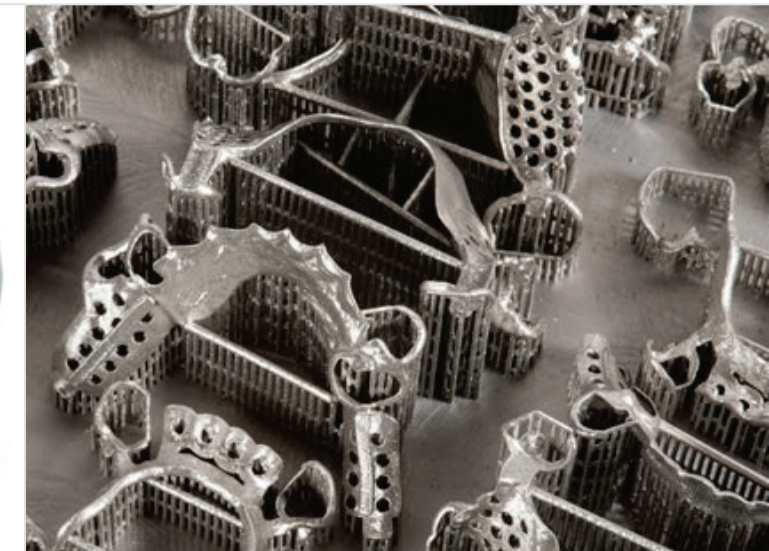
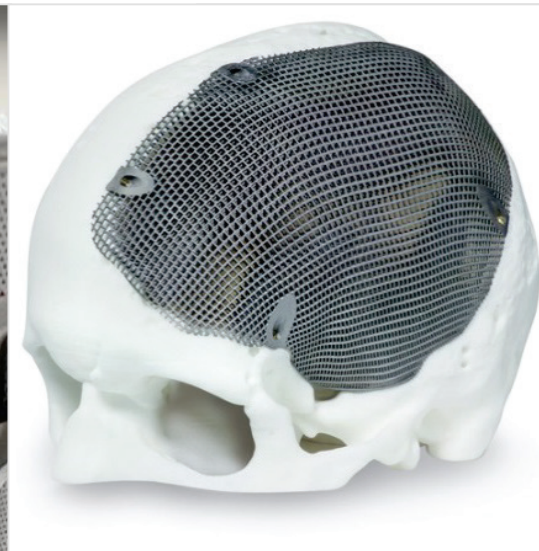


DESIGN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG



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 das Laser-Strahlschmelzen

Nachfolgend sind grundlegende Konstruktionsempfehlungen für die Verfahren des Laser-Strahlschmelzens metallischer Werkstoffe angegeben.

Werkstoff- und Gefügecharakteristika

Die für das Laser-Strahlschmelzen verwendeten Werkstoffe stammen zum Großteil aus der Gruppe der Metalle und metallischen Legierungen.

Die erfolgreiche Verarbeitung der einzelnen Materialien im Prozess hängt von verschiedenen Einflussparametern ab.

Hierzu zählt die Schweißbarkeit aber auch weitere Eigenschaften, wie Schmelztemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Schmelzviskosität und Benetzungswinkel (korreliert mit der Oberflächenspannung der Schmelze).

Dabei sind im Vergleich zu konventionellen Verfahren, wie die Zerspanung, einige Konstruktionswerkstoffe mit Laser- Strahlschmelzen einfacher zu verarbeiten.

Werkstoff- und Gefügecharakteristika

Eine Auswahl der heute typischerweise verwendeten Werkstoffe lässt sich in die in der Tabelle gezeigten Gruppen unterteilen.

Nicht rostende Stähle / Stainless steels	Werkzeugstähle / Tool steels	Titanlegierungen / Titanium alloys	Aluminium- legierungen / Aluminium alloys	Hartmetalle / Hard metals	Nickelbasis- legierungen / Nickel-based alloys	Keramik / Ceramics	Kobaltlegierungen / Cobalt alloys
1.4404 (316L)	1.3343 (M2)	TiAl6V4	AlSi25	WoC/Co	IN625	Al ₂ O ₃	CoCr
1.4332 (309L)	1.3344 (M3/2)	TiAl6Nb7	AlSi12		IN718	SiO ₂	
1.4410	1.2343 (H13)		AlSi10Mg		Hastelloy X		
1.4540	1.2344		AlMg3				
1.4542	1.3342						
	1.2709						

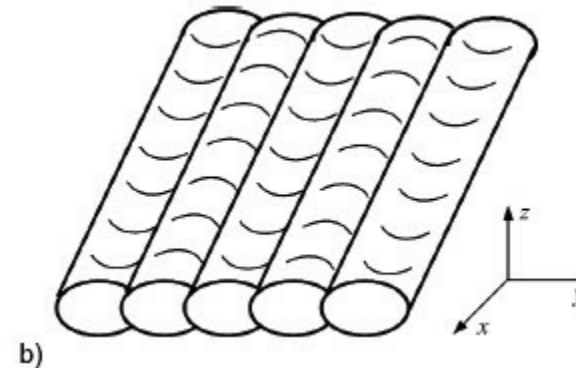
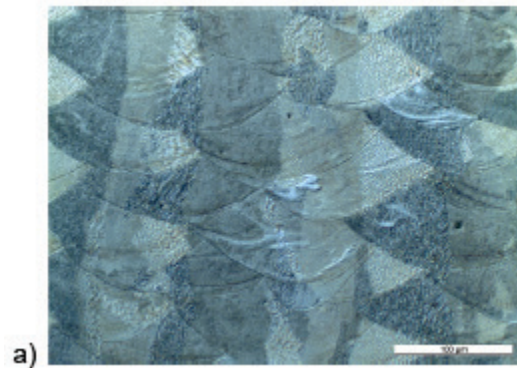
Werkstoff- und Gefügecharakteristika 3

Eine relative Materialdichte von annähernd 100 % ist möglich.

