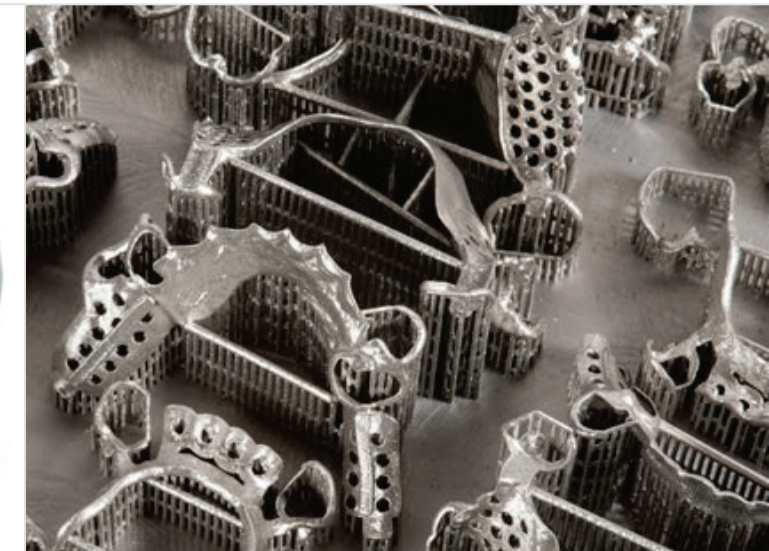
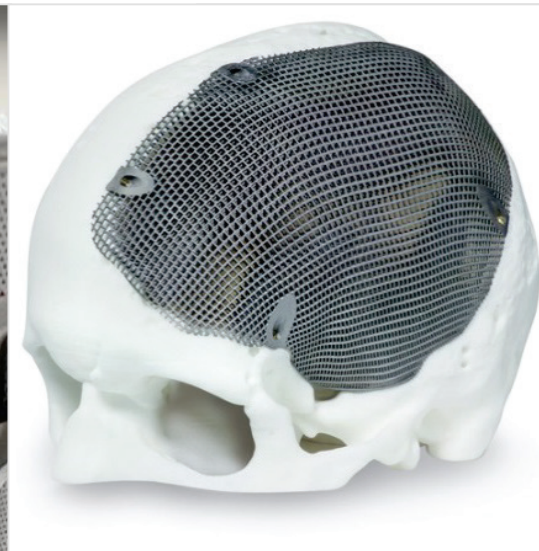


DESIGN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG



Wintersemester 2021/22



Design für die Additive Fertigung

GLIEDERUNG

1. **Motivation (I): Einführung in das Thema Fertigung und Fertigungsplanung**
2. **Motivation (II): Konstruktionsrichtlinien / -möglichkeiten**

Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Elektronenstrahlschmelzen

VDI 3405

Blatt 3.5

Diese Richtlinie gilt für die Konstruktion von Bauteilen für das pulverbettbasierte Elektronenstrahlschmelzen

(Electron Beam Melting – EBM).

Das Verfahren wird in VDI 3405 vorgestellt.

Werkstofftechnische Hinweise für die Konstruktion

Nachfolgend werden einige Werkstoffeigenschaften genannt, die bei der Konstruktion von Bauteilen für das Elektronen-Strahlschmelzen zu beachten sind.

Verfügbare Werkstoffe

Die für das Elektronen-Strahlschmelzen verwendeten Werkstoffe stammen ausschließlich aus der Gruppe der Reinelemente und Legierungen.

Die erfolgreiche Verarbeitung der einzelnen Pulverwerkstoffe beim Elektronen-Strahlschmelzen hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab.

Hierzu zählen unter anderem die Anlage, deren Hard- und Software, die Werkstoffpulver mit den chemischen und thermomechanischen Eigenschaften sowie die einstellbaren und intern errechneten Prozessparameter.

Eine Auswahl der bisher erfolgreich verarbeiteten Werkstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt.

Darüber hinaus erlaubt der unter Vakuum durchgeführte Elektronen-Strahlschmelzprozess die Prozessierung weiterer hoch reaktiver Legierungszusammensetzungen.

Potenziale werden in der Verarbeitung von Metallen mit Bestandteilen wie Aluminium, Beryllium, Niob, Eisen-Nickel und Invar gesehen.

Übersicht über mit Elektronen-Strahlschmelzen verarbeitbare Werkstoffe

Nicht rostende Stähle	Werkzeugstähle	Titanlegierungen	Nickelbasislegierungen	Kobaltlegierungen	Hochentropielegierung	Kupfer und Kupferlegierungen
1.4404 (316L)	1.2343 (H13)	3.7164/3.7165 (Ti-6Al-4V Grade 5)	2.4856 (NiCr22Mo9Nb, alloy 625)	CoCr	Al-Co-Cr-Fe-Ni	Cu
		3.7165 (Ti-6Al-4V ELI Grade 23)	2.4668 (NiCr19NbMo, alloy 718)			
		3.7035 (TiCP Grade 2)	Rene 142			
		Ti-48Al-2Cr-2Nb	CMSX-4			
		Ti-48Al-2Cr-8Nb				
		Ti-48Al-2Nb-0,7Cr-0,3Si (RNT650)				

Werkstoffeigenschaften

Basierend auf der schichtweisen Fertigung resultieren anisotrope mechanische Werkstoffeigenschaften. Für Festigkeitswerte ist der Unterschied zwischen vertikaler und horizontaler Baurichtung vernachlässigbar gering.

