge, welches nach [11] zu einer besseren Verformbarkeit bei Raumtemperatur führt, zu erhalten.

Bild 3b veranschaulicht die Ergebnisse der EBSD-Analyse<sup>3</sup> in Abhängigkeit des Wärmebehandlungsverfahrens. Dabei zeigt der laserstrahlgeschmolzene Werkstoff im „Bauzustand“ ein feines, nadelförmiges Werkstoffgefüge. Dieses als  $\alpha'$ -Martensit bezeichnete Werkstoffgefüge entsteht infolge der prozessspezifischen raschen Abkühlung, welche keine Keimbildungs- sowie Kornwachstumsprozesse erlaubt. Kennzeichnend für diesen Materialzustand ist der geringe Volumenanteil der  $\beta$ -Phase. Nach einem Spannungsarmglühen bei 800°C liegt eine nahezu identische Mikrostruktur wie für den „Bauzustand“ vor. Der Volumenanteil der  $\beta$ -Phase nach dieser thermischen Behandlung bleibt weiterhin gering. Im Kontrast hierzu zeigt das Gefüge im „HIP“-Zustand eine deutliche Kornvergrößerung. Globulare und lamellare Körner lagern sich in diesem Fall nahezu ausschließlich in der  $\alpha$ -Phase an. Für den Werkstoffzustand nach einer Wärmebehandlung bei 1050°C zeigt sich schließlich eine Erhöhung des Volumenanteils an  $\beta$ -Titan sowie eine weitere Vergrößerung globularer Körner.

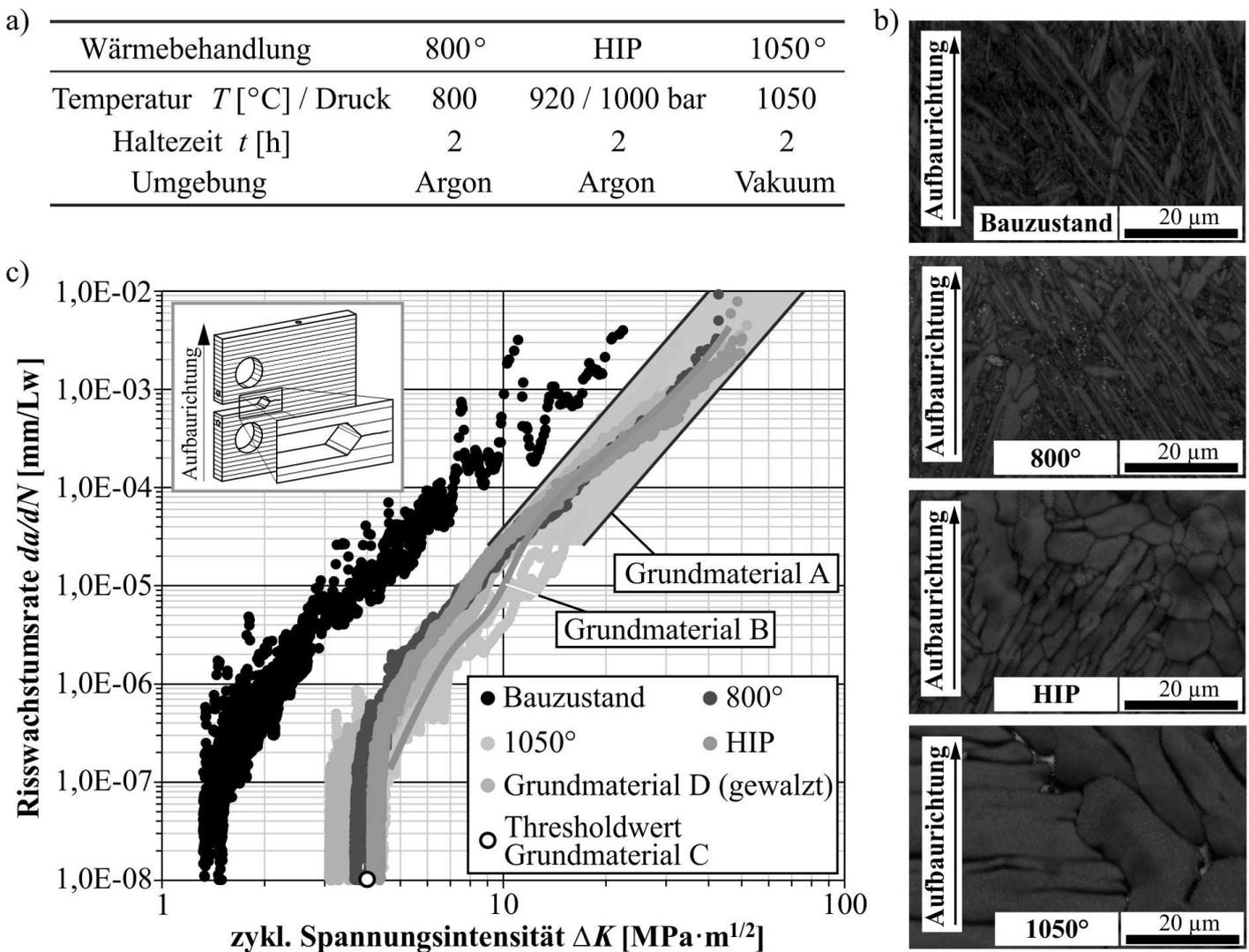


Bild 3 Optimierung des Rissfortschrittsverhaltens von TiAl6V4 durch Wärmebehandlung