Das Bild zeigt ein Gefüge nach dem Laser-Strahlschmelzen.

Bild a) zeigt einen Längsschnitt (in der z,y-Ebene) eines Bauteils aus dem Werkstoff 1.2709. Es sind die überlappenden Schweißlinsen sichtbar.

Bild b) (x,y-Ebene) zeigt die überlappenden Schweißbahnen einer Schicht.



Stützkonstruktionen

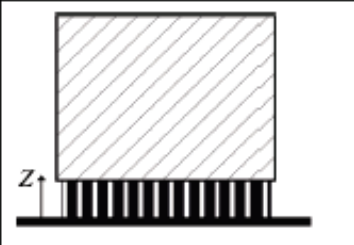
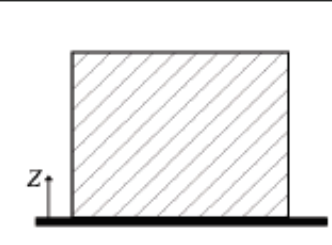
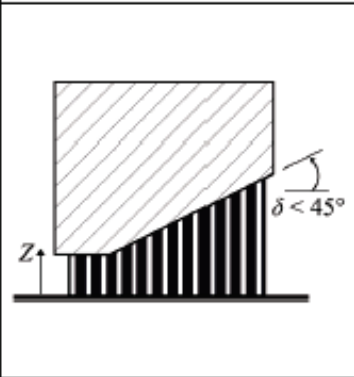
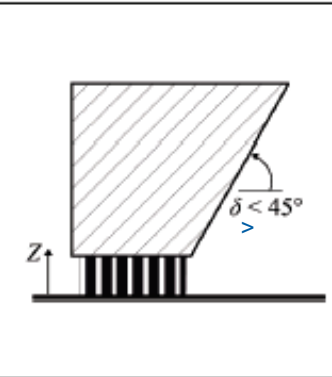
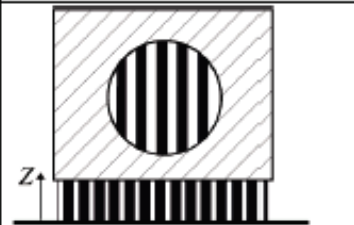
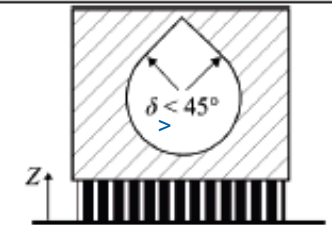
Das Laser-Strahlschmelzverfahren benötigt zur sicheren Fertigung eine Anbindung des Bauteils an die Bauplatte.

Die Anbindung erfolgt entweder direkt oder durch Stützkonstruktionen und übernimmt folgende Funktionen:

- Wärmeabfuhr
- Fixierung des Bauteils auf der Bauplatzform und
- Kompensation von eigenspannungsinduziertem Verzug

Hinweise zur Anwendung von Stützkonstruktionen sind in der Tabelle auf der nächsten Folie dargestellt.

Stützkonstruktionen 2

		<p>links: Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte mit Stützkonstruktionen rechts: direkte Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte ohne Stützkonstruktionen / left: support structures connecting the part to the build platform right: part connected directly to the build platform without support structures</p>
		<p>links: Flächen mit Downskin-Winkel $\delta < 45^\circ$^{a)} benötigen üblicherweise Stützkonstruktionen. rechts: Flächen mit Downskin-Winkel $\delta > 45^\circ$^{a)} benötigen üblicherweise keine Stützkonstruktionen. Winkelabhängige Beeinträchtigungen der Oberflächenqualität können auftreten. / left: Faces with downskin angle $\delta < 45^\circ$^{a)} normally require support structures. right: Faces with downskin angle $\delta > 45^\circ$^{a)} do not normally require support structures. The surface quality may be adversely affected, depending on the angle.</p>
		<p>links: Bohrung mit enthaltener Stützstruktur rechts: Bohrung mit angepasster Form zur Vermeidung von Stützstrukturen nach [17] / left: hole with internal support structure right: shape of hole modified to avoid use of support structures as per [17]</p>

^{a)} abhängig von Material und Prozess / subject to material and process

Bauteilorientierung, -position und -anordnung

Die Orientierung, Position und Anordnung von Bauteilen beeinflusst beim Laser-Strahlschmelzen die

- Prozesskosten
- Prozessstabilität sowie
- verschiedene Bauteileigenschaften.

Im Folgenden wird kurz auf die Wechselbeziehung der einzelnen Faktoren anhand von Beispielen eingegangen.

Beschichtung

Die meisten Strahlschmelzsysteme nutzen für die Beschichtung ein System, bei dem das Pulver durch eine Einrichtung (Keramik-, Metall- oder Silikonklinge) vom Pulvervorrat über den Bauraum in den Pulverüberlauf geschoben wird.