Als Richtwerte für Materialparameter sind die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen und die Datenblätter der Hersteller für Pulver und Anlagen ein Richtwert.

Die Streuung dieser Ergebnisse ist unterschiedlichen Maschinen, Prozessparametern, Pulvern und Nachbearbeitungen geschuldet.

Darüber hinaus zeigt das mit Elektronen-Strahlschmelzen hergestellte Ti-6Al-4V besseres Dehnungsverhalten als in DIN EN ISO 5832-3 gefordert.

Ebenfalls von großer Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften ist die Gefügestruktur elektronenstrahlgeschmolzener Bauteile.

Das Vorheizen und die erhöhte Umgebungstemperatur in der Anlage führen zu einer verfahrensspezifischen Gefügebildung.

Mit der Glättung der verfahrenstypischen, rauen Oberfläche sowie nachfolgendem HIP-Prozess lassen sich dadurch gute Dauerfestigkeiten erzielen.

Eine relative Materialdichte von mehr als 99 % ist möglich.

Gestaltungsempfehlungen für das Elektronen-Strahlschmelzen

In Tabelle 2 bis Tabelle 9 sind für grundlegende Geometrien Konstruktionsempfehlungen für das pulverbettbasierende Elektronen-Strahlschmelzen metallischer Werkstoffe angegeben.

Bei den Werten wird mitunter zwischen Baurichtung Z und Bauebene BE der einzelnen Geometrien unterschieden.

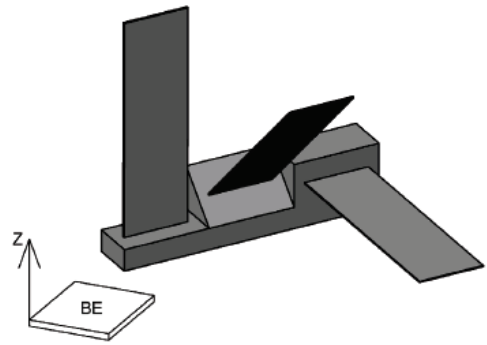
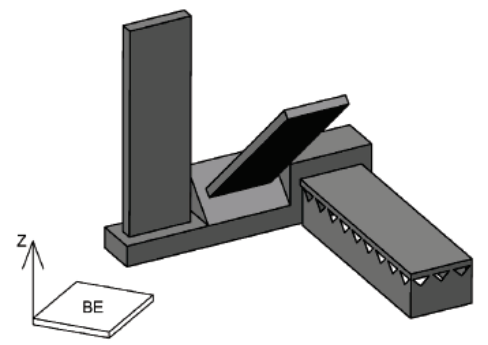
Werte für Z sind bis zu einem Downskin-Winkel von ca. 45° ähnlich.

Je kleiner der Downskin-Winkel ist, desto mehr nähern sich die Werte denen der Bauebene an.

Die in der Tabelle angegebenen Werte für die einzelnen Ausprägungsmerkmale sind abhängig von den Randbedingungen der Fertigung und gelten lediglich als Richtwerte.

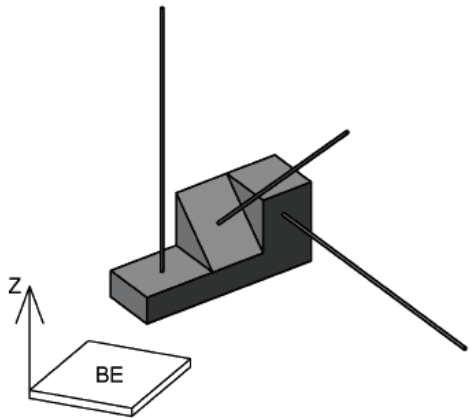
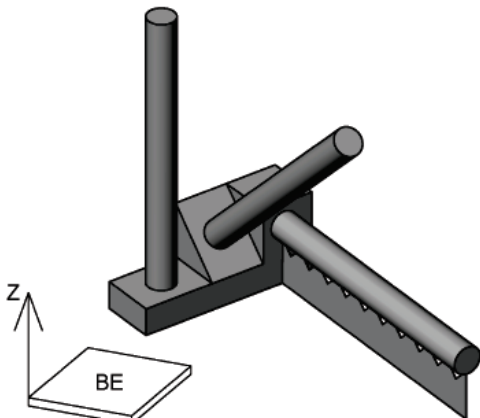
Sie geben die Erfahrung bei der Fertigung mit Ti-6Al-4V-Metallpulver vom Anlagenhersteller mit typischen Prozessparametern wieder.

Konstruktionsempfehlungen für Wände

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Die Dicke einer Wand ist so zu gestalten, dass sie sicher gefertigt werden kann. Kleiner konstruierte Wände entstehen mit einer verfahrensbedingten Mindestdicke und neigen zum Abbrechen. Unterhalb des kritischen Winkels ist Support empfohlen.	$\geq 0,6 \text{ mm}$		

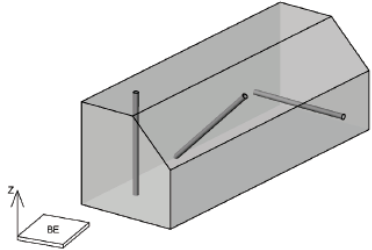
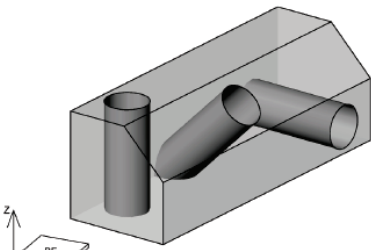
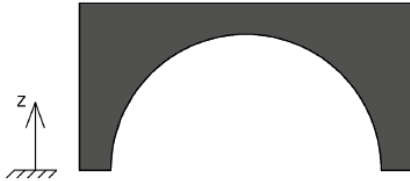
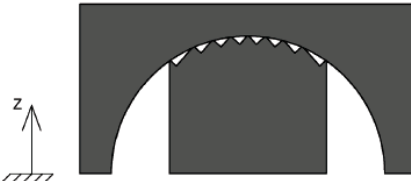
Die **Orientierung** von Wänden ist vertikal zur Bauebene zu wählen, um geometrische Abweichungen zu minimieren.

