

DIN EN ISO 52911-1

ICS 25.030

Einsprüche bis 2018-01-17

Entwurf

**Additive Fertigung –
Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion –
Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen
(ISO/ASTM DIS 52911-1:2017);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO/ASTM 52911-1:2017**

Additive manufacturing –
Technical design guideline for powder bed fusion –
Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals (ISO/ASTM DIS 52911-1:2017);
German and English version prEN ISO/ASTM 52911-1:2017

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 60 Seiten

DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie (NWT)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO/ASTM 52911-1:2017) 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 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen
(ISO/ASTM DIS 52911-1:2017)**

Additive manufacturing — Technical design guideline for powder bed fusion — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals (ISO/ASTM DIS 52911-1:2017)

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 pulverbettbasierte Schmelzverfahren – Allgemeine Bemerkungen	10
5.1 Allgemeines	10
5.1.1 Bauteilgröße	10
5.2 Verfahrenstypische Vorteile der PBF	10
5.3 Verfahrenstypische Nachteile der PBF	11
5.4 Wirtschaftlichkeit und Zeiteffizienz	11
5.5 Merkmalbedingte Randbedingungen (Insel, Überhang, Treppenstufeneffekt)	12
5.5.1 Allgemeines	12
5.5.2 Inseln	12
5.5.3 Überhang	12
5.5.4 Treppenstufeneffekt	13
5.6 Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten	13
5.7 Datenqualität, Auflösung, Darstellung	13
6 Konstruktionsleitlinien für die laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (LB-PBF-M)	14
6.1 Allgemeine konstruktive Aspekte	14
6.1.1 Auswahl der LB-PBF-M	14
6.1.2 Entwurfs- und Prüfzyklen	15
6.2 Werkstoff- und Gefügecharakteristika	15
6.3 Stützstrukturen	15
6.4 Prozessplanung bei LB-PBF-M: Orientierung, Position und Anordnung des Aufbaus	18
6.4.1 Allgemeines	18
6.4.2 Pulverbeschichtung	18
6.4.3 Stützstrukturen	19
6.4.4 Curl-Effekt	20
6.5 Anisotropie der Werkstoffeigenschaften	21
6.6 Oberflächen	21
6.7 Folgeprozesse zur Nachbearbeitung	21
6.7.1 Allgemeines	21
6.7.2 Veredelung von Bauteiloberflächen	21
6.7.3 Entfernung von Pulverresten	21
6.7.4 Entfernung von Stützkonstruktionen	22
6.7.5 Einstellung von geometrischen Genauigkeiten	22
6.7.6 Wärmebehandlung	22
6.8 Konstruktive Aspekte	23
6.8.1 Allgemeines	23

6.8.2	Hohlräume	23
6.8.3	Spalte.....	23
6.8.4	Wanddicken.....	23
6.8.5	Bohrungen und Kanäle.....	23
6.9	Anwendungsbeispiele.....	24
6.9.1	Allgemeines	24
6.9.2	Integralbauweise (bereitgestellt von CETIM).....	24
6.9.3	Entwurf eines Getrieberads (bereitgestellt durch Fraunhofer IGCV).....	26
6.9.4	Unmögliche Kreuzung (bereitgestellt durch TNO)	27
Anhang A (informativ) xxxWerkstoffe für LB-PBF-M.....		29
Literaturhinweise.....		30

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO/ASTM 52911-1:2017) 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 52911-1:2017 wurde von CEN als prEN ISO/ASTM 52911-1:2017 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 52911-1 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 261, *Additive manufacturing*, in Zusammenarbeit mit ASTM F42 erarbeitet, auf Basis eines Partnerschaftsvertrags zwischen ISO und ASTM International, 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 Polymeren.

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 52911-1 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 Metallen (LB-PBF-M) beschreibt ein additives Fertigungsverfahren (AM) und bietet eine zusätzliche Fertigungsmöglichkeit neben etablierten Verfahren. LB-PBF-M 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-M und AM im Allgemeinen fehlt den Konstrukteuren und Fertigungsplanern dieser Erfahrungsschatz bislang noch weitgehend. Dabei bieten diese LB-PBF-M-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.

