

DIN EN ISO 52911-2

ICS 25.030

Einsprüche bis 2018-01-17

Entwurf

**Additive Fertigung –
Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion –
Teil 2: Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (ISO/ASTM
DIS 52911-2:2017);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO/ASTM 52911-2:2017**

Additive manufacturing –
Technical design guideline for powder bed fusion –
Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers (ISO/ASTM DIS 52911-2:2017);
German and English version prEN ISO/ASTM 52911-2:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-11-17 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nwt@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie (NWT), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 56 Seiten

DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie (NWT)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO/ASTM 52911-2:2017) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 261 „Additive manufacturing“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 438 „Additive Fertigungsverfahren“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 145-04-01 AA „Additive Fertigung“ im DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie (NWT).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 17296-2:2015	siehe DIN EN ISO 17296-2:2016-12
ISO 17296-3:2014	siehe DIN EN ISO 17296-3:2016-12
ISO/ASTM 52900:2015	siehe DIN EN ISO/ASTM 52900:2017-06
ISO/ASTM 52915:2016	siehe DIN EN ISO/ASTM 52915:2017-10

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 17296-2:2016-12, *Additive Fertigung — Grundlagen — Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (ISO 17296-2:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17296-2:2016*

DIN EN ISO 17296-3:2016-12, *Additive Fertigung — Grundlagen — Teil 3: Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren (ISO 17296-3:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17296-3:2016*

DIN EN ISO/ASTM 52900:2017-06, *Additive Fertigung — Grundlagen — Terminologie (ISO/ASTM 52900:2015); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2017*

DIN EN ISO/ASTM 52915:2017-10, *Spezifikation für ein Dateiformat für Additive Fertigung (AMF) Version 1.2 (ISO/ASTM 52915:2016); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52915:2017*

**Additive Fertigung — Technische Konstruktionsrichtlinie für
Pulverbettfusion — Teil 2: Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren
(ISO/ASTM DIS 52911-2:2017)**

Additive manufacturing — Technical design guideline for powder bed fusion — Part 2: Laser-based powder bed fusion of metals (ISO/ASTM DIS 52911-2:2017)

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokumentstufe: parallele Umfrage
Dokumentsprache: D

STD Version 2.8l

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen	9
4.1 Symbole	9
4.2 Abkürzungen	9
5 Eigenschaften von pulverbettbasierten Schmelzverfahren	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 Bauteilgröße	10
5.3 Verfahrenstypische Vorteile der PBF	10
5.4 Verfahrenstypische Nachteile der PBF	11
5.5 Wirtschaftlichkeit und Zeiteffizienz	11
5.6 Merkmalbedingte Randbedingungen (Insel, Überhang, Treppenstufeneffekt)	12
5.6.1 Allgemeines	12
5.6.2 Inseln	12
5.6.3 Überhang	12
5.6.4 Treppenstufeneffekt	12
5.7 Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten	13
5.8 Datenqualität, Auflösung, Darstellung	13
6 Konstruktionsleitlinien für die laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (LB-PBF-P)	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Werkstoff- und Gefügecharakteristika	14
6.3 Anisotropie der Werkstoffeigenschaften	15
6.4 Bauorientierung, -positionierung und -anordnung	16
6.4.1 Allgemeines	16
6.4.2 Pulverbeschichtung	16
6.4.3 Bauteilposition in der Baukammer	16
6.4.4 Übersintern	17
6.4.5 Effiziente Anordnung von Bauteilen in der Baukammer	17
6.5 Oberflächenrauheit	17
6.6 Folgeprozesse zur Nachbearbeitung	17
6.7 Konstruktive Aspekte	18
6.7.1 Berücksichtigung der Pulverentfernung	18
6.7.2 Reduzierung von Verzug	19
6.7.3 Wanddicke	19
6.7.4 Spalte, Zylinder und Bohrungen	19
6.7.5 Gitterstrukturen	19
6.7.6 Fluidkanäle	20
6.7.7 Federn und elastische Elemente	21
6.7.8 Verbindungselemente und Beschläge	21

6.7.9	Statische Baugruppen	22
6.7.10	Bewegliche Baugruppen	22
6.7.11	Lager	23
6.7.12	Gelenke	23
6.7.13	Integrierte Kennzeichnung	24
6.7.14	Schneiden und Fügen	24
6.8	Anwendungsbeispiel	25
6.8.1	Funktionelles Spielzeugauto mit eingebauter Feder	25
6.8.2	Roboter-Greifer	26
7	Schlussfolgerungen	27
	Literaturhinweise	28

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO/ASTM 52911-2:2017) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 261 „Additive manufacturing“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 438 „Additive Fertigungsverfahren“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/ASTM DIS 52911-2:2017 wurde von CEN als prEN ISO/ASTM 52911-2:2017 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 261. ISO 52911-2 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 261, *Additive manufacturing*, in Zusammenarbeit mit ASTM F42 auf Basis eines Partnerschaftsvertrags zwischen ISO und ASTM International erarbeitet, mit dem Ziel, einen gemeinsamen Satz von ISO/ASTM-Normen zur Additiven Fertigung zu schaffen.