Konstruktionsempfehlungen für Zylinder

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
<p>Ein minimaler Außendurchmesser von Zylindern ist zu beachten, sodass diese sicher entstehen. Kleiner konstruierte Zylinder entstehen mit einer verfahrensbedingten Mindestdicke und neigen zum Abbrechen. Unterhalb des kritischen Winkels ist Support empfohlen.</p>	<p>$\text{Ø} \geq 0,6 \text{ mm}$</p>		

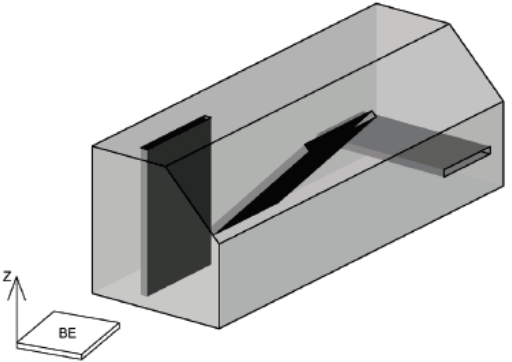
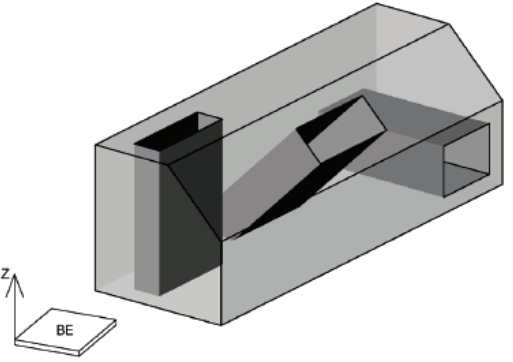
Die **Orientierung** eines Zylinders ist vertikal zur Bauebene zu wählen, um geometrische Abweichungen zu minimieren.

Konstruktionsempfehlungen für Bohrungen

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Innendurchmesser von Bohrungen sind so dick zu gestalten, dass sie nicht zusammenwachsen. Es ist zwischen der Entstehung eines Lochs und Entfernbarkeit des Überschusspulvers zu unterscheiden. Dabei ist das Aspektverhältnis zu beachten. Lange Bohrungen oder gebogene Kanäle sind mitunter nicht von Pulver befreibar.	<p>herstellbar: $Z \geq 0,3 \text{ mm}$ $BE \geq 0,5 \text{ mm}$</p> <p>Pulver entfernbar: $Z \geq 0,6 \text{ mm}$ $BE \geq 0,8 \text{ mm}$</p> <p>Bei geneigten Bohrungen sind die Werte für BE zu empfehlen.</p>		
Bohrungen, die oberhalb eines maximalen Durchmessers und unterhalb des Downskin-Winkels gefertigt werden, benötigen Stützstrukturen.	$\geq 8 \text{ mm}$		

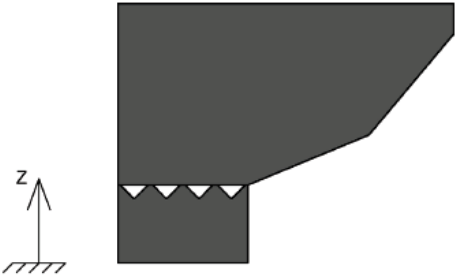
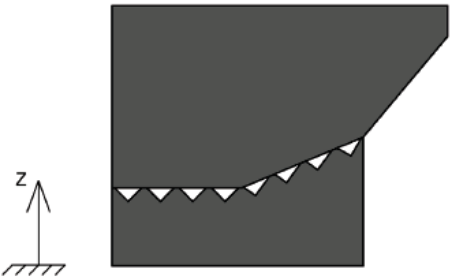

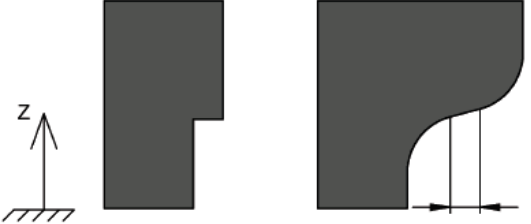
Die **Orientierung** von Bohrungen ist vertikal zur Bauebene zu wählen, um geometrische Abweichungen zu minimieren.