Die PBF-Normen werden als eine Reihe von Leitfäden für verschiedene PBF-Techniken angelegt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand wird die Normenreihe die laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (LB-PBF-M), die laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (LB-PBF-P) und die elektronenstrahlbasierte Pulverbettfusion von Metallen (EB-PBF-M) umfassen. Jede Norm in dieser Normenreihe wird gemeinsame Abschnitte 1 bis 5 aufweisen, die allgemeine Informationen zu Normen, Terminologie und das PBF-Verfahren enthalten. Alle darauffolgenden Abschnitte werden einen spezifischen Schwerpunkt auf eine der vorstehend aufgeführten Techniken legen.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm bezweckt, Konstrukteuren und Fertigungsplanern eine Arbeitsgrundlage zu geben, die ihnen die sachkundige Verwendung der laserbasierten Pulverbettfusion von Metallen ermöglicht. Diese Norm beschreibt die Merkmale der laserbasierten Pulverbettfusion von Metallen 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 Metallen 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 werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

VDI 3405 Blatt 3:2015, *Additive Fertigungsverfahren — Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*

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 Guide for Design for Additive Manufacturing*

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

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

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

Des Weiteren wird darum gebeten, zu überprüfen, ob neue Normen zu Norm-Prüfartefakten durch die ISO/TC 261/ASTM F42 Joint Working Group 52 erarbeitet wurden.

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

bezeichnet Aspekte des durch thermischen Einfluss hervorgerufenen Verzugs, der ein Maßverzug durch Abkühlen und Erstarren des gedruckten Bauteils nach dem Aufbau ist

3.2

Downskin-Fläche Überhangfläche

D

(Teil-)Fläche, deren Normalenvektor $\vec{n}$ 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

u

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

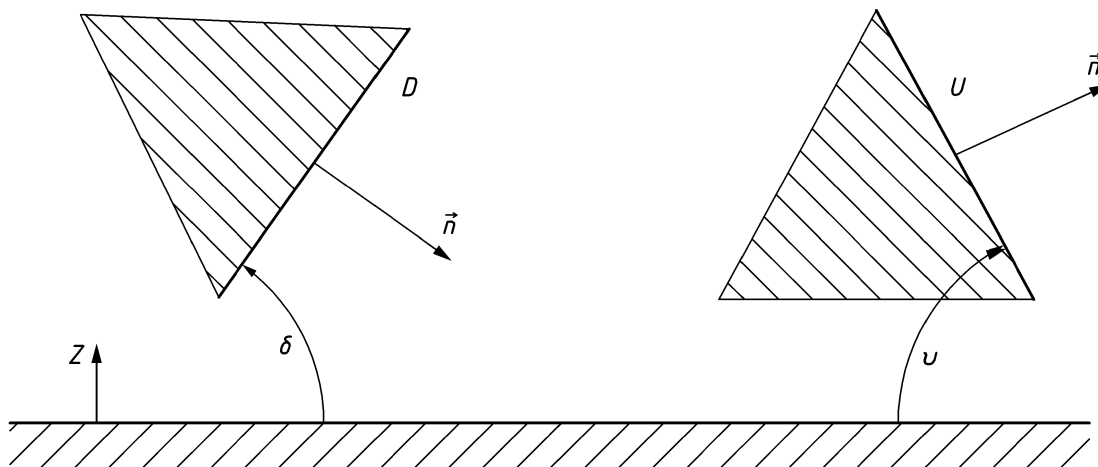


Bild 1 — Upskin- (rechts) und Downskin-Flächen (links) U und D , Upskin- und Downskin-Winkel u und δ , Normalenvektor $\vec{n}$

[QUELLE: 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	mm ²
I	Insel	mm ²
$\vec{n}$	Normalenvektor	—
Ra	Mittenrauwert	μm
Rz	gemittelte Rautiefe	μm
U	Upskin-Fläche	mm ²
δ	Downskin-Winkel	°
ν	Upskin-Winkel	°

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-Tessellationssprache

5 pulverbettbasierte Schmelzverfahren – Allgemeine Bemerkungen

5.1 Allgemeines

Die spezifischen Eigenschaften der jeweilig eingesetzten Fertigungsverfahren sind zu berücksichtigen, 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. Hinsichtlich der Metallverarbeitung kann zwischen z. B. laserbasierter (heutzutage auf Metalle und Polymere angewendet) und elektronenstrahlbasierter (heutzutage ausschließlich auf Metalle angewendet) Pulverbettfusion unterschieden werden.