a) Daten thermischer Nachbehandlungsverfahren

b) Mikrostruktur von TiAl6V4 in Abhängigkeit vom Wärmebehandlungsverfahren, s.a. [12]

c) Rissfortschrittsdaten von TiAl6V4 diverser Materialzustände

Die für alle wärmebehandelten Zustände ermittelten Rissfortschrittsdaten stellen sich gegenüber dem unbehandelten Zustand als deutlich verbessert dar, Bild 3c. Während jedoch die Daten für den Materialzustand „1050°“ starker Streuung unterliegen, zeigen die Zustände „800°“ und „HIP“ glatte Kurvenverläufe sowie eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messdaten bei einem gleichzeitig hohen Schwellenwert gegen Ermüdungsrissausbreitung. Bild 3c verdeutlicht ebenfalls, dass die Rissfortschrittsdaten aus Versuchen an wärmebehandelten Proben den für das Referenzmaterial aufgenommenen Daten entsprechen bzw. diese überschreiten.

Beim Vergleich der Schwellenwerte gegen Ermüdungsrissausbreitung für unterschiedliche Orientierungen, Bild 4, zeigt sich, dass eine Wärmebehandlung zwingend erforderlich ist, um eine deutliche Steigerung der Thresholdwerte zu erreichen. Damit erhöht sich auch die vom Material tolerierbare Defektgröße, ab welcher eine Ermüdungsrissausbreitung einsetzt. Aus bruchmechanischer Sicht ist es daher fast unerheblich, welches der vorgestellten Wärmebehandlungsverfahren Anwendung findet – es ist einzig und allein wichtig, die laserstrahlgeschmolzenen Bauteile aus TiAl6V4 einer thermischen Nachbehandlung zu unterziehen.