Unter dem allgemeinen Titel *Additive Fertigung — Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion* sind weitere Normen in Erarbeitung, z. B. für die laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

ISO 52911-2 beruht auf der Technischen Regel des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) VDI 3405 Blatt 3, *Additive Fertigungsverfahren — Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*.

Zweck dieser Leitlinie ist, Anwender dieser Technik bei der Gestaltung von Bauteilen zu unterstützen, die mit laserbasierter Pulverbettfusion von Metallen gefertigt werden müssen. Ferner zielt diese Leitlinie darauf ab, ISO/ASTM DIS 52910, *Standardverfahren — Richtlinie zur Konstruktion bei Additiver Fertigung*, mit Schwerpunkt auf Pulverbettfusionsverfahren zu ergänzen.

Einleitung

Die laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (LB-PBF-P) beschreibt ein additives Fertigungsverfahren (AM) und bietet eine zusätzliche Fertigungsmöglichkeit neben etablierten Verfahren. LB-PBF-P bietet die Möglichkeit, Fertigungsdauer und -kosten zu senken und die Funktionalität von Bauteilen zu erhöhen. Bei den konventionellen, seit Langem etablierten Fertigungsverfahren wie Trennen, Fügen und den formgebenden Verfahren durch z. B. spanende Bearbeitung, Schweißen oder Spritzguss sind Praktikern die Stärken und Schwächen bekannt und sie werden bei der Konstruktion und bei der Auswahl des Fertigungsverfahrens angemessen berücksichtigt. Bei der LB-PBF-P und AM im Allgemeinen fehlt den Konstrukteuren und Fertigungsplanern dieser Erfahrungsschatz bislang noch weitgehend. Dabei bieten diese LB-PBF-P-Verfahren durch Wegfall von Einschränkungen konventioneller Verfahren Konstrukteuren und Herstellern ein hohes Maß an Gestaltungsfreiheit und dies erfordert ein Verständnis der Möglichkeiten und Einschränkungen des Verfahrens.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm bezweckt, Konstrukteuren und Fertigungsplanern eine Arbeitsgrundlage zu geben, die ihnen die sachkundige Verwendung der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren ermöglicht. Diese Norm beschreibt die Merkmale der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren und bietet detaillierte Konstruktionsempfehlungen. Einige der grundlegenden Prinzipien können auch auf andere AM-Verfahren angewendet werden, vorausgesetzt, dass die prozessspezifischen Merkmale berücksichtigt werden. Zweck dieser Norm ist, Praktikern dabei zu helfen, die Vorteile der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren kennenzulernen und die verfahrensbezogenen Einschränkungen bei der Gestaltung von Bauteilen zu verstehen.

Das Dokument bietet eine Überprüfung von Konstruktionsleitfäden auf dem Stand der Technik im Zusammenhang mit pulverbettbasiertem Schmelzen, indem relevantes Wissen zu diesem Verfahren zusammengeführt und der Anwendungsbereich von ISO/ASTM DIS 52910 erweitert wird.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 17296-2:2015, *Additive manufacturing — General principles — Part 2: Overview of process categories and feedstock*

ISO 17296-3:2014, *Additive manufacturing — General principles — Part 3: Main characteristics and corresponding test methods*

ISO/ASTM DIS 52910, *Standard Practice — Guide for Design for Additive Manufacturing*

ISO/ASTM DIS 52901:2015, *Additive manufacturing — General principles — Requirements for purchased AM parts*

ISO/ASTM 52900:2015, *Additive manufacturing — General principles — Terminology*

ISO/ASTM 52915:2016, *Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO/ASTM 52900:2015 und die folgenden Begriffe.