Bei der PBF von Polymeren werden in nahezu jedem Fall Laser geringer Leistung zum Sintern von Polymerpulvern verwendet. Wie die PBF von Polymerpulvern umfasst auch die PBF von Metallen verschiedene Verarbeitungstechniken. Anders als Polymere, erfordert die PBF von Metallen, aufgrund der Materialdichte und der thermischen Eigenschaften, häufig die Verwendung zusätzlicher Stützkonstruktionen (6.4.3). Bei PBF-Verfahren von Metallen dürfen Laser geringer Leistung zum Verbinden von Pulverteilchen verwendet werden, indem nur die Oberfläche der Pulverteilchen geschmolzen wird (Sintern) oder Energiestrahlen mit hoher Leistung (ungefähr 200 W bis 1 000 W) um die Pulverteilchen vollständig zu schmelzen und zu verschmelzen (Schmelzen). Sintern wird vom Verschmelzen unterschieden, je nachdem, ob das Metall teilweise geschmolzen (Sintern) oder vollständig verschmolzen wird. Maschinen für die laserbasierte PBF sind zumeist zu Beidem in der Lage, in Abhängigkeit der Einwirkzeiten und Temperaturen. Sintern erfordert häufig sekundäre Prozesse (wie Infiltration), während Schmelzen die Erzeugung nahezu vollständig dichter Bauteile unterstützt.

Elektronenstrahlbasiertes Schmelzen und laserbasiertes Schmelzen weisen ähnliche Fähigkeiten auf, obwohl die Strahlenergie des Elektronenstrahls von höherer Intensität ist und das Verfahren bei höheren Temperaturen abläuft, als bei dem laserbasierten Gegenstück, wodurch üblicherweise schnellere Baugeschwindigkeiten bei niedrigeren Auflösungen unterstützt werden. Im Allgemeinen setzen Elektronenstrahl-Verfahren Bauteile geringeren Wärmespannungen aus (weil der Pulverwerkstoff vor der Verarbeitung vorgeheizt wird) und weisen höhere Baugeschwindigkeiten auf, aber die Abwägung erfolgt häufig im Hinblick auf die im Allgemeinen größeren Mindestgrößen von Elementen und die größere Oberflächen-Rautiefe als beim Laserschmelzen.

5.1.1 Bauteilgröße

Die Bauteilgröße wird nicht nur durch die Arbeitsfläche/das Arbeitsvolumen der PBF-Maschine begrenzt. Auch die Bildung von Rissen und Verformungen aufgrund von Eigenspannungen könnte die maximale Bauteilgröße begrenzen. Ein weiterer wichtiger praktischer Faktor, der die maximale Bauteilgröße begrenzen könnte, sind die Fertigungskosten, die in einem direkten Verhältnis zu Größe und Volumen des Bauteils stehen. Darüber hinaus können die Fertigungskosten 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.

5.2 Verfahrenstypische Vorteile der PBF

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

- Bauteile lassen sich endkonturnah fertigen (d. h. nah an der endgültigen Form und Größe).
- 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;
 - topologisch optimierte Strukturen, um die Masse zu reduzieren und mechanische Eigenschaften zu optimieren;
 - Füllstrukturen, z. B. Wabenstruktur.
- Der Grad der Bauteilkomplexität ist weitgehend unabhängig von den Fertigungskosten.
- Montage- und Fügevorgänge können durch Bauteil-Konsolidierung reduziert werden, wodurch möglicherweise eine einteilige Gestaltung erreicht wird.
- Die Gesamteigenschaften des Bauteils können lokal durch Einstellung der Prozessparameter gezielt konfiguriert werden.
- Verkürzung der Hauptzeit bis zur Bauteilfertigung.

5.3 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 möglicherweise Nachbearbeitung erforderlich.
- Die Abweichungen der Maßhaltigkeit, der Form- und der Lagegenauigkeit von Bauteilen sind zu beachten. Daher muss gegebenenfalls ein Aufmaß zur Nachbearbeitung vorgesehen werden. Erforderliche geometrische Genauigkeiten können durch eine gezielte Nachbearbeitung eingestellt werden.
- Bei der Prozessplanung sind anisotrope Eigenschaften zu berücksichtigen, 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 Schmieden und Gießen bekannt sind. Werkstoffeigenschaften können aufgrund verfahrenstechnischer Einstellungen und Steuerung erheblich beeinflusst werden.
- Es wäre anzumerken, dass die übermäßige Nutzung und/oder die übermäßige Abhängigkeit von Stützkonstruktionen sowohl zu hoher Materialverschwendung als auch zu einem erhöhten Risiko von Fehlern beim Aufbau führen.