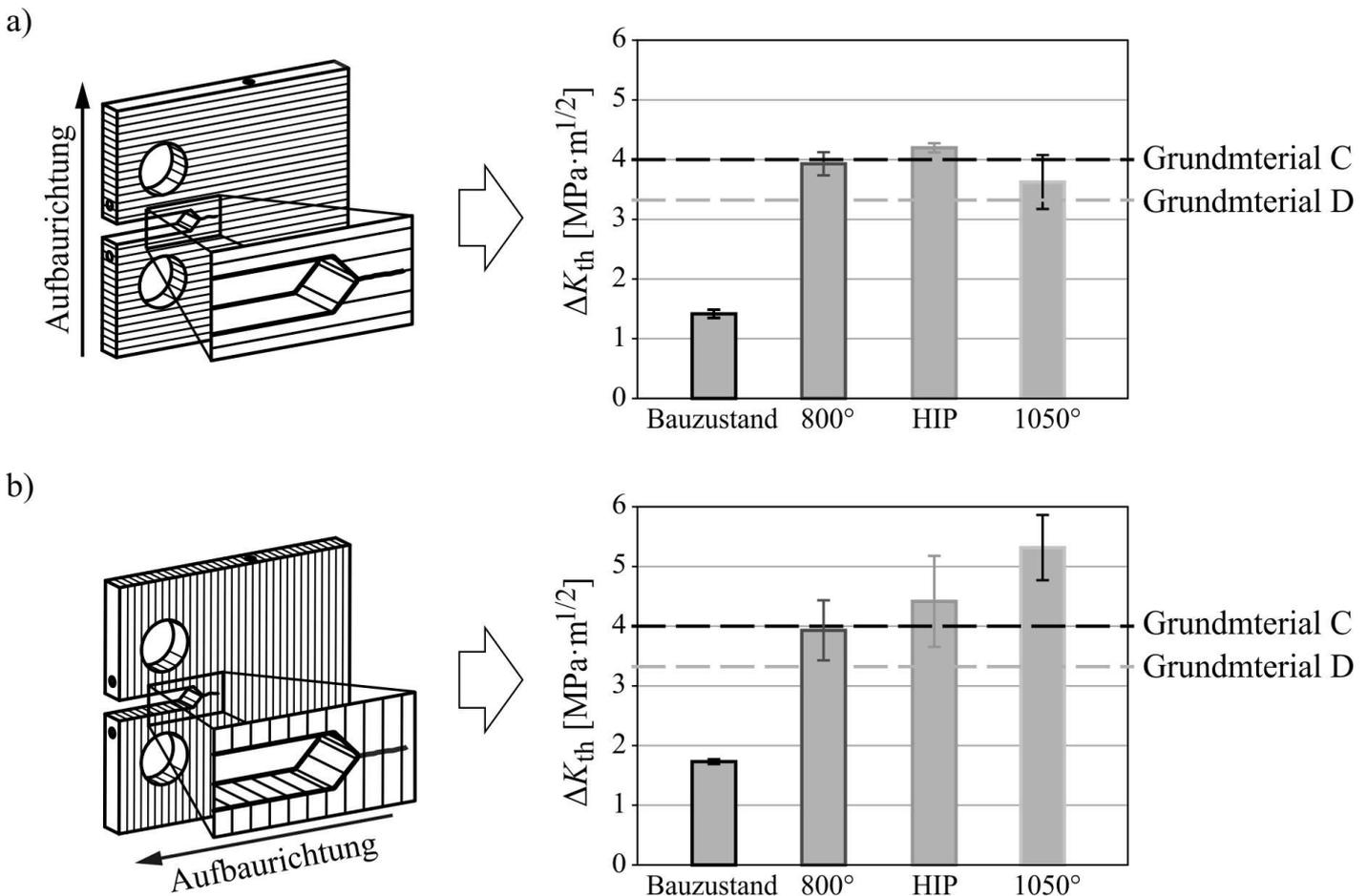


Bild 4 Thresholdwerte des TiAl6V4 – unterschiedliche Wärmebehandlungen und Aufbaurichtungen

- a) Ergebnisse für Rissrichtung normal zur Aufbaurichtung  
 b) Ergebnisse für Rissrichtung parallel zur Aufbaurichtung

Die endgültige Auswahl des Wärmebehandlungsverfahrens muss jedoch auch unter einer ganzheitlichen Betrachtung des Werkstoffverhaltens vorgenommen werden. Das bedeutet, dass neben dem Risswachstumsverhalten auch die Rissinitiiierung und damit die klassischen ermüdungsrelevanten Materialkennwerte Berücksichtigung finden müssen.

## 5. Einflüsse der Wärmebehandlung auf die Bruchlastspielzahl

Untersuchungen zur Einordnung des Einflusses der thermischen Nachbehandlung auf das Ermüdungsverhalten werden von LEUDERS durchgeführt und in [12] im Detail erläutert. Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden darin Schwingproben einer konstanten zyklischen Wechsellast bis zum Eintreten eines Bruches ausgesetzt. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Ergebnisse in Form gemittelter Bruchlastspielzahlen zusammen.

Werkstoffzustand	Bauzustand	800°	HIP	1050°
Bruchlastspielzahl NB	27.000	93.000	> 2·10 <sup>6</sup>	290.000

Tabelle 1: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Bruchlastspielzahl bei einem Lastniveau von 600 MPa [12]

Die Ergebnisse in Tabelle 1 verdeutlichen, dass eine einfache Wärmebehandlung bei 800°C entscheidend kritischere Bruchlastspielzahl liefert im Vergleich zum „HIP“-Zustand. Während die Bruchlastspielzahl im 800°-Zustand, trotz des Abbaus von Eigenspannungen, nur geringfügig gegenüber den Werten für den „Bauzustand“ steigt, zeigt das Reduzieren der Poren mittels „HIP“ deutliche Wirkung. So wird für den „HIP“-Zustand ein Dauerfestigkeitskennwert entsprechend einem Kennwert für konventionell hergestelltes

Material ermittelt [7]. Als Fazit bleibt festzuhalten, dass Poren in Laserstrahlschmelzbauteilen den größten Einflussfaktor auf die Initiierungslebensdauer dieser Strukturen darstellen.

## 6. Numerische Lebensdaueruntersuchungen an einer Hüftprothese

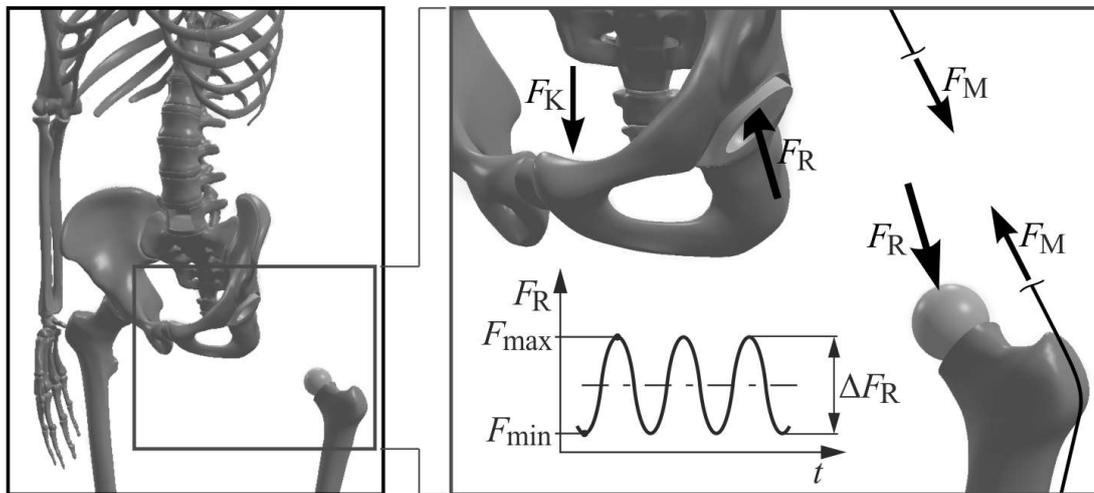
Individuelle Hüftprothesen zeichnen sich durch eine gezielte Anfertigung und unter Umständen eine komplexe Struktur aus. Durch diese Bedingungen sind Prothesenschäfte prädestiniert für eine Fertigung mittels Laserstrahlschmelzens. Die Hüftprothesen stellen lasttragende Strukturen dar, bei welchen der Bruch auszuschließen, während die Bewegungsfreiheit des Menschen sicherzustellen ist. Befinden sich im Anschluss an die Fertigung prozessbedingt Initialrisse im Material, so kann die vorliegende zyklische Belastung zum Risswachstum und somit zum Bruch führen.