3.1

Curl-Effekt

Wärme- und Eigenspannungseffekte

<Aspekte des durch thermischen Einfluss hervorgerufenen Verzugs> Maßverzug durch Abkühlen und Erstarren des gedruckten Bauteils nach dem Aufbau

3.2

Downskin-Fläche

Überhangfläche

D

(Teil-)Fläche, deren Normalenvektor in Bezug zur z-Achse negativ ist (Bild 1)

3.3

Downskin-Winkel

Überhangwinkel

δ

Winkel zwischen der Bauplattformebene und der Downskin-Fläche, der Werte zwischen 0° (parallel zur Bauplattform) und 90° (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann (Bild 1)

3.4

Upskin-Fläche

Aufbaufläche

U

(Teil-)Fläche, deren Normalenvektor $\vec{n}$ in Bezug zur z-Achse positiv ist (Bild 1)

3.5

Upskin-Winkel

Aufbauwinkel

ν

Winkel zwischen der Bauplattformebene und der Upskin-Fläche, der Werte zwischen 0° (parallel zur Bauplattform) und 90° (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann (Bild 1)

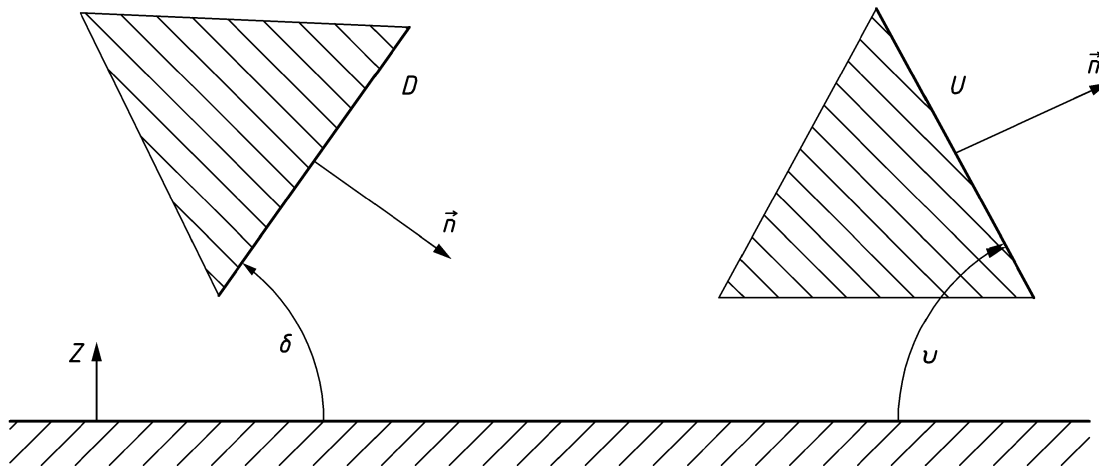


Bild 1 — Upskin- und Downskin-Flächen U und D , Upskin- und Downskin-Winkel ν und δ , Normalenvektor $\vec{n}$

[QUELLE: [0] VDI 3405 Blatt 3:2015]

4 Symbole und Abkürzungen

4.1 Symbole

In dieser Norm werden die nachfolgend aufgeführten Symbole verwendet, siehe Tabelle 1:

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Überhang	mm
D	Downskin-Fläche, Überhangfläche	mm ²
I	Insel	mm ²
$\vec{n}$	Normalenvektor	—
Ra	Mittenrauwert	μm
Rz	gemittelte Rautiefe	μm
U	Upskin-Fläche, Aufbaufläche	mm ²
δ	Downskin-Winkel, Überhangwinkel	°
ν	Upskin-Winkel, Aufbauwinkel	°

4.2 Abkürzungen

In dieser Norm werden die nachfolgend aufgeführten Abkürzungen verwendet:

AM	additive Fertigung
AMF	Dateiformat für additive Fertigung
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine (de: digitale Bildgebung und -kommunikation in der Medizin)
P	Bauteil
CAD	computergestützte Konstruktion
CT	Computer-Tomographie
HIP	heiß-isostatisches Pressen
MRI	bildgebende Kernspintomographie
LB-PBF	laserbasierte Pulverbettfusion
LB-PBF-M	laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (auch bezeichnet als z. B. Laser-Strahlschmelzen, selektives Laserschmelzen)
LB-PBF-P	laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (auch bezeichnet als z. B. Laser-Strahlschmelzen, selektives Laserschmelzen)
PBF	pulverbettbasiertes Schmelzen
STL	Stereo-Lithographie-Format oder Oberflächen-Tesselationssprache

5 Eigenschaften von pulverbettbasierten Schmelzverfahren

5.1 Allgemeines

Die spezifischen Eigenschaften der jeweilig eingesetzten Fertigungsverfahren müssen berücksichtigt werden, um ein Bauteil optimal zu gestalten. Nachfolgend sind Beispiele für die Besonderheiten der additiven Fertigungsverfahren aufgelistet, die es in Konstruktions- und Prozessplanungsphasen zu beachten gilt.