5.4 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 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 Bauteilorientierung sollte so gewählt werden, dass die Anzahl der durchzuführenden Baudurchläufe reduziert wird. Es könnten auch Strategien zur Verschachtelung angewendet werden, um den verfügbaren Bauraum zu maximieren.

- Das nach einem Aufbau im System verbleibende Pulver könnte wiederverwendet werden. Das 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 und die Zusammensetzung der Legierung auswirken kann, was im Gegenzug die endgültigen Bauteileigenschaften beeinflussen wird. Wie oft ein Pulver rezykliert werden kann, ist vom Maschinenhersteller und dem Werkstoff abhängig.
- Viele mangelhaft gestaltete Bauteile (insbesondere die für konventionelle Prozesse mit geringer oder keiner Anpassung ausgelegt) erfordern eine *spezifische* Orientierung, um entweder die Verwendung von Stützen zu minimieren oder die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Aufbaus zu erhöhen. Allerdings sollten Bauteile, die für die additive Fertigung entworfen wurden, so ausgelegt sein, dass die Bauorientierung offensichtlich und/oder festgelegt ist.

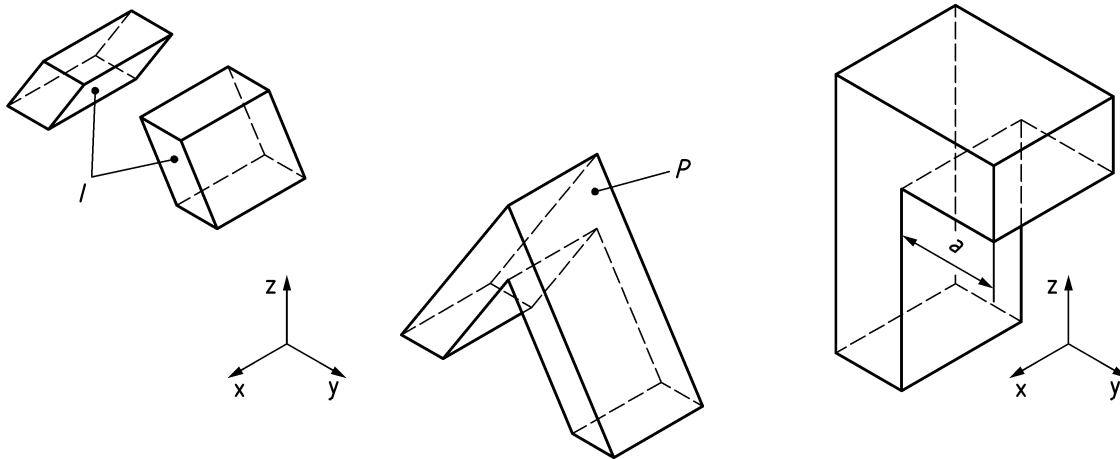
5.5 Merkmalbedingte Randbedingungen (Insel, Überhang, Treppenstufeneffekt)

5.5.1 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 können die folgenden Fälle als kritisch (das Niveau der Kritikalität ist abhängig von der zu betrachtenden PBF-Technik) identifiziert werden:

5.5.2 Inseln

Inseln (*I*) sind Besonderheiten, die erst im späteren Verlauf des Bauprozesses zu einem Bauteil (*P*) 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]

5.5.3 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.

5.5.4 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).

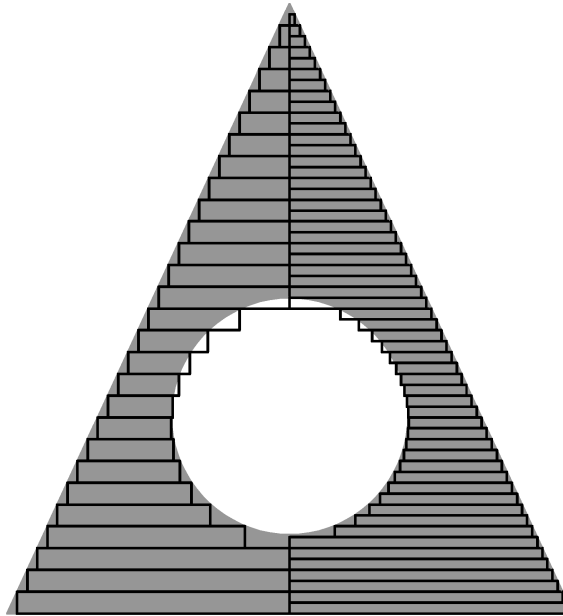


Bild 3 — Auswirkung des Treppenstufeneffekts bei unterschiedlichen Schichtdicken

[QUELLE: VDI 3405 Blatt 3:2015]

5.6 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 Nachbearbeitung erforderlich sein. Die Nachbearbeitung kann subtraktive Fertigung, Oberflächenbearbeitung, thermische Prozesse oder andere Bearbeitungsschritte nach ISO/ASTM DIS 52910 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.