Das Ziel dieser Studie ist daher zu prüfen, wie sich der Materialzustand – hier Bau- und 800°- Zustand – und damit der Eigenspannungszustand auf die Restlebensdauer laserstrahlgeschmolzener Strukturen auswirken. Die für die Simulation erforderlichen Rissfortschrittsdaten, Bild 3c, werden mithilfe des FORMAN/METTU-Ansatzes beschrieben. Im Anschluss erfolgt eine Implementierung dieser Daten in die Software ADAPCRACK3D [13].

### Lastannahmen

Im Rahmen der numerischen Simulation erfolgt die Betrachtung des Lastfalls „Gehen“. Die schrittweise Fortbewegung des menschlichen Körpers führt zu einer zyklischen Belastung der Hüftprothese bei einem Spannungsverhältnis von etwa  $R = 0,1$ , Bild 5a. Der Betrag dieser Last resultiert aus der Masse des Körpers, die hierbei mit 80 kg angenommen wird, abzüglich der Masse des Beins, welches etwa 20 % der Gesamtmasse darstellt [14, 15].

a)



$F_M$ : Muskelkraft

$F_K$ : Körpergewichtskraft

$F_R$ : Hüftreaktionskraft

b)

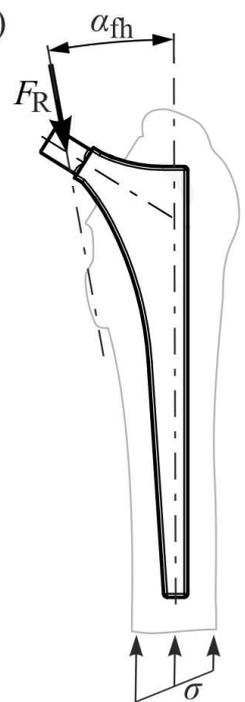


Bild 5 Beanspruchungssituation an der Hüftgelenkprothese

a) Lastfall „Gehen“ und der resultierende Verlauf der Hüftreaktionskraft

b) Annahme der Belastungen am Prothesenschaft

Für den Winkel  $\alpha_{fh}$  zwischen der Schaftachse des Femurs und der Hüftreaktionskraft  $F_R$ , Bild 5b, werden  $10^\circ$  angesetzt. Dieser Wert entspricht dem Winkel, unter welchem experimentelle Prüfungen der Prothesen stattfinden [14]. Das für die Risswachstumssimulation verwendete Implantat besitzt eine einfache Geometrie, welche bezüglich der Rissausbreitung zweckdienlich und hinsichtlich der Bauteildimension realitätsnah gewählt ist.

Der Angriffspunkt der Hüftreaktionskraft  $F_R$  wird entsprechend Bild 5b und Bild 6 zentral im konisch abgesetzten Bereich des Schafthalses angesetzt. Der Betrag der Hüftreaktionskraft  $F_R$  ergibt sich nach der

statischen Betrachtung des Gehvorgangs entsprechend PAUWELS [16, 17] zu 2150 N. Alternativ lässt sich die Belastung für diesen Lastfall aus den Studien der Arbeitsgruppe um BERGMANN ableiten [18].

### *Randbedingungen und FE-Modell*

Das im Halsbereich des Prothesenschafts vorliegende Biegemoment stellt eine kritische Belastung, welche das Spannungsmaximum an der Oberfläche aufweist, dar. Somit ist im Rahmen der Rissausbreitungssimulation speziell der Bereich des Prothesenhalses von besonderem Interesse. Vor diesem Hintergrund wird das CAD-Modell des Prothesenschafts um insgesamt 100 mm verkürzt und auf der gesamten geschnittenen Fläche entsprechend Bild 6 gelagert. Dabei besitzt diese Lagerungssituation keinen Einfluss auf die Spannungsverteilung im Halsbereich der Prothese, da die vorliegenden Unstetigkeiten sowie Spannungsüberhöhungen über die ausreichend große Distanz bis zu dem zu bewertenden Bereich abklingen.