Konstruktionsempfehlungen für Spalte

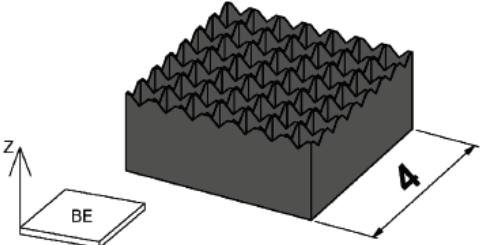
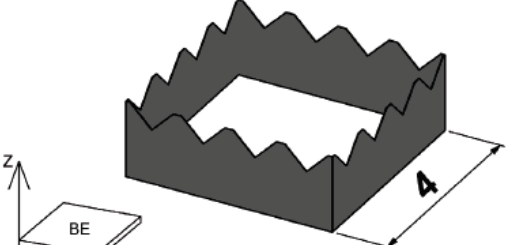
Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
<p>Die Spalthöhe ist so zu gestalten, dass diese nicht zusammenwachsen. Zusätzlich ist zwischen Spaltentstehung und Pulverentfernung zu unterscheiden. Bei entsprechender Spaltbreite bzw. -länge in BE sind Supports zu verwenden. Bei tiefen oder gebogenen Spalten ist das Aspektverhältnis zu beachten.</p>	<p>herstellbar: $Z \geq 0,3 \text{ mm}$ $BE \geq 0,4 \text{ mm}$</p> <p>Pulver entfernbar: $Z \geq 0,6 \text{ mm}$ $BE \geq 0,7 \text{ mm}$</p> <p>Bei geneigten Spalten sind die Werte für BE zu empfehlen.</p>		

Die **Orientierung** von Spalten ist vertikal zur Bauebene zu wählen, um geometrische Abweichungen zu minimieren.

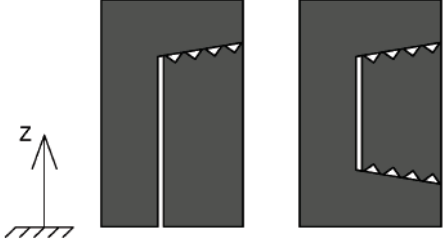
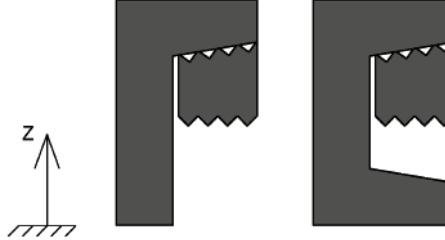
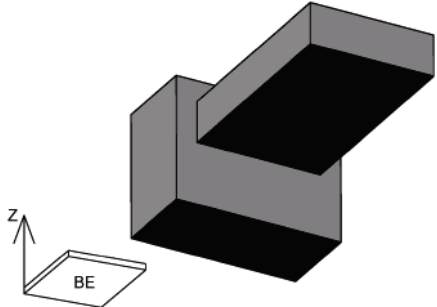
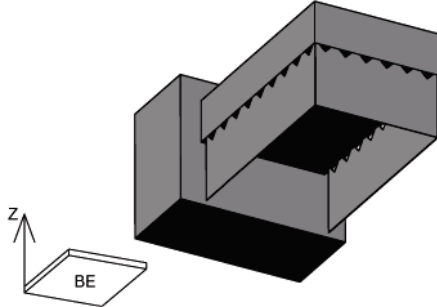
Konstruktionsempfehlungen für Überhänge

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
<p>Wird der Downskin-Winkel unterschritten, werden Stützstrukturen für die verformungsfreie Fertigung benötigt. Diese Geometrien werden als Überhang bezeichnet.</p>	$\delta < 50^\circ$		
<p>Bis zu einer maximalen Überhanglänge sind Überhänge selbsttragend und benötigen keinen Support. Größere ungestützte Längen verursachen Formfehler.</p>	$\leq 3 \text{ mm}$		

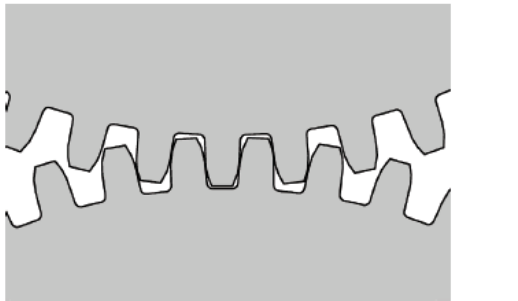
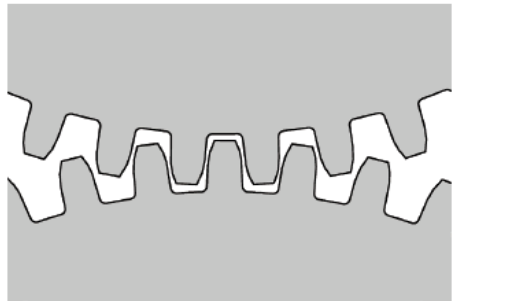
Konstruktionsempfehlungen für Stützstrukturen (Supports)

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
<p>Die Gestalt der Stützstrukturen ist so zu wählen, dass kein Bauteilverzug entsteht und der Support einfach entfernbar ist. Empfohlen sind Kontur-, Block- oder Liniensupports mit entsprechendem Abstand zwischen einzelnen Linien. Dieser ist bei kleinen Downskin-Winkeln und massiver nachfolgender Struktur entsprechend klein zu wählen.</p>	$2 \text{ mm} \leq SLa \leq 6 \text{ mm}$		