5.2 Bauteilgröße

Die Bauteilgröße wird durch die Arbeitsfläche/das Arbeitsvolumen der PBF-Maschine begrenzt. Auch die Bildung von Rissen und Verformungen aufgrund von Eigenspannungen begrenzt die maximale Bauteilgröße. Ein weiterer wichtiger praktischer Faktor, der die maximale Bauteilgröße begrenzt, sind die Fertigungskosten, die in einem direkten Verhältnis zu Größe und Volumen des Bauteils stehen. Die Fertigungskosten können minimiert werden, indem die Bauteilposition und Bauorientierung in einer Weise gewählt werden, die das Verschachteln von möglichst vielen Bauteilen ermöglicht. Die Kosten für das Pulver, das benötigt wird, um das Bett auf das erforderliche Volumen zu füllen (Bauteiltiefe x Bettfläche) können auch in Betracht gezogen werden. Regeln zur Wiederverwendung von Pulver haben eine erhebliche Auswirkung auf die Kosten. Falls Wiederverwendung unzulässig ist, wird das gesamte Pulver, ungeachtet des erstarrten Volumens verworfen.

5.3 Verfahrenstypische Vorteile der PBF

Die PBF-Verfahren können vorteilhaft bei der Bauteilfertigung eingesetzt werden, wenn die folgenden Punkte zutreffen:

- Bauteile lassen sich endkonturnah (d. h. nah an der endgültigen Form und Größe), ohne Nachbearbeitungswerkzeuge in einem Prozessschritt fertigen.
- Die Freiheitsgrade der Gestaltung von Bauteilen sind typischerweise hoch. Fertigungstechnische Restriktionen konventioneller Verfahren entfallen üblicherweise, z. B. für:
 - Werkzeugzugänglichkeit;
 - Hinterschnitte.
- Es lässt sich eine große Bandbreite an komplexen Geometrien herstellen, wie:
 - Freiformgeometrien, z. B. organische Strukturen [11];
 - topologisch optimierte Strukturen;
 - Füllstrukturen, z. B. Waben-, Sandwich- und Netzstrukturen.
- Der Grad der Bauteilkomplexität ist weitgehend unabhängig von den Fertigungskosten.
- Montage- und Fügevorgänge können durch eine einteilige Gestaltung reduziert werden.
- Die Gesamteigenschaften des Bauteils können lokal durch Einstellung der Prozessparameter gezielt konfiguriert werden.
- Verkürzung der Hauptzeit bis zur Bauteilfertigung.

5.4 Verfahrenstypische Nachteile der PBF

Bedingt durch den AM-Prozess gibt es verfahrenstypische Nachteile, die bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen sind:

- Es können Schrumpfungen, Eigenspannungen oder Verformungen durch lokale Temperaturunterschiede entstehen.
- Die Oberflächengüte von additiv gefertigten Bauteilen wird typischerweise durch den schichtweise erfolgenden Aufbau beeinflusst (Treppenstufeneffekt). In Abhängigkeit vom Anwendungsfall ist eine Nachbearbeitung möglicherweise erforderlich.
- Die Abweichungen der Maßhaltigkeit, der Form- und der Lagegenauigkeit von Bauteilen müssen beachtet werden. Daher muss gegebenenfalls ein Aufmaß zur Nachbearbeitung vorgesehen werden. Erforderliche geometrische Genauigkeiten können durch eine gezielte Nachbearbeitung eingestellt werden.
- Bei der Prozessplanung müssen anisotrope Eigenschaften berücksichtigt werden, die durch den schichtweise erfolgenden Aufbau typischerweise auftreten können.
- Nicht alle für konventionelle Verfahren verfügbaren Werkstoffe sind bislang für PBF-Verfahren geeignet.
- Werkstoffeigenschaften können von erwarteten Werten abweichen, die aus anderen Techniken, wie Spritzgießen und Gießen bekannt sind. Werkstoffeigenschaften können durch verfahrenstechnische Einstellungen und Lenkung erheblich beeinflusst werden.