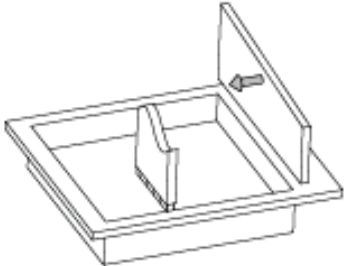
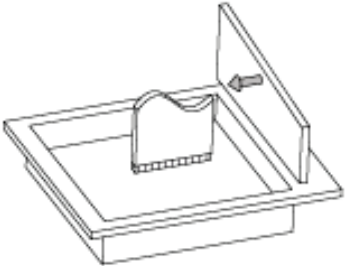
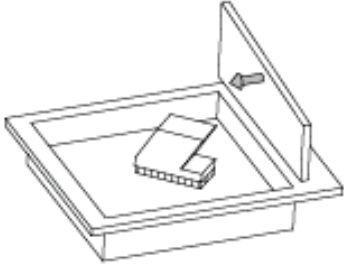
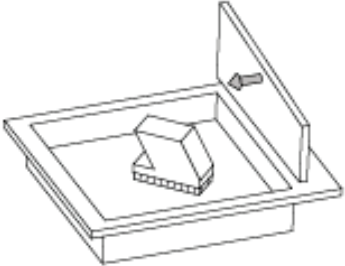
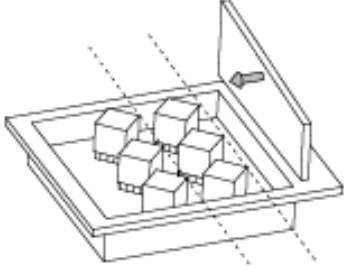
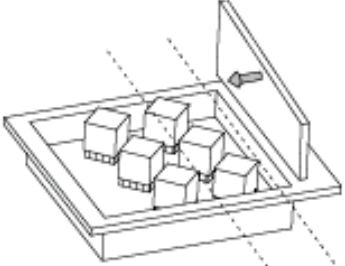
Diese Art der Beschichtung ist oft mit einem Schaben des Beschichtungssystems am aufzubauenden Bauteil verbunden.

Bauteile sind daher so zu orientieren, positionieren und anzuordnen, dass beim Schaben möglichst geringe Reibkräfte entstehen.

Folgende Punkte sollten diesbezüglich berücksichtigt werden (Tabelle 5):

- Längliche Geometrien sollten nicht parallel zum Beschichter orientiert werden, sondern mit der Beschichtungsrichtung.
- Kritische Geometrien sollten möglichst nicht gegen die Beschichtungsrichtung wachsen.
- Mehrere Bauteile im Bauraum sollten in x-Richtung versetzt platziert werden.

Bauteilorientierung, -position und -anordnung 2

Beschreibung / Description	schlecht / poor	gut / good
längliche Geometrien / longitudinal geometries		
kritische Geometrien / critical geometries		
mehrere Bauteile / multiple parts		

Wirtschaftlichkeit

Falls die Geometrie es zulässt, ein Bauteil so im Bauraum zu platzieren, dass es möglichst kostengünstig gefertigt werden kann, so gibt es abhängig von der geplanten Stückzahl unterschiedliche Optimierungskriterien:

- Ist eine Einzelfertigung geplant, so bildet die Höhe des Bauprozesses den signifikantesten Einflussfaktor auf die Kosten des Bauprozesses. Die Bauteilorientierung sollte so gewählt werden, dass eine möglichst geringe Bauhöhe resultiert.
- Ist die Fertigung einer größeren Stückzahl geplant, so sollte der Bauraum möglichst effizient genutzt werden. Die Bauteile sind so zu orientieren, dass die Anzahl der durchzuführenden Bauprozesse reduziert wird.

Stützkonstruktionen

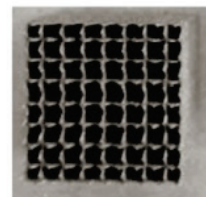
Die Orientierung und Gestalt der Bauteile hat signifikanten Einfluss auf die Menge der notwendigen Stützkonstruktionen.

Hier muss jedoch stets ein Kompromiss zwischen Stützkonstruktionen, Wirtschaftlichkeit, Prozessstabilität und Bauteilqualität geschlossen werden.

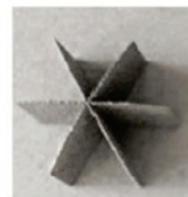
Die Tabelle veranschaulicht verschiedene Konzepte.

Die Supportstrukturen können in ihrer Form optimiert eingesetzt werden (Bild unten)

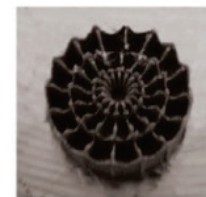
Beschreibung / Description	schlecht / poor	gut / good
Vermeidung von Stützkonstruktionen / avoiding support structures		
Vermeidung von Nachbearbeitungs- aufwand / avoiding post-processing effort		