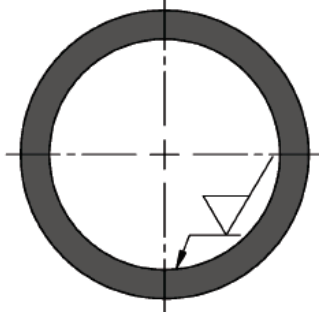
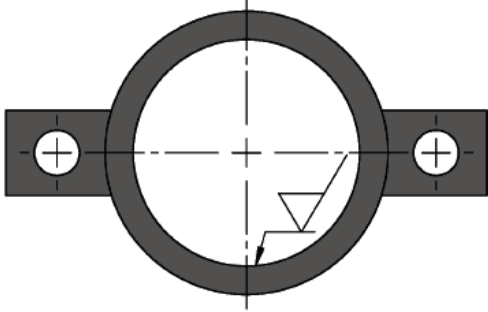
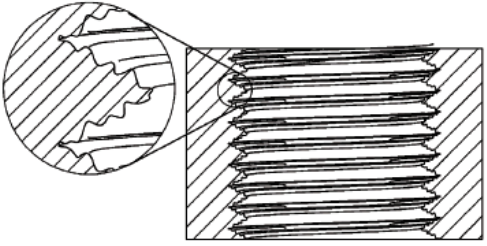
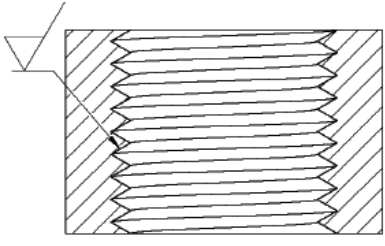
Konstruktionsempfehlungen für Stützstrukturen (Supports) 2

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Die Anbindung der Stützstruktur muss nicht an die Bauplatte oder an darunterliegender Struktur erfolgen, solange eine minimale Höhe eingehalten wird. Je massiver die zu stützende Struktur und je größer SLa , umso größer ist diese zu wählen.	$5 \text{ mm} \leq Sh \leq 20 \text{ mm}$, bzw. bis BE oder darunterliegende Struktur		
Überhänge, deren Downskin-Fläche parallel zur Bauebene verläuft, benötigen nur an den Randbereichen Stützstrukturen. Die darin eingeschlossene Fläche ist selbsttragend.			

Konstruktionsempfehlungen

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
<p>Minimale Spaltbreiten zwischen relativbewegenden Körpern sind so zu gestalten, dass diese bei der Fertigung nicht verschmelzen oder versintern.</p>	<p>$\geq 0,6 \text{ mm}$</p>		

Konstruktionsempfehlungen für Funktionsgeometrien

Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Zusätzliche Aufspanngeometrien für mögliche mechanische Nachbearbeitungen sind empfohlen. Diese sind möglichst nahe an den zu bearbeitenden Flächen vorzusehen.			
Gewinde können nicht funktionsgerecht gefertigt werden und müssen nachträglich eingebracht werden. Das Nachschneiden additiv gefertigter Gewinde ist meist ausreichend.			

Geometrische Genauigkeit des Elektronen-Strahlschmelzens

Nachfolgend werden Abweichungen von der Sollgeometrie aufgeführt, die beim Elektronen-Strahlschmelzen verfahrenstypisch sind.

Maßabweichungen

Aufgrund der Fertigungsrichtung ergeben sich raumrichtungsabhängige Maßabweichungen.

Maße in Baurichtung bei hinzufügenden, parallel zur BE ausgeprägten Bauteilgeometrien (Wände, Zylinder, Stege usw.) oberhalb der minimalen Wandstärke werden zu groß gefertigt.

Die Abweichung von der modellierten Geometrie hin zur gefertigten Oberfläche beträgt 0,3 mm bis 0,5 mm.

Abtragende Geometrien (Löcher, Spalte usw.) hingegen werden mit bis zu 0,4 mm in Baurichtung zu klein gefertigt.

Diese Abweichung ist ausschließlich an der Downskin-Fläche der Geometrien zu beobachten.

Formabweichungen

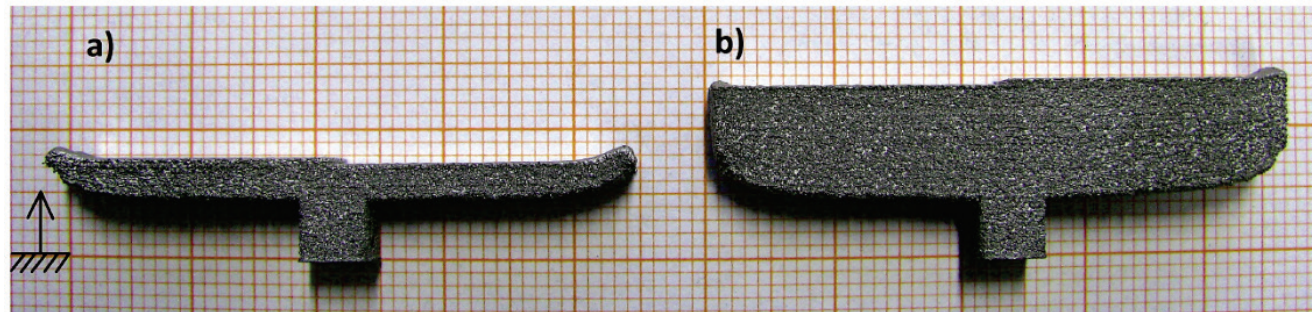
Geometrien in Bauebene weichen durch die beschriebenen Maßabweichungen von deren Sollform ab. Beispielsweise ähneln kleine, parallel zur BE gefertigte Zylinder mit Durchmesser von bis zu 1 mm einer Ellipse. Größere Zylinder bekommen eine Art umgekehrte Tropfenform.

Dies kann durch eine Orientierungsänderung vermieden werden, z. B. durch deren Ausrichtung in Z.