5.5 Wirtschaftlichkeit und Zeiteffizienz

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 muss so gewählt werden, dass eine möglichst geringe Bauhöhe resultiert, vorausgesetzt, die Geometrie lässt diese Orientierung zu.
- Ist die Fertigung einer größeren Stückzahl geplant, so muss der Bauraum möglichst effizient genutzt werden. Vorausgesetzt, dass die Bauteilgeometrie diese Orientierung zulässt, müssen Strategien zur Neuorientierung und Verschachtelung angewendet werden, um den verfügbaren Bauraum zu maximieren.
- Das nach einem Aufbau im System verbleibende Pulver kann in einigen Fällen wiederverwendet werden. Die Wiederverwendung ist abhängig von Anwendung, Werkstoff und besonderen Anforderungen. Pulverwechsel können ineffizient und zeitaufwendig sein. Obwohl sie beim Wechsel der Werkstoffart notwendig sind, können Pulver aus Aufbauten desselben Werkstoffs wiederverwendet werden. Es ist wichtig, anzumerken, dass sich das Recycling von Pulver auf die Pulvergrößenverteilung auswirken kann, was im Gegenzug die endgültigen Bauteileigenschaften beeinflussen wird. Wie oft ein Pulver rezykliert werden kann, ist vom Maschinenhersteller und dem Werkstoff abhängig.

5.6 Merkmalbedingte Randbedingungen (Insel, Überhang, Treppenstufeneffekt)

5.6.1 Allgemeines

Aufgrund des schichtweise erfolgenden Aufbaus von AM-Bauteilen, kann zu einem beliebigen Zeitpunkt des Aufbaus eine Trennung von Elementen auftreten. Das ist durch die Bauteilgeometrie bedingt. Diesbezüglich müssen die folgenden Fälle als kritisch (das Niveau der Kritikalität ist abhängig von der zu betrachtenden PBF-Technologie) identifiziert werden.

5.6.2 Inseln

Inseln (I) sind Besonderheiten, die erst im späteren Verlauf des Bauprozesses zu einem Bauteil (B) verbunden werden. Die Herstellung dieser Verbindung ist bei der Bauteilgestaltung zu berücksichtigen. Bauteile, die in ihrer gesamten Gestalt stabil sind, können so während des Bauprozesses einen instabilen Zustand einnehmen (Bild 2 links und Mitte).

ANMERKUNG Inseln sind unter Umständen nicht gegen mechanische Belastungen im Pulverauftragsprozess geschützt. Das kann zu Deformationen der Inseln führen.

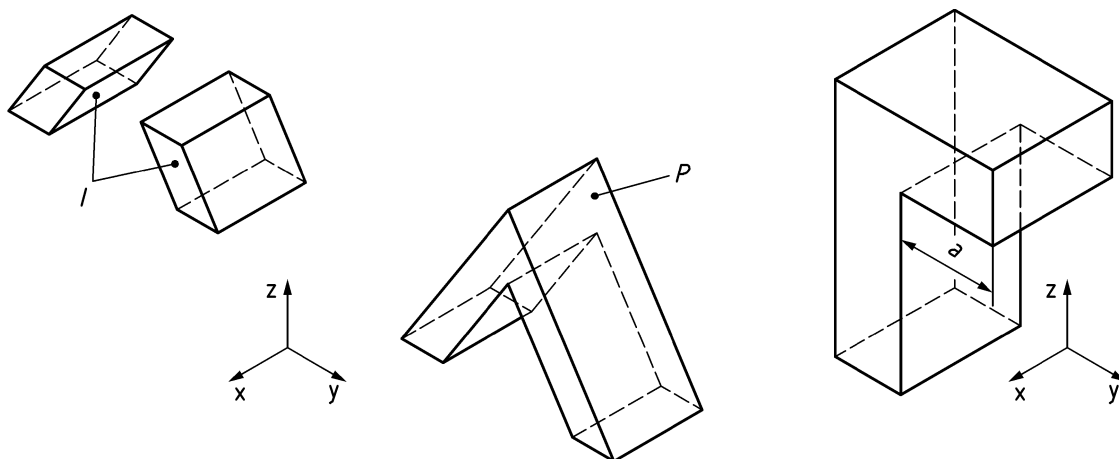


Bild 2 — Inseln I (links) und Überhang a (rechts) während des Bauprozesses von Bauteil P in Richtung der z -Achse Z

[QUELLE: VDI 3405 Blatt 3:2015]

5.6.3 Überhang

Bei Flächen mit einem Überhang-Winkel von 0° ergibt sich ein Überhang mit der Länge a (Bild 2, rechts). Bei kleinen Überhängen ist z. B. keine Zusatzgeometrie in der Form von Stützkonstruktionen notwendig. Hier trägt sich der auskragende Bereich während der Fertigung selber. Die zulässigen Werte für a sind abhängig vom spezifischen PBF-Verfahren, dem Werkstoff und den verwendeten Prozessparametern.