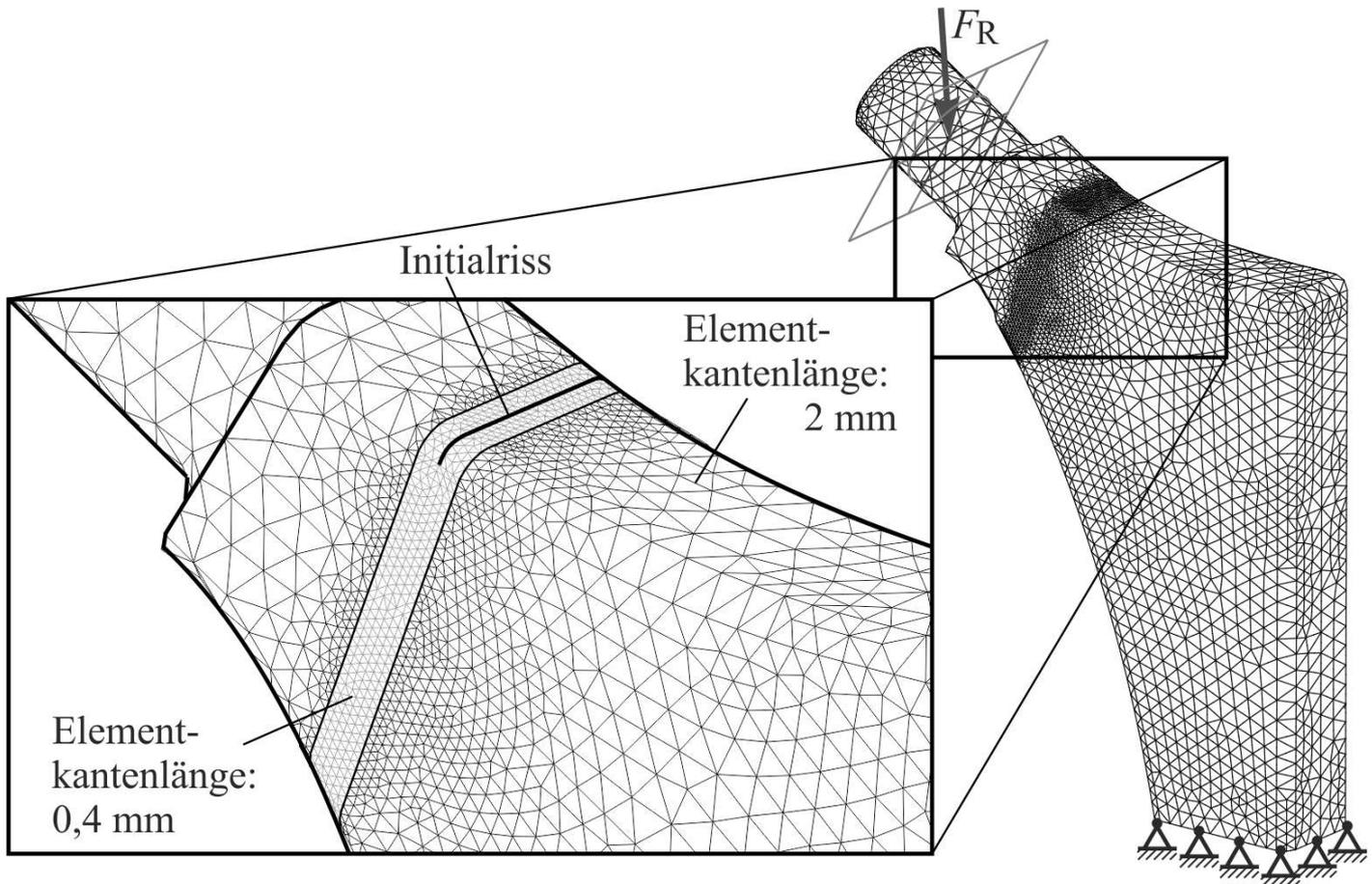


Bild 6 FE-Modell des Prothesenschafts – Randbedingungen und Vernetzungsdetails

Zur Bestimmung der Position des Initialrisses, Bild 6, wird zunächst eine Simulation an einem Prothesenschaft ohne Riss durchgeführt. Diese findet unter Verwendung der Software ABAQUS<sup>TM</sup> statt und liefert Stellen maximaler Hauptnormalspannung an der Bauteiloberfläche. Diese Positionen charakterisieren die kritischen Bereiche des Bauteils. Somit folgt die geringste Bauteillebensdauer für eine Konstellation, bei welcher die Position eines vorhandenen Risses sich zufälligerweise mit der des höchstbeanspruchten Gebiets decken. Aus dieser Überlegung heraus wird der in Bild 6 dargestellte Initialriss an der Stelle der beim Lastfall „Gehen“ hervorgerufenen größten Hauptnormalspannung angebracht und nachfolgend analysiert. Der Initialriss in diesem Fall stellt einen Riss mit einer Tiefe von 1 mm dar.

Den Anforderungen des Rissausbreitungssimulationsprogramms ADAPCRACK3D [13] entsprechend findet die Vernetzung des Prothesenschafts mittels Tetraederelementen mit linearem Verschiebungsansatz statt. Das den Initialriss umschließende Gebiet erhält eine Elementkantenlänge von 0,4 mm, Bild 6, während dem restlichen Volumen ein mit 2 mm Elementkantenlänge deutlich gröberes Netz zugewiesen wird. Das FE-Netz des Risses setzt sich aus ebenen Dreieckselementen mit einer Elementkantenlänge von 0,4 mm zusammen. Mittels ADAPCRACK3D werden Risspfade und Lebensdauern für den Prothesenschaft ermittelt.