Überhänge, deren Downskin-Fläche parallel zur BE verlaufen und die keine stetigen Übergänge wie Rundungen oder Fasen am Rand haben, können ohne Stützstrukturen (Support) gefertigt werden.

An den Rändern der Downskin-Flächen sind Formabweichungen in Form von nach oben gezogener bzw. gebogener Strukturen zu beobachten (Schwelleffekt, Bild a).

- Diese Formabweichungen können überbaut werden.
- Wenn im weiteren Bauprozess noch ca. 5 mm dicke Strukturen darüber entstehen, erhalten diese nahezu die Sollgeometrie.



Schwelleffekt an der Bauteilunterseite (Quelle: TU Dresden)

Formabweichungen 2

Die verbleibenden Konturerhöhungen auf den Upskin-Flächen parallel zur Bauebene sind typisch für das Verfahren (Bild 1b).

Es sind also bauebenenparallele Überhänge ohne Support möglich.

Formtreue ist nur mit Support zu erwarten.

Bei Geometrien, deren Beginn und Abschluss in Baurichtung durch eine Kante oder eine kleine Rundung unterhalb der minimalen Dicke dargestellt wird, entstehen Formabweichungen durch die minimale mögliche Strukturbreite von 0,6 mm.

An der Unterseite sind zusätzlich die beschriebenen Maßabweichungen zu beachten.

Positionsabweichungen

Innerhalb der Baukammer kann es zwischen einzelnen Geometrien zu Abweichungen von der relativen Lage zueinander kommen.

Abhängig ist dies von der Raumrichtung und der Distanz.

Im Extremfall ist über die größtmögliche Bauraumdistanz eine Abweichung von bis zu 2 mm möglich.

Oberflächenabweichungen

Bei Wandstärken unterhalb von 2 mm kann es zu Welligkeiten in der Oberfläche kommen.

Zumeist sind diese zu beobachten, wenn die Wandstärke abrupt zu- oder abnimmt.

Zur Vermeidung dessen sind flache bzw. abgerundete Übergänge oder größere Wandstärken zu empfehlen.

Durch Nutzung von vergleichsweise groben Pulvern beim Elektronen-Strahlschmelzen werden vergleichsweise hohe Oberflächenrauheiten erzielt.

Je nach Ausrichtung der Fläche sind die Werte für die mittlere Rauheit R_a im Bereich von 20 μm bis 60 μm und Rautiefen R_t bis zu 300 μm zu erwarten.

- Die geringste Rauheit wird an Upskin-Flächen parallel zur Bauplatte erzielt.
- Die größte Rauheit ist an Downskin- Flächen zu erwarten.

Verfahrenstypische Folgeprozesse

Die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Folgeprozesse werden häufig angewandt, damit Bauteile aus dem Elektronen-Strahlschmelzen die gewünschte Funktion bekommen.

Entfernung von Pulverresten

Während der Fertigung umgibt nicht aufgeschmolzenes Pulver das entstehende Bauteil.

Nach der groben Freilegung des Bauteils haften diesem meist noch Pulverpartikel an.

Deren Entfernung ist der erste Schritt nach dem Bauprozess.

Diese Pulverreste werden durch einen mechanischen Strahlprozess mit dem Fertigungswerkstoff als Strahlmedium entfernt.

An schwer zugänglichen sowie inneren Strukturen werden Werkzeuge oder Ultraschall eingesetzt.

Entfernung von Stützkonstruktionen

Da die erzeugten Bauteile zumeist teilweise von Stützstrukturen unterbaut sind und diese Strukturen nach dem Bauprozess oft keine weitere Funktion erfüllen, werden sie in der Regel im Nachgang entfernt.

Diese lassen sich oft einfach mechanisch entfernen.

Sind die Strukturen mit darunterliegenden Geometrien oder der Grundplatte verbunden, kommen teils auch Werkzeuge zum Einsatz.

Je nach Bauteilgeometrie ist die Möglichkeit zur Zugänglichkeit und Entfernung der Stützstruktur bereits bei der Bauteilkonstruktion zu berücksichtigen.

Einstellung von geometrischen Genauigkeiten

Trotz aller Strukturkomplexität, die mittels Elektronen- Strahlschmelzen realisiert wird, lassen sich meist keine tolerierten Flächen erzeugen.

Die geforderten Form- und Lagetoleranzen sind oft nur durch nachgelagerte Bearbeitungsprozesse erzielbar.

Diese Tatsache und die dazugehörige Zugänglichkeit der Flächen muss bereits bei der Bauteilentwicklung und -konstruktion beachtet werden.

Die dafür benötigten Materialzugaben an Pass- und Funktionsflächen sind neben Werkstoff- und Prozessparametern vor allem abhängig von den Bauteildimensionen bzw. den Abständen der mit entsprechenden Toleranzen versehenen Geometrien zueinander.

Typisch sind Nachbearbeitungszugaben von 0,5 mm bis 3 mm pro Fläche.

Je weiter diese tolerierten Geometrien voneinander entfernt sind, umso größer ist die Nachbearbeitungszugabe innerhalb der genannten Bereiche zu wählen.

Veredelung von Bauteiloberflächen

Die vergleichbar hohe Oberflächenrauheit des Elektronen-Strahlschmelzens lässt sich durch verschiedenen Oberflächenbehandlungen verbessern.

Die Anwendung dieser Verfahren ist bisher wenig erforscht.