5.7 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 (Stereolithographie-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 Dreieckskanten auf der gefertigten Teileoberfläche sichtbar (d.h. sie erscheint facettiert). Eine zu hoch aufgelöste Tesselation beansprucht jedoch viel 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 wurde, 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 Metallen (LB-PBF-M)

Die grundlegenden Konstruktionsleitlinien für die laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen werden nachstehend beschrieben.

6.1 Allgemeine konstruktive Aspekte

6.1.1 Auswahl der LB-PBF-M

LB-PBF-M weist verfahrenstypische Vor- und Nachteile auf. Im Allgemeinen bietet die Technik Möglichkeiten zu komplexer Konstruktion mit integrierten Funktionen in einem Bauteil, zu Werkstoffen mit Binnenstrukturen oder -kanälen, Merkmalen mit Unterschnitten oder Strukturen, die nicht durch trennende oder urformende Metallbearbeitungsverfahren verwirklicht werden können. Die Flexibilität von LB-PBF-M bietet Möglichkeiten für die Kleinserienfertigung von Einzelteilen mit Eigenschaften, die nicht mit anderen Verfahren umgesetzt werden können.

Die Vorteile in der Gebrauchsphase könnten ein wichtiger Beweggrund zur Wahl von LB-PBF-M sein, auch wenn LB-PBF-M in der Fertigungsphase Nachteile bergen könnte.

Wichtige Einschränkungen können die Verfügbarkeit der erforderlichen Werkstoffe sein, die begrenzte Größe des Bauteils, die Annahme des Verfahrens für kritische Anwendungen, die Fertigungskosten und die möglicherweise erforderlichen Nachbearbeitungen.

Es sind einige weitere Technologien zu nennen, die in einem ähnlichen Anwendungsfeld wie LB-PBF-M eingesetzt werden könnten: Elektronenstrahlbasierte Pulverbettfusion von Metallen, gerichtete Energieeinbringung bei Metallen oder Gießen mit einer additiv gefertigten, verlorenen Gussform.

6.1.2 Entwurfs- und Prüfzyklen

Die Bauteiloptimierung kann durch die gegenwärtigen Grenzen des LB-PBF-M-Verfahrens eingeschränkt sein. Das kann je nach Werkstoff und je nach Dienstanbieter unterschiedlich sein. Oft bedeutet das, dass praktische Prüfung von Bauteil-Merkmalen Bestandteil des Entwurfszyklus sein könnten.

6.2 Werkstoff- und Gefügecharakteristika

Die für die laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen verwendeten Werkstoffe stammen zum Großteil aus der Gruppe der Metalle und metallischen Legierungen. Die bevorzugten Produktionsverfahren für Metallpulver umfassen üblicherweise Plasma- oder Gasverdüsung in einer Argon- oder Stickstoffatmosphäre. Weil Metallpulver je nach Lieferanten erhebliche Unterschiede aufweisen können, sollte die Auswahl sorgfältig getroffen werden. Die Pulvergrößenverteilung, chemische Zusammensetzung und Morphologie sind nur einige Beispiele von Rohnpulvereigenschaften, die bei der Auswahl berücksichtigt werden sollten.

Die erfolgreiche Verarbeitung der einzelnen Materialien im Prozess hängt von verschiedenen Einflussparametern ab; hierzu zählen die Schweißbarkeit, die Schmelztemperatur, die Wärmeleitfähigkeit, die Schmelzviskosität und der Benetzungswinkel (korreliert mit der Oberflächenspannung der Schmelze) [1] (Rehme, O.). Sämtliche dieser Faktoren werden die Eigenschaften des zu fertigenden Bauteils beeinflussen. Deshalb erfordert die Gestaltung für LB-PBF, dass auch die Prozessumgebung berücksichtigt wird.