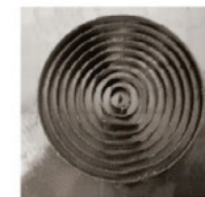
BLOCK



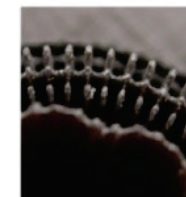
POINT



WEB



CONTOUR



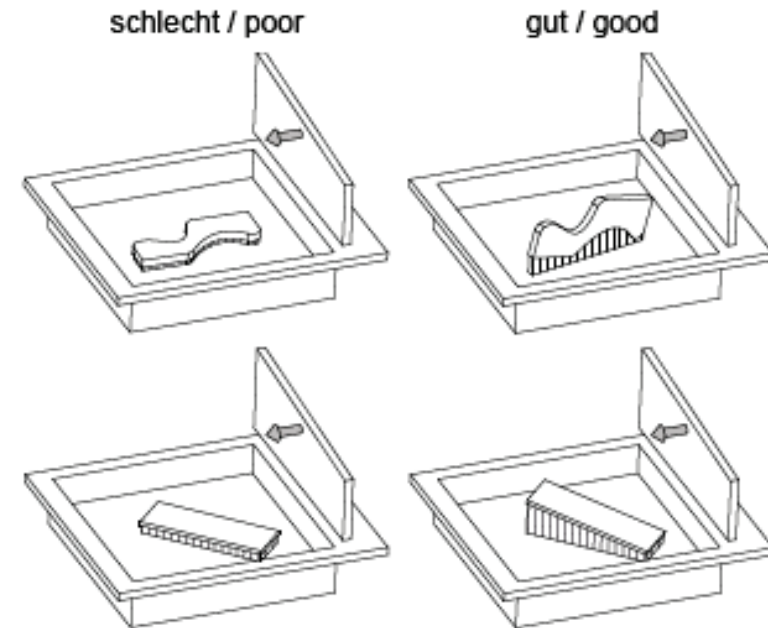
LINE

Curl-Effekt

Abhängig von der Geometrie der aufzubauenden Bauteile hat ihre Orientierung großen Einfluss auf das Ausmaß des Curl-Effekts.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, ist das Aufschmelzen großer Bauteilflächen möglichst zu vermeiden.

Ist die vorgeschlagene Orientierung nicht möglich, so kann dem Bauteilverzug nur durch entsprechende Auslegung der Stützkonstruktionen (Bild 9) und die Verwendung von Heizungen entgegengewirkt werden [19; 20].



Beispiele zur Vermeidung des Curl-Effekts bei der Belichtung großer Flächen

Anisotropie der Werkstoffeigenschaften

Basierend auf der schichtweise erfolgenden Fertigung resultieren anisotrope mechanische Werkstoffeigenschaften.

In vielen Fällen ergibt sich eine Verringerung der mechanischen Kennwerte, wie der Zugfestigkeit und der Streckgrenze in Aufbaurichtung [22; 23].

Dies ist bei der Wahl der Hauptbelastungen zu berücksichtigen.

Durch eine anschließende Wärmebehandlung kann die Werkstoffanisotropie reduziert werden.

Beispielhafte mechanische Kennwerte sind den Richtlinien VDI 3405 Blatt 2 für Werkzeugstahl 1.2709 und VDI 3405 Blatt 2.1 für die Aluminiumlegierung AlSi10Mg zu entnehmen.

Oberflächen

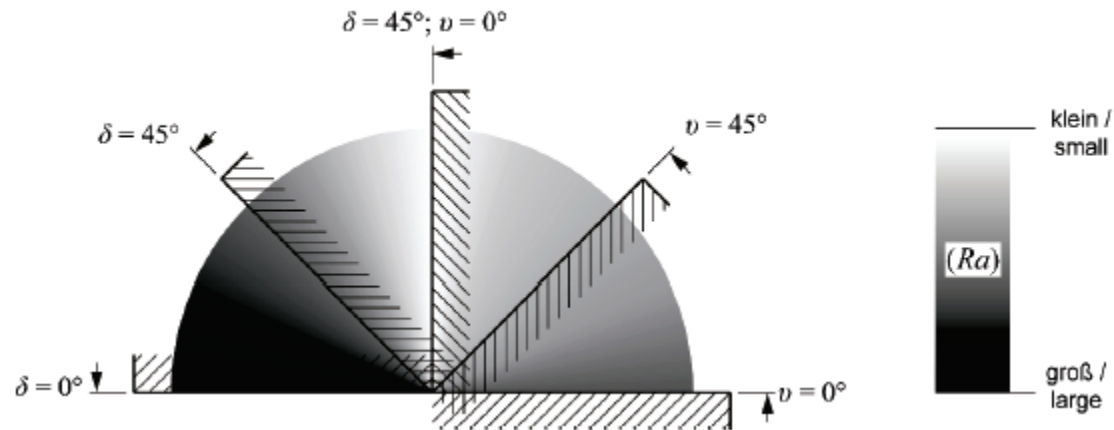
An Bauteilflächen kann es durch anhaftende Pulverpartikel zu entsprechend rauen Oberflächen kommen. Diese Oberflächen müssen gegebenenfalls nachbearbeitet werden.

Die Oberflächenrauheit ist insbesondere vom Upskin- (u) oder Downskin-Winkel (δ) der jeweiligen Teilfläche abhängig.

Bei einem Winkel von $\delta = 0^\circ$ haben Downskin-Flächen deutlich höhere Mindestrauheiten als Upskin-Flächen (u).

Für unbehandelte Oberflächen sind typischerweise mittlere Rautiefen unterhalb von $140 \mu\text{m}$ erreichbar (VDI 3405 Blatt 2).

Die Oberflächenrauheit kann durch Nachbearbeitung deutlich reduziert werden.



Qualitative Darstellung des Zusammenhangs zwischen Upskin- (u), Downskin-Winkel (δ) und der Rauheit (Ra)

Folgeprozesse zur Nachbearbeitung

Mit dem Laser-Strahlschmelzen erzeugte Bauteile erfüllen direkt nach der Fertigung zumeist nicht alle an sie gestellten Anforderungen. Daher ist häufig eine nachträgliche Bearbeitung der Bauteile mittels verschiedener Folgeprozesse erforderlich. Ziele der angewandten Folgeprozesse werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