Je nach Zugänglichkeit der Oberflächen stellen beispielsweise

- mechanisches bzw. elektromechanisches Spanen bzw. Schleifen,
- abrasives und glättendes Strahlen oder auch
- Laserablation

eine Möglichkeit dar.

Erhöhung der relativen Dichte des Werkstoffs

Einen bedeutenden Einfluss auf die mechanischen, speziell dauerfesten Eigenschaften des Werkstoffs hat die relative Dichte (Porosität).

Diese hängt in erster Linie von den Prozessparametern ab.

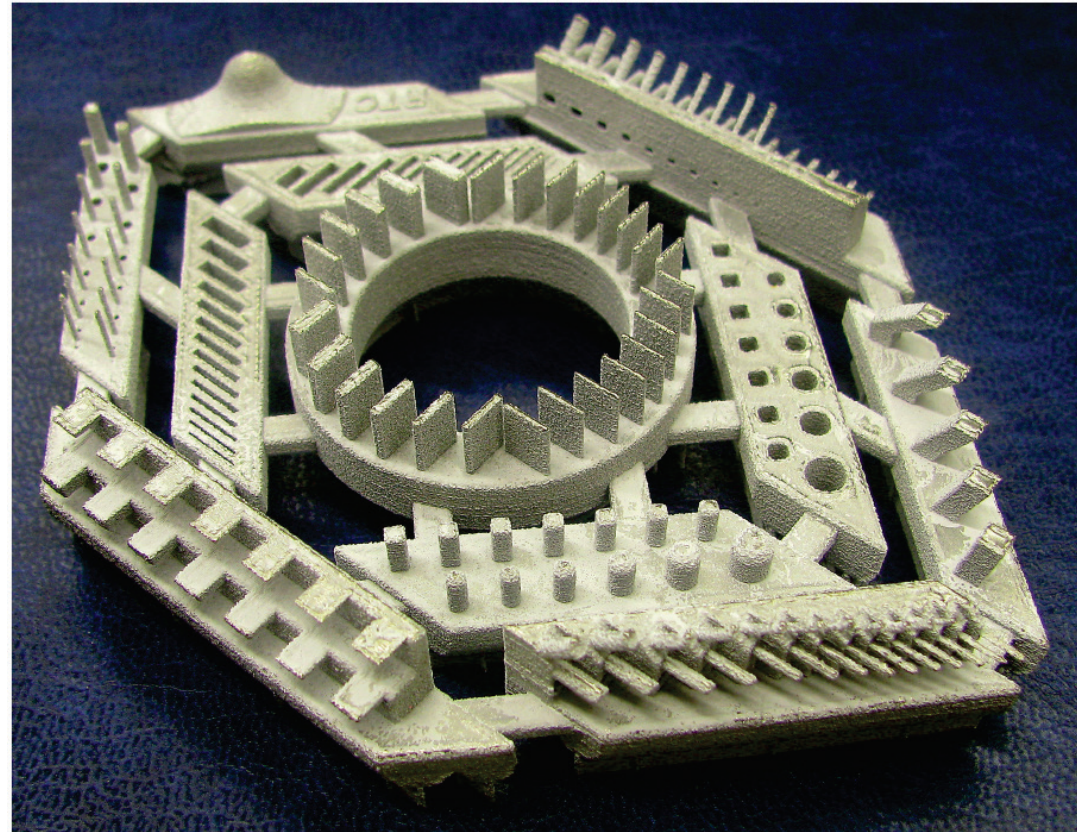
Wenngleich Elektronen-Strahlschmelzen typischerweise eine Dichte von mehr als 99 % erreicht, kann bei entsprechender Nachbehandlung durch HIP die Dichte weiter erhöht werden.

Konstruktionsbeispiele

Im Folgenden werden Beispiele für mit Elektronen-Strahlschmelzen gefertigte Konstruktionen gezeigt.

Beispiel für Konstruktionselemente

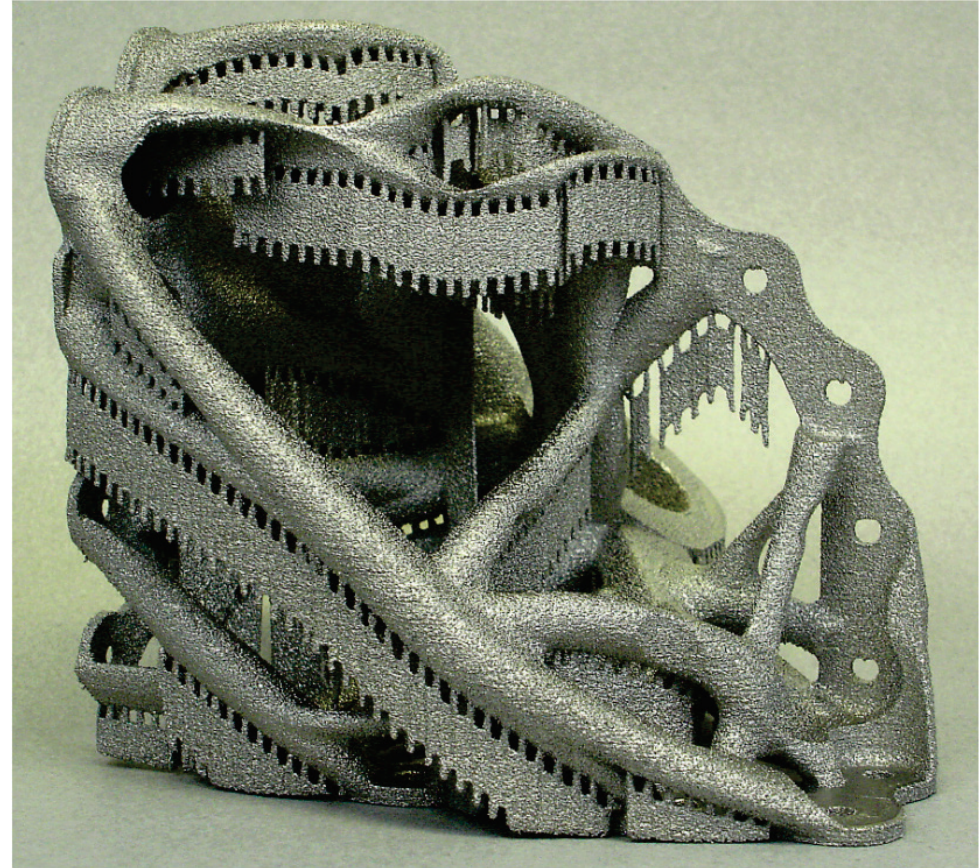
Das Bild zeigt ein nach [11] gefertigtes Bauteil. Der gezeigte Demonstrator enthält mehrere Konstruktionselemente, die das Potenzial und die Machbarkeit von Ausprägungsmerkmalen mittels additiven Fertigungsverfahren zeigen, die teils mit anderen Verfahren nicht herstellbar sind.