### *Ergebnisse der Lebensdauersimulation*

Eine zusammenfassende Darstellung der Simulationsergebnisse bezüglich des Rissausbreitungsverhaltens und hinsichtlich der Auswertung der Bauteillebensdauern findet sich in Bild 7. Darin erstreckt sich der Risspfad ausgehend von einem Millimeter für die Initialrisslänge bis zu einer Endrisslänge, welche das Einsetzen der instabilen Rissausbreitung charakterisiert, von 9,7 mm für den „Bauzustand“ sowie von 12,7 mm für den bei einer Temperatur von 800°C behandelten Werkstoff. Des Weiteren ist in Bild 7 die Spannungsverteilung an der Rissfront und in deren Umgebung, die Rissform und die Risslänge im letzten Berechnungsschritt vor dem Einsetzen der instabilen Rissausbreitung verdeutlicht. Der Prothesenschaft im „Bauzustand“ weist einen größeren Restquerschnitt auf, was aus der geringeren zyklischen Risszähigkeit [7] des Materials in diesem Zustand resultiert. Im Kontrast hierzu wächst der Riss im wärmebehandelten Prothesenschaft vom schwellenwertnahen Bereich bis hin zur größeren zyklischen Risszähigkeit – nahezu über den gesamten wachstumsfähigen  $\Delta K$ -Bereich des „800°“-Zustands. Schließlich wird die zyklische Risszähigkeit nach einer größeren Lastspielzahl erreicht und das instabile Versagen des wärmebehandelten Prothesenschafts eingeleitet.

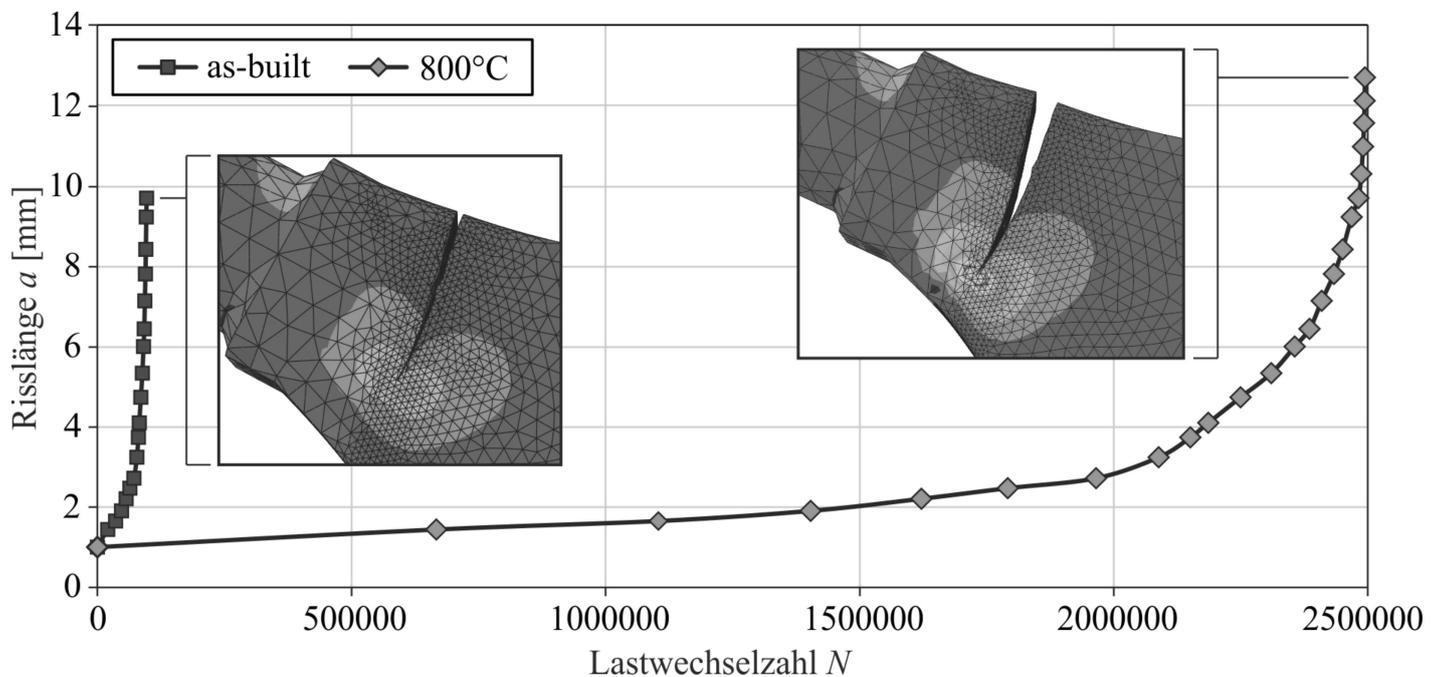


Bild 7 Gegenüberstellung der Lebensdauern des laserstrahlgeschmolzenen Prothesenschafts im Bau- sowie 800°-Zustand