5.6.4 Treppenstufeneffekt

Bedingt durch die schichtweise erfolgende Fertigung wird die 3-D-Geometrie des Bauteils vor der Fertigung in eine 2,5-D-Darstellung überführt, mit diskreten Stufen in Baurichtung. Der resultierende Fehler durch die Abweichung dieser 2,5-D-Darstellung von der ursprünglichen Geometrie wird als Treppenstufeneffekt bezeichnet. Das Ausmaß wird maßgeblich durch die Schichtdicke beeinflusst (Bild 3).

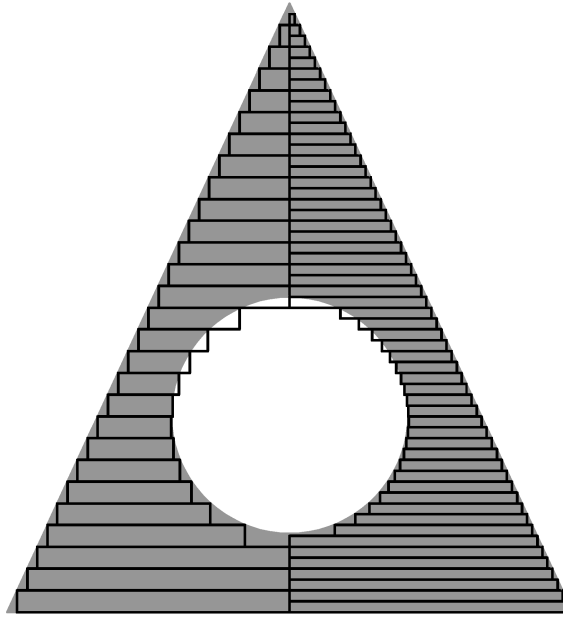


Bild 3 — Auswirkung des Treppenstufeneffekts bei unterschiedlichen Schichtdicken

[QUELLE: VDI 3405 Blatt 3:2015]

5.7 Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten

Typischerweise sind keine Genauigkeiten erreichbar, die mit konventionellen werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren erreicht werden können. Deshalb kann für die Erfüllung der (Kunden-)Anforderungen eine Nachbearbeitung erforderlich sein. Die Nachbearbeitung kann subtraktive Fertigung, Oberflächenbearbeitung, thermische Prozesse oder andere Bearbeitungsschritte nach ISO/ASTM DIS 52910, *Standard Practice/Guide for Design for Additive Manufacturing*, umfassen.

In dieser Hinsicht ist es besonders wichtig, die Prozessparameter, die die Eigenschaften des End-Bauteils beeinflussen werden, zu beachten und zu berücksichtigen. Beispielsweise können je nach Bauteilorientierung unterschiedliche Genauigkeiten erreicht werden. Durch den Aufbau in Schichten kann es zu richtungsabhängigen (anisotropen) Schrumpfungen des Bauteils kommen. Als weiteres Beispiel kann die Konsistenz des schichtweisen Aufbaus durch die Anordnung des Bauteils auf der Bauplattform möglicherweise beeinflusst werden.

5.8 Datenqualität, Auflösung, Darstellung

Die Anwendung von AM erfordert 3-D-Geometriedaten, die üblicherweise als ein tesseliertes Modell dargestellt werden; es können jedoch auch andere Darstellungen verwendet, wie Voxel- oder „Sliced-Layer“-Darstellungen. Bei tesselierten Daten, beschreiben Dateien die Oberflächengeometrie eines Bauteils als Netz aus dreieckigen Maschen. Dabei werden die Eckpunkte der Dreiecke nach der Rechte-Hand-Regel sowie der jeweilige Normalenvektor erfasst. Als Datenaustauschformat hat sich das STL-Datenformat (Stereo-Lithographie-Format oder Oberflächen-Tesselationssprache) als Quasi-Industriestandard etabliert. Weitere Formate umfassen AMF, einen ISO/ASTM-Standard, und 3MF, das von einem Branchenkonsortium unter der Führung von Microsoft gefördert wird.