Eine Auswahl der heute für LB-PBF-M-Verfahren verfügbaren Werkstoffe lassen sich in die in Tabelle 5 (Anhang) gezeigten Gruppen unterteilen. Außer diesem Überblick gibt es einige andere mögliche Werkstoffe, wie Kupferlegierungen, Gold und Silber, Wolfram und Tantal. Im Zuge der Weiterentwicklung der AM-Technologie wird davon ausgegangen, dass in naher Zukunft weitere Werkstoffe zur Verfügung stehen werden. Auf Grundlage praktischer Erfahrung kann davon ausgegangen werden, dass wenn bereits Metallpulver für Verfahren wie Metallpulverspritzguss und Auftragschweißen zur Verfügung stehen, auch eine Anwendung in der LB-PBF-M möglich sein könnte.

Eine relative Dichte des Bauteils von annähernd 100 % ist möglich [2] (Meiners, W.). In Bild 4a) und b) wird ein Gefüge nach der laserbasierten Pulverbettfusion von Metallen dargestellt: a) zeigt einen Längsschnitt (in der z-y-Ebene) eines Bauteils aus dem Werkstoff 1.2709. Die überlappenden Schweißbahnen sind deutlich sichtbar. b) zeigt die überlappenden Schweißbahnen einer einzelnen Schicht (x-y-Ebene). Das durch ein LB-PBF-M-Verfahren erzeugte Gefüge unterscheidet sich von dem in Knetwerkstoffen, und ist in großem Maße abhängig von der Prozessumgebung, einschließlich der vorstehend aufgeführten Faktoren. Die mechanischen Eigenschaften des Bauteils werden direkt mit dem gebildeten Gefüge korrelieren.

Nachträgliche Wärmebehandlungen von Bauteilen, die durch Metall-AM gefertigt wurden, werden üblicherweise für die Entlastung von Eigenspannungen und die Abstimmung von Werkstoffeigenschaften verwendet.

6.3 Stützstrukturen

Das Verfahren der laserbasierten Pulverbettfusion von Metallen erfordert eine sichere Anbindung des Bauteils an die Bauplatte. Die Anbindungen können entweder direkt erfolgen (direkter Aufbau auf Bauplattform) oder durch Stützstrukturen. Stützstrukturen in LB-PBF-M-Verfahren dienen mehreren Funktionen, einschließlich:

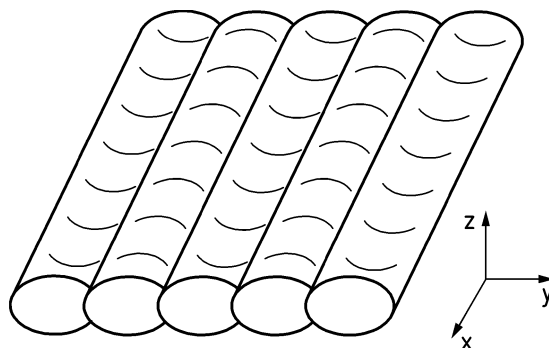
- Wärmeabfuhr;
- Fixierung des Bauteils auf der Bauplattform;
- Kompensation von eigenspannungsinduziertem Verzug;
- als eine vorläufige Stützkonstruktion für ein in Fertigung befindliches Stück.

Obwohl Stützstrukturen in vielen AM-Verfahren üblich sind, wird ein spezifischer Leitfaden zu deren Anwendung verfahrensabhängig sein. Tabelle 2 enthält einen Leitfaden zur Verwendung von Stützstrukturen in LB-PBF-M-Verfahren. Die in Tabelle 2 verwendeten Werte sind allgemeine Leitlinien und sowohl Prozessparameter als auch Werkstoffspezifikationen werden die entscheidenden Werte beeinflussen.

Weil Stützstrukturen bei der Gestaltung für die AM so wichtig sind, wird empfohlen, dass die Gestalter frühzeitig über die Bauorientierung des Bauteils in der jeweilige LB-PBF-M-Maschine entscheiden sollten und sich der zentralen Bestandteile der Prozesskette bewusst sein sollten, die für die Fertigung erforderlich sind. Auf diese Weise kann die Auswirkung der Gestaltung von Stützstrukturen berücksichtigt werden, wenn verschiedene Gestaltungsentscheidungen zur Auswahl stehen. Beispielsweise könnte eine Gestaltungs-konfiguration zu einer erhöhten Bauzeit führen, aber den Nachbearbeitungsaufwand bei der Entfernung der Stützstrukturen erheblich reduzieren.



a) Längsschnitt eines Bauteils aus dem Werkstoff 1.2709



b) überlappende Schweißbahnen einer Schicht

Bild 4 — Gefüge nach der laserbasierten Pulverbettfusion von Metallen

[QUELLE: VDI 3405 Blatt 3:2015]