Eine Betrachtung der von den beiden Bauteilen ertragbaren Lastwechselzahlen bis zum Bruch liefert eine Lastzyklenzahl von  $10^5$  Lw für den Bauzustand sowie  $2,5 \cdot 10^6$  Lw für den thermisch behandelten Werkstoff. Unter den gewählten Randbedingungen resultiert somit eine Verlängerung der Restlebensdauer um den Faktor von etwa 25 durch die Anwendung der betrachteten Wärmebehandlungsart. Anhand der  $a$ - $N$ -Verläufe in Bild 7 wird deutlich, dass insbesondere im niedrigen Bereich der Rissgeschwindigkeit ein flacher Kurvenverlauf und somit die größten Lebensdauerreserven zu beobachten sind. Damit ist die hohe Relevanz einer Wärmebehandlung laserstrahlgeschmolzener Bauteile aus TiAl6V4 bewiesen. Des Weiteren kann bei Anwendung des Heißisostatischen Pressens, mit dem für diesen Werkstoffzustand ermittelten geringfügig besseren Risswachstumsverhaltens als für den 800°-Zustand, eine weitere Zunahme der ertragbaren Bruchlastspielzahl erzielt werden.

## 7. Schlussfolgerungen

Laserstrahlgeschmolzene Bauteile verfügen über vielversprechende Zukunftsperspektiven. Der Einsatz dieser Bauteile als Prothese oder Implantat setzt jedoch die Kenntnis über deren Verhalten bei schwingender mechanischer Belastung voraus. Hierzu wurden in dieser Arbeit bruchmechanische Untersuchungen an der biokompatiblen Titanlegierung TiAl6V4 durchgeführt. Der Fokus liegt auf der Analyse diverser Einflüsse, wie Eigenspannungen und Poren, auf das Rissausbreitungsverhalten. Anschließend erfolgt eine Optimierung der Materialkennwerten. Hierzu finden diverse Wärmebehandlungsverfahren Anwendung. Das Ergebnis bilden Materialkennwerte, welche in der Größenordnung konventionell hergestellter Werkstoffe liegen, so dass es gelingt filigrane Strukturen mit hochwertigen Werkstoffeigenschaften herzustellen. Des Weiteren findet eine Untersuchung des Anisotropiegrades anhand verschiedener Anordnungsvarianten von Aufbaurichtung und Initialrissrichtung

statt. Der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Lebensdauer laserstrahlgeschmolzener Komponenten wird anhand numerischer Risswachstumssimulationen am Beispiel eines Prothesenschaftes verdeutlicht.

Die in den vorgestellten Studien gewonnenen Erkenntnisse sollen in weiteren Arbeiten dazu dienen:

- eine fachgerechte Auslegung auf Basis ermittelter Materialkennwerte,
- eine zweckdienliche Gestaltung unter Berücksichtigung der prozesstechnischen Restriktionen sowie
- eine richtige und zielführende Auswahl des erforderlichen Nachbehandlungsverfahrens

im Rahmen der Herstellung von Prothesen und Implantaten vorzunehmen.

Dabei ist insbesondere das Ermüdungsrisswachstum – bereits während der Bauteilauslegung – durch die Berücksichtigung der ermittelten Schwellenwerte gegen Ermüdungsrissausbreitung nach Möglichkeit auszuschließen. Bei der Gestaltung von Bauteilen für die Fertigung mittels SLM sind zudem die prozessspezifischen Konstruktionsregeln sowie die Vorgaben und Einschränkungen, welche sich aus der jeweils verwendeten Strahlschmelzanlage ergeben, zu beachten. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass Bauteile aus der Titanlegierung TiAl6V4, welche dem Heißisostatischen Pressen unterzogen wurden, besonders gute Materialkennwerte – sowohl hinsichtlich der Initiierung wie auch der Ausbreitung von Rissen – liefern. Bei SLM-Strukturen, die im menschlichen Körper eingesetzt werden, sollte daher diese Art der thermischen Nachbehandlung bevorzugt Verwendung finden.

## 8. Literatur

[1] DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung, 2003.

[2] Calignano, F.: Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. In: *Materials and Design*, Volume 64, 2014, pp. 203-213.

[3] Hussein, A.; Hao, L.; Yan, C.; Everson, R.; Young, P.: Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, 2013, pp. 1019-1026.

[4] Verhaeghe, F.; Craeghs, T.; Heulens, J.; Pandelaers, L.: A pragmatic model for selective laser melting with evaporation. In: *Acta Materialia*, Volume 57, 2009, pp. 6006-6012.

[5] Richard, H.A.; Sander, M.: *Ermüdungsrisse. Erkennen · Sicher beurteilen · Vermeiden*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012.

[6] Riemer, A.: *Einfluss von Werkstoff, Prozessführung und Wärmebehandlung auf das bruchmechanische Verhalten von Laserstrahlschmelzbauteilen [Dissertation]*. Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers, Shaker Verlag, Aachen, 2015.