In einer Tesselation werden gekrümmte Bauteilflächen durch Dreiecke angenähert und die gewählte Auflösung der Tesselation bestimmt die Geometriequalität des zu fertigenden Bauteils. Bei zu grober Auflösung werden die in der STL-Datei definierten Dreiecksseiten auf der gefertigten Teileoberfläche sichtbar (d. h. sie erscheint facettiert). Eine zu hoch aufgelöste Tesselation beansprucht jedoch erheblichen Speicherplatz und verlangsamt den Datentransfer und die Verarbeitung durch prozessvorbereitende Software. Die Auflösung einer Tesselation wird in der Regel durch ein Toleranzmaß beeinflusst, das oft als

„Sehnenhöhe“ bezeichnet wird und das den maximalen Wert beschreibt, den ein Punkt auf der Bauteiloberfläche von dem erzeugten Dreieck abweichen darf. Daher führen geringere Genauigkeitswerte zu niedrigeren Abweichungen von der tatsächlichen Bauteiloberfläche. Auf Grundlage praktischer Erfahrung wird die Genauigkeit so eingestellt, dass sie mindestens 5-mal kleiner als die Auflösung des AM-Verfahrens ist. Infolgedessen wird eine Einstellung der Sehnenhöhe von 0,01 mm bis 0,02 mm für die meisten PBF-Verfahren empfohlen. Weitere Parameter stehen systemabhängig zur Einstellung der Vernetzungsgenauigkeit zur Verfügung.

AMF unterstützt die Darstellung von Informationen über die Geometrie hinaus. Beispielsweise werden bauteilbezogene Maßeinheiten (Millimeter, Meter, Zoll), Farben, Werkstoffe und Gitterstrukturen unterstützt. STL-Dateien enthalten ausschließlich die tesselierte Geometrie, während 3MF-Dateien einige der vom AMF bekannten Fähigkeiten zur Meta-Datendarstellung besitzen. Für die Kommunikation der Bauteilgröße ist es sehr wichtig, dass die Datenaustauschdatei Maßeinheiten enthält.

Falls die Bauteilgeometrie aus einer 3-D-Bildgebungsmodalität importiert wird, wie CT oder MRI, dann sind die Daten aus Voxeln zusammengesetzt. Das DICOM-Format ist der Branchenstandard für medizinische Bildgebungsverfahren und für einige AM-Software-Werkzeuge sind diese Dateien direkt lesbar. Die Geometrieauflösung wird durch die Auflösung des Bildgebers gesteuert.

6 Konstruktionsleitlinien für die laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (LB-PBF-P)

6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt berücksichtigen die Konstruktionsleitlinien die spezifischen Eigenschaften der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren. Im Allgemeinen ähnelt das pulverbettbasierte Schmelzverfahren für Polymere dem für Metalle, da es eine Wärmequelle umfasst, die das Verschmelzen der Pulverpartikel herbeiführt sowie ein Verfahren zur Begrenzung der Pulverschmelzung auf einen bestimmten Teilbereich je Schicht und Mechanismen zum Hinzufügen der Pulverschichten. Üblicherweise verwendete Werkstoffe sind Polyamide (PA 11, PA 12 und Abkömmlinge davon), obwohl andere Werkstoffe ebenso verarbeitet werden können. Einige unverschmolzene Pulver können für nachfolgende Aufbauten rezykliert werden, üblicherweise durch Mischen von rezykliertem mit Neupulver. Ferner können Werkstoffe mit anderen Werkstoffen gefüllt oder gemischt werden, wie Glas oder Kohlenstofffasern, um die Festigkeit sowie thermische, elektrische und flammhemmende Eigenschaften zu verbessern. Dieser Abschnitt beschreibt die Bedeutung von Bauorientierung, -positionierung und -anordnung; Werkstoffeigenschaften verschmolzener Polymere; Oberflächeneigenschaften verschmolzener Polymere, Aspekte der Nachbearbeitung und sonstige konstruktiven Aspekte [1].

6.2 Werkstoff- und Gefügecharakteristika

Für die laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren sind verschiedene pulverförmige Thermoplaste verfügbar, wobei schwerpunktmäßig teilkristalline Materialien verwendet werden. Bei der Pulverbettfusion von Polymeren wird das Pulverbett vorgeheizt und die Temperatur wenige Grad unter der Schmelztemperatur des Polymers gehalten. Die erhöhte Temperatur des Pulverbetts verringert nicht nur den für das Schmelzen erforderlichen Energieeinsatz des Lasers, sondern verhindert auch, dass geschmolzenes Polymer während des Bauvorgangs rekristallisiert. Rekristallisation während des Bauvorgangs trägt zu Schrumpfung und Verzug des Bauteils bei, was ein Misslingen des Aufbaus zur Folge haben kann. PBF-Polymere weisen häufig eine höhere Schmelztemperatur als die Rekristallisationstemperatur auf, und diese Differenz legt das Verarbeitungsfenster fest, das im PBF-Verfahren genutzt werden kann [1]. Bei amorphen Thermoplasten wird aufgrund des hier typischen weiten Erweichungsbereichs eine derartige Prozessführung verhindert. Die durch den Laser belichteten Bereiche erstarren unmittelbar bei Kontakt. Hierdurch werden das mit dem Verschmelzen einhergehende viskose Fließen und die Spannungsrelaxation verhindert und die Bauteile sind durch hohe Porosität und niedrige mechanische Festigkeit gekennzeichnet [2 (Schmachtenberg, E.; Seul, T.) bis 4 (Rietzel, D.)].