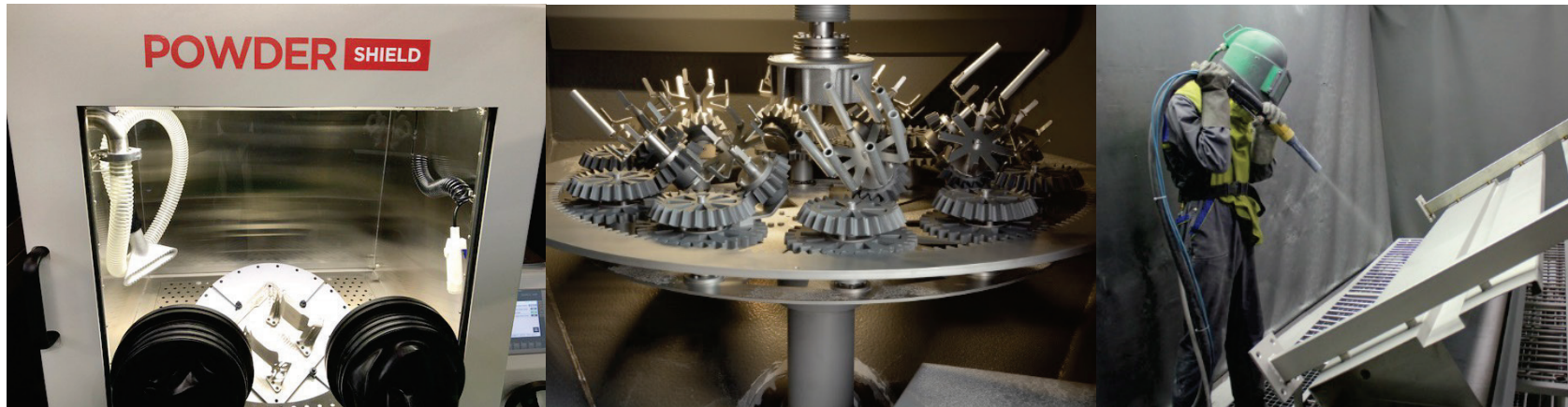
Entfernung von Pulverresten

Während der Fertigung umgibt nicht verschmolzenes Pulver das entstehende Bauteil.

Nach der Fertigung und dem Entnehmen des Bauteils aus dem Pulverkuchen haften noch einzelne Partikel an dem Bauteil.

Deren Entfernung stellt zumeist den initialen Schritt der Nachbearbeitung dar.

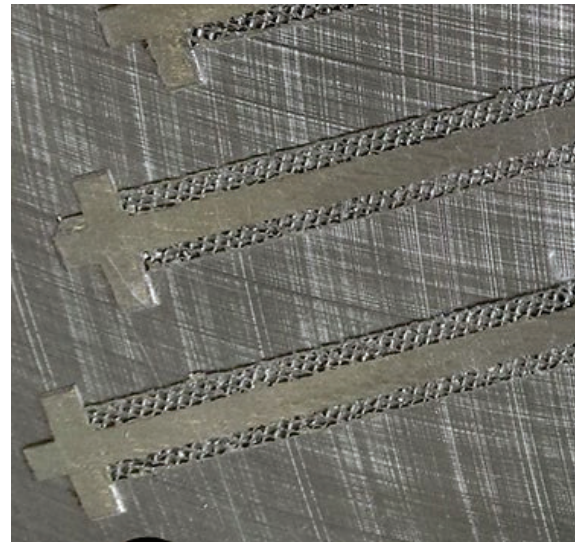
Häufig angewandte Folgeprozesse zur Entfernung von Pulverresten sind Reinigen mit Druckluft und Strahlen.



Entfernung von Stützkonstruktionen

Da mittels Laserschmelzen erzeugte Bauteile zumeist von Stützkonstruktionen unterbaut sind, müssen diese nach der Fertigung vom Bauteil entfernt werden.

Die Entfernung der Stützkonstruktionen erfolgt z. B. durch mechanische (Bandsäge, Handschleifgerät), elektrothermische (Drahterodieren) oder chemische Nachbearbeitung.

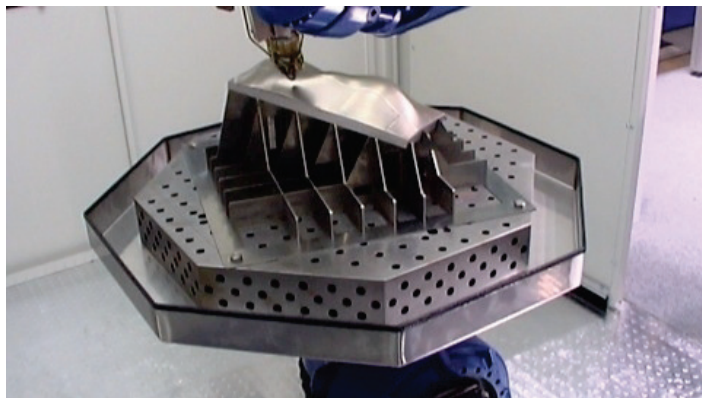


Einstellung von geometrischen Genauigkeiten

Wie die meisten additiven Fertigungsverfahren kann auch das Laserschmelzen sehr komplexe Geometrien erzeugen. Die gefertigten geometrischen Maß-, Form- und Lageabweichungen erfüllen jedoch zumeist nicht die benötigten Anforderungen.

Die nach heutigem Stand der Technik erzielbaren Genauigkeiten des Laser-Strahlschmelzens liegen in der Größenordnung von ungefähr $\pm 0,1$ mm.

Damit Funktionsflächen und Passungen ihre Funktionen erfüllen können, sollten diese daher nachbearbeitet werden. Hierzu können Fertigungsverfahren (z. B. spanabhebende Verfahren) genutzt werden, die eine hinreichende Genauigkeit erzeugen können.



Veredelung von Bauteiloberflächen

Die Herstellung von Bauteilen im Pulverbett mittels Laser-Strahlschmelzen begrenzt die minimal erzielbare Rauheit an Oberflächen, z. B. durch anhaftende Partikel.

Eine höhere Oberflächengüte kann durch nachgelagerte Verfahren erzielt werden.

Zu den häufig angewandten abtragenden Verfahren zählen

- Partikelstrahlen
- Gleitschleifen
- Strömungsschleifen
- Elektropolieren.

Durch sequenzielle Anordnung der Verfahren kann schrittweise eine Verbesserung der Oberflächengüte erzielt werden [15].

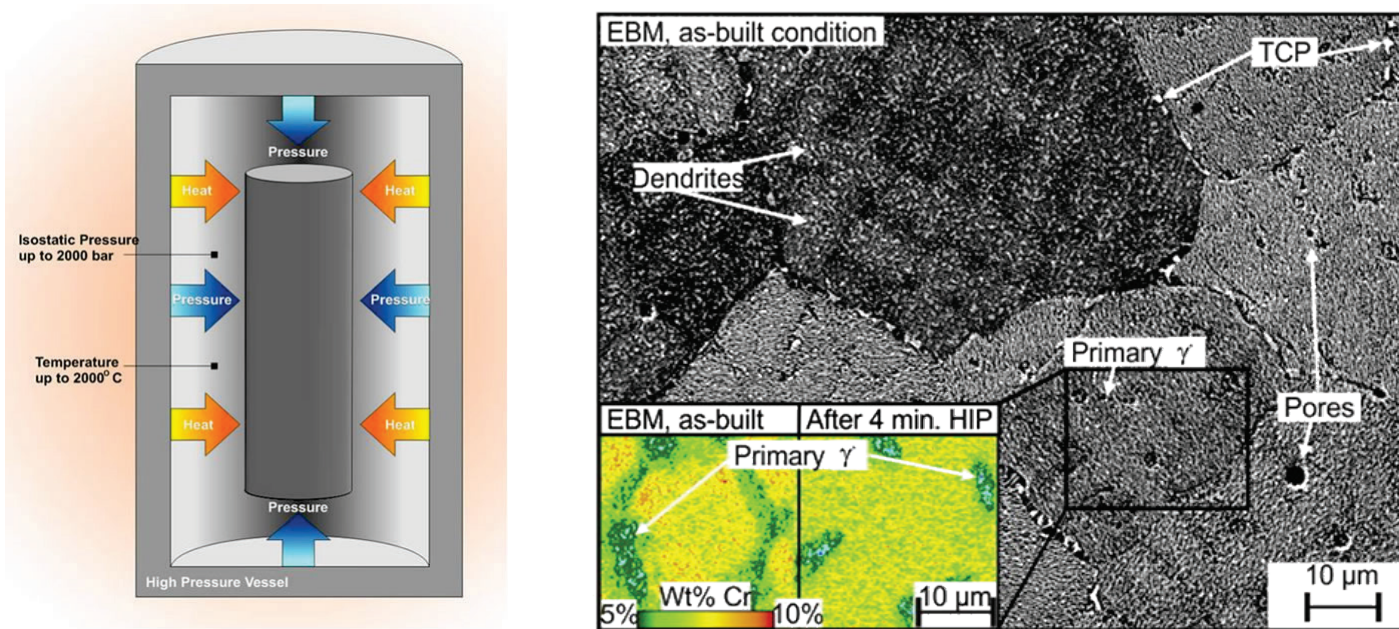
Tabelle 7 listet beispielhaft Materialdicken auf, die bei der Nachbearbeitung zum Erhalt ebener und dichter Bauteiloberflächen üblicherweise vom Bauteil zu entfernen sind und als Aufmaß vorgesehen sein sollten.

Abzutragende Materialdicke zum Erhalt ...	Oberflächenorientierung		
	nach oben weisend	nach unten weisend	seitlich
... ebener Oberflächen	0,30 mm	1,10 mm	–
... dichter Oberflächen	0,70 mm	1,60 mm	0,12 mm

Frästechnisch abzutragende Materialdicke zum Erhalt ebener und dichter Oberflächen
(Quelle: [17], S. 125)

Erhöhung der relativen Dichte des Werkstoffs

Einen bedeutenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs hat die relative Dichte (Porosität). Diese hängt von konkreten Herstellungsprozess ab. Wenngleich Laser-Strahlschmelzen nach VDI 3405 Blatt 2 typischerweise eine relative Dichte von minimal 99 % des Bezugswerts erreicht, so kann bei entsprechend hohen Anforderungen die Dichte beispielsweise mit heiß-isostatischem Pressen (HIP) erhöht werden.



Beeinflussung der Gefügestruktur und Duktilität

Ebenfalls von großer Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften ist die Gefügestruktur von mittels Laser-Strahlschmelzen hergestellten Bauteilen.

Diese ist typischerweise verschieden von den Gefügestrukturen, die durch andere urformende Verfahren erzeugt werden.

Schnelle Abkühlprozesse der Schmelze hin zur Erstarrung des Werkstoffs prägen die Gefügestrukturen, die beim Laser-Strahlschmelzen entstehen.

Zur Gewährleistung definierter mechanischer Eigenschaften sind daher für einige Werkstoffe Wärmebehandlungsverfahren zu betrachten.

Durch gezielt angepasste Temperaturführung über die Zeit können geometrische Verformungen sowie mechanische Eigenschaften eingestellt werden.

Reduzierung thermisch induzierter Eigenspannungen

Während des Laser-Strahlschmelzens induzieren die schichtweise vollzogene Herstellung sowie laterale Schrumpfungen bei der Abkühlung jeder einzelnen Schicht häufig große Eigenspannungen im gefertigten Bauteil.

Diese können durch Wärmebehandlungen reduziert werden.

Konstruktive Aspekte des Bauteils

Bei der Konstruktion typischer Geometrieelemente müssen die spezifischen Eigenschaften des Laser-Strahlschmelzens beachtet werden, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen.