[7] Riemer, A.; Leuders, S.; Richard, H.A.; Tröster, T.: Verhalten von lasergeschmolzenen Bauteilen aus der Titan-Aluminium-Legierung TiAl6V4 unter zyklischer Beanspruchung. In: *Materials Testing*, Ausgabe 55, 2013, S. 537-543.

[8] Marci, G.: Fatigue crack growth threshold and test results for Al- and Ti-alloys. In: Newman, Jr. J.C.; Plascik, R.S., editors. *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits, and Design*. ASTM STP 1372, American Society for Testing and Materials, 2000.

[9] Sheldon, J.W.; Bain, K.R.; Donald, J.K.: Investigation of the effect of shed-rate, initial  $K_{max}$ , and geometric constraint on  $\Delta K_{th}$  in Ti-6Al-4V at room temperature. In: *International Journal of Fatigue*, Volume 21, 1999, pp. 733-741.

[10] Atkinson, H.V.; Davies, S.: Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. In: *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 31, 2000, pp. 2981-3000.

[11] Peters, M.; Leyens, C.: *Titan und Titanlegierungen*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.

[12] Leuders, S.; Thöne, M.; Riemer, A.; Niendorf, T.; Tröster, T.; Richard, H.A.; Maier, H.J.: On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. In: *International Journal of Fatigue*, Volume 48, 2013, pp. 300-307.

- [13] Schöllmann, M.; Fulland, M.; Richard, H.A.: Development of a new software for adaptive crack growth simulations in 3D structures. In: Engineering Fracture Mechanics, Volume 70, 2003, pp. 221- 230.
- [14] Möser, M; Hein, W: Bestimmung der Hüftkraftrichtung aus Bruchflächen von Hüftgelenkprothesen. In: Beiträge zur Orthopädie und Traumatologie, Volume 33, 1986, pp. 286-295.
- [15] Richard, H.A.; Kullmer, G.: Biomechanik. Grundlagen und Anwendungen auf den menschlichen Bewegungsapparat. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [16] Pauwels, F.: Atlas zur Biomechanik der gesunden und kranken Hüfte. Prinzipien, Technik und Resultate einer kausalen Therapie. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1973.
- [17] Pauwels, F.: Biomechanics of the Locomotor Apparatus. Contributions on the Functional Anatomy of the Locomotor Apparatus. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1980.
- [18] Bergmann, G.; Graichen, F.; Rohlmann, A.: Hip joint loading during walking and running, measured in two patients. In: Journal of Biomechanics, Volume 26, 1993, pp. 969-990.

## 9. Kontaktangaben

Dr.-Ing. Andre Riemer  
Fachgruppe Angewandte Mechanik (in enger Kooperation mit dem Direct Manufacturing Research Center)  
Universität Paderborn  
Pohlweg 47-49  
33098 Paderborn  
Email: [riemer@fam.upb.de](mailto:riemer@fam.upb.de)  
WEB: <http://fam.upb.de>

Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard  
Fachgruppe Angewandte Mechanik  
Universität Paderborn  
Pohlweg 47-49  
33098 Paderborn  
Email: [richard@fam.upb.de](mailto:richard@fam.upb.de)  
WEB: <http://fam.upb.de>

Dr.-Ing. Britta Schramm  
Fachgruppe Angewandte Mechanik  
Universität Paderborn  
Pohlweg 47-49  
33098 Paderborn  
E-Mail: [schramm@fam.upb.de](mailto:schramm@fam.upb.de)  
WEB: <http://fam.upb.de>

---

[1] Die Materialdaten für das Grundmaterial A, B und C stammen aus der Literatur. Proben für das Grundmaterial D wurden aus einem spannungsarmgeglühten gewalzten Blech entnommen und unter denselben Laborbedingungen wie im Fall des laserstrahlgeschmolzenen Materials getestet.

[2] Mit Vakuum wird hier ein Restdruck von unter  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar bezeichnet.

[3] EBSD: Electron Backscatter Diffraction. Verfahren zur Analyse der Mikrostruktur (Kornform, Korngröße, Kristallstruktur) der Werkstoffe mittels Elektronen-Rückstreu-Beugung.

## Volltext

## Lizenz

Jedermann darf dieses Werk unter den Bedingungen der Digital Peer Publishing Lizenz elektronisch übermitteln und zum Download bereitstellen. Der Lizenztext ist im Internet unter der Adresse

[http://www.dipp.nrw.de/lizenzen/dppl/dppl/DPPL\\_v2\\_de\\_06-2004.html](http://www.dipp.nrw.de/lizenzen/dppl/dppl/DPPL_v2_de_06-2004.html) abrufbar.

## **Empfohlene Zitierweise**

Riemer A, Richard HA, Schramm B (2016). Ermüdungseigenschaften von additiv gefertigten Titanstrukturen im Hinblick auf den Einsatz im menschlichen Körper. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, Vol. 2015. (urn:nbn:de:0009-2-42949)

Bitte geben Sie beim Zitieren dieses Artikels die exakte URL und das Datum Ihres letzten Besuchs bei dieser Online-Adresse an.