Aufgrund ihrer erwünschten Eigenschaften bei der PBF von Polymeren sind die gängigsten Polymere teilkristalline Polyamide, einschließlich PA 12, PA 11 und Abkömmlinge davon, wie glasgefülltes PA 12 und flammhemmendes PA 11. In Sonderfällen können auch amorphe, nicht bindbare, elastomere, Polymer-Polymer-Mischungen und duroplastische Werkstoffe mit PBF verarbeitet werden. Eine Auswahl zur Verfügung stehender Werkstoffe ist in Tabelle 2 angegeben. Werkstoff-Datenblätter können von Werkstofflieferanten und Dienstleistern bezogen werden.

Tabelle 2 — Überblick zu verfügbaren Werkstoffen für die LB-PBF-P [5]

Polymerpulverwerkstoff	Anwendungsfeld	Haupteigenschaften
Teilkristalline Polymere z. B. PA 12	(Halb-)starre Polymerbauteile	Langzeit-Gebrauchstauglichkeit
Hochtemperatur-teilkristalline Polymere z. B. PEEK	Hochtemperatur-Polymerbauteile	Langzeit-Gebrauchstauglichkeit
Amorphes Polymer z. B. PS	Feinguss und verlorene Gussmuster	Genau und teilweise porös
Als Bindemittel verwendete Opfer-Polymere z. B. PMMA	Metall- oder Keramikbauteile	Thermisch abbaubare und amorphe Polymere
Gefüllte teilkristalline Polymere z. B. PA-GF, PA-Al, PA-Cu	Bauteile mit besonderen Eigenschaften	Langzeit-Gebrauchstauglichkeit und Beständigkeit gegen hohe Belastungen
Elastomere Polymere z. B. TPU	Elastische Bauteile	Langzeit-Gebrauchstauglichkeit
Polymer-Polymer-Mischungen	Entstehende Anwendungen	Spezialisierte Anwendungen
Wärmehärtende Polymere z. B. Epoxidharze	Entstehende Anwendungen	Verwendung chemischer Bindemittel

Die Werkstoffeigenschaften sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, einschließlich der Art des Polymers, der Partikelgröße, dem Grad des Pulverrecyclings und der Verarbeitungsbedingungen. Insbesondere die Temperaturverteilung während des Bauvorgangs wirkt sich erheblich auf die Werkstoffeigenschaften aus. Die Temperaturverteilung im Bauteilbett wird beeinflusst durch das Ausmaß und die Gleichförmigkeit des Vorwärmens, die Bauteildichte im Bauteilbett, die Laserenergiedichte und die Geschwindigkeit der Abkühlung nach dem Aufbau. Pauschale Aussagen bezüglich des erzielbaren Gefüges und der damit verbundenen Eigenschaften sind deshalb schwierig zu treffen [3]. Umfängliche Untersuchungen zu Polyamiden ergaben jedoch, dass Festigkeiten erreicht werden können, die mit denen von im Spritzguss hergestellten Bauteilen mit geringer Variabilität (etwa 10 %) vergleichbar sind, sogar bei orthogonal zur Bauebene orientierten Bauteilen, auch wenn die Bruchdehnung üblicherweise um eine Größenordnung niedriger ist, als die von im Spritzguss gefertigten Teilen [1].

6.3 Anisotropie der Werkstoffeigenschaften

Bei der LB-PBF-P weisen Bauteile zumeist eine deutliche Anisotropie zwischen den Orientierungen auf. Typische Wertebereiche der mechanischen Kennwerte von PA 12 aus einem Ringversuch sind in VDI 3405 Blatt 1 angegeben. Die Anisotropie innerhalb der Bauebene, d. h. zwischen x- und y-Richtung, ist bei Verwendung von sich alternierend kreuzenden Scan-Richtungen sehr gering [7] (Kaddar, W.). Eine besonders starke Anisotropie bildet sich dagegen zwischen der Bauebene und der z-Achse (z-Richtung) aus. Hierbei weist vor allem die Festigkeit und die Bruchdehnung größere Differenzen zwischen den