Hohlräume

Hohlräume können gefertigt werden, beinhalten aber nach der Fertigung unverarbeitetes Pulvermaterial. Zur Entfernung des nicht verfestigten Pulvers muss bei der Konstruktion eine Öffnung vorgesehen werden. Je nach Gestalt müssen Hohlräume abgestützt werden.

Spalte

Spalte in einem Bauteil, die zumindest teilweise in Baurichtung ausgerichtet sind, sollten eine minimale Spaltbreite aufweisen, damit sich die spaltbildenden Oberflächen nicht verbinden.

Diese minimale Spaltbreite hängt insbesondere auch vom verwendeten Werkstoff und den verwendeten Prozessparametern ab, sollte jedoch typischerweise größer als die Schmelzbadbreite sein.

Spalte in einem Bauteil, deren Ausrichtung im Wesentlichen in einer Schichtebene liegt (normalerweise parallel zur Bauplatte) hängen in ihrem Mindestmaß insbesondere von der Schichtdicke ab.

Daher sollte das Spaltmaß typischerweise ein Mehrfaches größer als die Schichtdicke sein.

Wanddicken

Grundsätzlich erlaubt das Laser-Strahlschmelzen dünnste Wandstärken im Bereich der Schmelzbadbreite herzustellen.

Die Robustheit von Wänden hängt insbesondere von der

- Orientierung der Wände zur Beschichtungsrichtung,
- von ihrer Abstützung,
- vom Aspektverhältnis (Höhe zu Wanddicke) sowie
- dem verwendeten Werkstoff ab.

Robuste Wände sind typischerweise um ein Vielfaches dicker als die minimale Schmelzbadbreite.

Bohrungen und Kanäle

Bohrungen, deren Achse in Baurichtung hergestellt werden, sind typischerweise durch die zuvor genannte minimale Spaltbreite begrenzt.

Bohrungen, deren Achse hingegen quer zur Baurichtung hergestellt werden, müssen im Durchmesser – ähnlich wie Spalte in Schichtebene – typischerweise ein Mehrfaches der Schichtdicke aufweisen.

Dabei können sich Bohrungen in Baurichtung gegenüber solchen quer zur Baurichtung durch kleineren Durchmesser und bessere Rundheit auszeichnen.

Bohrungen quer zur Baurichtung, die einen bestimmten Durchmesser überschreiten, benötigen an den Downskin-Flächen gegebenenfalls Stützstrukturen, die gegebenenfalls nachbearbeitet werden müssen.

Kanäle, die einen entsprechend geeigneten Querschnitt aufweisen, können gegebenenfalls ohne Begrenzung des größten Maßes ohne Stützstrukturen aufgebaut werden.

Anwendungsbeispiele

Die in diesem Abschnitt dargestellten Anwendungsbeispiele zeigen die Möglichkeiten des Laser-Strahlschmelzens für zwei verschiedene Problemstellungen.

Im ersten Beispiel wird verdeutlicht, wie durch Integralbauweise die Möglichkeiten dieser Technologie bei der Herstellung von komplexen Bauteilen mit Freiformflächen und innen liegender Geometrie für medizintechnische Anwendungen ausgenutzt werden können.

Das zweite Anwendungsbeispiel zeigt, wie durch die Ausnutzung der Gestaltungsfreiheiten ein Hydraulikblock gefertigt werden kann, der gegenüber konventionell gefertigten Bauteilen mit vergleichbarer Funktion einen reduzierten Materialaufwand aufweist.

Beide Bauteile sind im Rohzustand nach der Fertigung mit bereits entfernten Stützkonstruktionen dargestellt.

Anwendungsbeispiel Integralbauweise

Ziel:

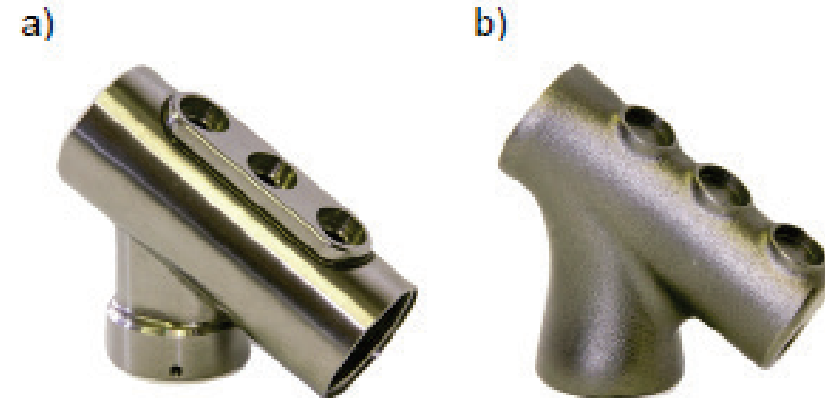
Reduzierung einer Schweißbaugruppe aus acht zerspannten Einzelteilen, Anbauteilen und Dichtungen

Ergebnis:

Reduzierung auf ein Bauteil mit weniger Dichtstellen und kundenindividuellem Design

Das Bild zeigt die ursprüngliche Schweißbaugruppe eines Hauptkörpers von einem Video-Ureteroskop

- (a) für die minimal-invasive Chirurgie sowie
- (b) das durch Laser-Strahlschmelzen hergestellte angepasste Ergebnis (Rohteil vor mechanischer Nachbearbeitung) mit integrierten Funktionen



Hauptkörper eines Video-Ureteroscops
(nach [27])

Anwendungsbeispiel Hydraulikblock

Hydraulikblock

zum Anschluss eines Differenzialzylinders
ausgelegt für 250 bar Systemdruck.

Er enthält eine Aufnahme für ein Stetigventil, zwei
Druckbegrenzungsventile, zwei Rückschlagventile,
zwei Drucksensoren und zwei Thermoelemente
sowie den Systemanschluss und Anschlüsse für
Rücklauf und Lecköl.



Hydraulikblock (Quelle: TU Hamburg-
Harburg, Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik)

Referenzen

Technische Regeln

VDI 1000:2010-06 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen; Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren; Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen; Berlin: Beuth Verlag

VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren, Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg; Berlin: Beuth Verlag

Literatur

- [1] Schmachtenberg, E.; Seul, T.: Model of isothermic lasersintering. In: 60th Annual Technical Conference of Society of Plastic Engineers (ANTEC). San Francisco, 2002
- [2] Drummer, D.; Rietzel, D.; Kühnlein, F.: Selektives Lasersintern von teilkristallinen Thermoplasten. In: RTejournal – Forum für Rapid Technologie 6 (2009) 1, ISSN 1614-0923
- [3] Rietzel, D.: Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten. Dissertation Friedrich- Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, 2011
- [4] Wegner, A.; Witt, G.: Understanding the Decisive Thermal Processes in Laser Sintering of Polyamide 12. In: Proceedings of the Polymer Processing Society 30th Annual Meeting PPS-30, Session S15, Beitrag 228, Cleveland, Ohio (USA), Polymer Processing Society, 2014
- [5] Pfister, A.: Neue Materialsysteme für das Dreidimensionale Drucken und das Selektive Lasersintern. Dissertation Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2005
- [6] Rietzel, D.; Kühnlein, F.; Drummer, D.: Characterization of New Thermoplastics for Additive Manufacturing by Selective Laser Sintering. In: SPE Proceedings ANTEC, Orlando, Florida (USA), 2010
- [7] Kaddar, W.: Die generative Fertigung mittels Laser- Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2010
- [8] Wegner, A.; Witt, G.: Laser Sintered Parts with Isotropic Mechanical Properties. In: Technical Paper – Society of Manufacturing Engineers, pp. 1–16, Dearborn, Mich., 2012, TP12PUB43
- [9] Wegner, A.; Witt, G.: Influencing Factors on Surface Roughness in Laser Sintering and Their Effect on Process Speed. In: Demmer, A.: Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference 2012, Berlin, 2012
- [10] Sauer, A.: Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005
- [11] Bacchewar, P.B.; Singhal, S.K.; Pandey, P.M.: Statistical Modelling and Optimization of Surface Roughness in the Selective Laser Sintering Process. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Bd. 221, Nr. 1, 2007, pp. 35–52
- [12] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: Generative Fertigung von Kunststoffen. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013
- [13] Westkämper, E.; Warneke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner, 2004
- [14] Patent DE102005056846B4
- [15] Rehme, O.: Cellular Design for Laser Freeform Fabrication. Dissertation TU Hamburg-Harburg, 2009. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2010, ISBN 978-3-86955-273-6
- [16] Meiners, W.: Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Dissertation RWTH Aachen, 1999. Aachen: Shaker Verlag, 1999, ISBN 3-8322-3104-8
- [17] Thomas, D.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting. Dissertation, Cardiff, 2009
- [18] Byun, H.-S.; Lee, K. H.: Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Hong-Kong, 2006
- [19] Martha, A.; Köhler, P.: Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes. In: Rtejournal – Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1, ISSN 1614-0923
- [20] Hoeren, K.P.J.; Witt, G.: Konstruktive Möglichkeiten und verfahrensspezifische Grenzen in der additiven Fertigung. Konferenz und Tagungsband der 3D-NordOst 2012 – 15. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten. Berlin: 6./7. Dezember 2012

Literatur 2

- [21] Frank, D.; Fadel, G.: Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1995
- [22] Rehme, O.; Emmelmann, C.: Rapid Manufacturing of Lattice Structures with Selective Laser Melting. In: *Proceedings of SPIE Photonics West, LASE 2006 Symposium, conference on "Laser-based Micropackaging III"*, Editors : Bachmann, F.G.; Hoving, W.; Lu, Y.; Washio, K.; Vol. 6107, Bellingham, WA, USA: The International Society for Optical Engineering, 2006, pp. 0K1–0K12, ISBN 0-8194-6149-0
- [23] Sehrt, J.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Dissertation Universität Duisburg- Essen, 2010. Aachen: Shaker Verlag, 2010, ISBN 978-3-8322-9229-4
- [24] Agarwala, M.; Bourell, D.; Beaman, J. et al.: Post-processing of selective laser sintered metal parts. In: *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 2, 1995, Bradford, UK: MCB University Press, 1995, pp. 36–44, ISSN 1355-2546
- [25] Karapatis, N.P.; Guidoux, Y.; Gygax, P.E. et al.: Thermal Behavior of Parts Made by Direct Metal Laser Sintering. In: Marcus, H.L.; Beaman, J.J.; Bourell, D.L.; Barlow, J.W.; Crawford, R.H.: *9th Solid Freeform Fabrication Proceedings 1998*, Austin, TX, USA: University of Texas, 1998, pp. 79–87, ISSN 1053-2153
- [26] Rehme, O.; Emmelmann, C.: Reproducibility for Properties of Selective Laser Melting Products. In: *Proceedings of the Third International WLT-Conference "Lasers in Manufacturing 2005"*, Editors : Beyer, E. ; Dausinger, F. ; Ostendorf, A. ; Otto, A. Stuttgart: AT-Fachverlag, 2005, pp. 227–232, ISBN 3000164022
- [27] Sehrt, J.T.; Schöler, U.: Aus acht Bauteilen mach eins dank generativer Fertigung. *CAD-CAM Report Nr. 10*, Oktober 2010, ISSN 0930-7117



Design für die Additive Fertigung

Design für die Additive Fertigung 2021 - 06

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