Geometriedemonstrator (Quelle: Fraunhofer IFAM)

Beispiel für Bauteile

Bild 3 zeigt eine topologieoptimierte Halterung (Bracket) als Beispiel für ein ganzes Bauteil.



Topologieoptimierte Halterung (Quelle: Fraunhofer IFAM)

Referenzen

Technische Regeln

DIN 8580:2003-09 Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 5832-3:2015-06 Chirurgische Implantate; Metallische Werkstoffe; Teil 3: Titan 6-Aluminium 4-Vanadium Knetlegierung (ISO/DIS 5832-3:2015). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 5832-3:2012-08 Chirurgische Implantate; Metallische Werkstoffe; Teil 3: Titan 6-Aluminium 4-Vanadium Knetlegierung (ISO 5832-3:1996); Deutsche Fassung EN ISO 5832-3:2012. Berlin: Beuth Verlag

VDI 1000:2017-02 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405:2014-12 Additive Fertigungsverfahren; Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 2:2013-08 Additive Fertigungsverfahren; Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 2.1:2015-07 Additive Fertigungsverfahren; Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 2.2:2016-08 (Entwurf) Additive Fertigungsverfahren; Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Materialkenndatenblatt Nickellegierung Werkstoffnummer 2.4668. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 3:2015-12 Additive Fertigungsverfahren; Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. Berlin: Beuth Verlag

Literatur (EBM)

- [1] Ackelid, U.: Improved Surface Quality and Productivity in Ti Additive Manufacturing using EBM MultiBeam. Titanium. Orlando, Florida, 2010
- [2] Hrabe, N.; Quinn, T.: Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location. Materials Science and Engineering: A 573 (2013), S. 271–277
- [3] Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H.; Janaki Ram, G.D.; Starr, T.; Stucker, B.: Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting. In: Materials & Design 86 (2015), S. 545–554
- [4] Murr, L.E.; Esquivel, E.V.; Quinones, S.A.; Gaytan, S.M.; Lopez, M.I.; Martinez, E.Y.; Medina, F.; Hernandez, D.H.; Martinez, E.; Martinez, J.L.; Stafford, S.W.; Brown, D.K.; Hoppe, T.; Meyers, W.; Lindhe, U.; Wicker, R.B.: Microstructures and mechanical properties of electron beam rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V. In: Materials Characterization 60 (2009) 2, S. 96–105
- [5] Karlsson, J.: Optimization of Electron Beam Melting for Production of Small Components in Biocompatible Titanium Grades, Uppsala University Dissertation. Uppsala, Schweden, 2015
- [6] Zhai, Y.; Galarraga, H.; Lados, D.A.: Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Two Additive Manufacturing Techniques. In: Procedia Engineering 114 (2015), S. 658–666
- [7] Rafi, K.; Karthik, N.V.; Starr, T.; Stucker, B.: Mechanical property evaluation of Ti-6Al-4V parts made using Electron Beam Melting, Louisville, Kentucky, 2012
- [8] Edwards, P.; O'Conner, A.; Ramulu, M.: Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 135 (2013) 6, S. 061016
- [9] Suard, M.: Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting, University of Grenoble Dissertation. Grenoble, France, 2015
- [10] Mohammad, A.; Mohammed, M.K.; Alahmari, A.M.: Effect of laser ablation parameters on surface improvement of electron beam melted parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016)
- [11] www.uni-due.de/imperia/md/content/cad/ude-rtctestspecimen.zip (abgerufen am 09.02.2017)



Design für die Additive Fertigung

Design für die Additive Fertigung 2021 - 07

Technische Universität Bergakademie Freiberg
IMKF - Additive Fertigung
Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Germany

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Tel: +49 3731 39 30 66
henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de



imkf
INSTITUT FÜR MASCHINENELEMENTE
KONSTRUKTION UND FERTIGUNG



TU Bergakademie Freiberg | Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung | Professur für Additive Fertigung
Agricolastraße 1 | 09599 Freiberg DE | Tel.: +49 3731 39 2986 | <http://www.imkf.tu-freiberg.de> | Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler