

2. Begriffsbestimmung und Verfahrensbeschreibungen

Die Untersuchung der Eigenschaften von laseradditiv gefertigten, luftdurchlässigen Mesostrukturen für den Einsatz in industriell genutzten Bauteilen erfordert zunächst eine Beschreibung des verwendeten Herstellungsverfahrens, da die Verfahrensmerkmale die fertigungstechnischen Möglichkeiten und Randbedingungen für die Struktur bestimmen. Die anschließende Systematik von luftdurchlässigen Strukturen zeigt Anforderungen und Lösungsvarianten auf. Da die Einsatzbedingungen in der Industrie vielfältig sind, wird für die Einordnung der ermittelten Eigenschaften in einen industriellen Kontext eine Referenzanwendung benötigt. Mit Kunststoffspritzgießwerkzeugen als industrieller Referenzanwendung wird ein technisches System mit einem breiten Anforderungsspektrum für die Entwicklung der Struktur gewählt. Der Aufbau und die Funktion von Spritzgießwerkzeugen werden zum Abschluss dieses Kapitels vorgestellt.

2.1. Laseradditive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren sind Fertigungsverfahren, welche ausgehend von einem digitalen Modell ein dreidimensionales Bauteil werkzeuglos durch das Hinzufügen von Material herstellen. Diese Definition ist aus der englischsprachigen ISO/ASTM-Norm ISO/ASTM52921 übernommen, die den Begriff *Additive Manufacturing* (AM) verwendet [1, 2]. Der deutsche Sprachraum ist dabei, sich mit der *additiven Fertigung* an diesen Begriff anzupassen [3]. Die VDI-Richtlinie 3404 verwendet in ihrer aktuell gültigen Ausgabe von 2009 noch den Begriff der generativen Fertigungsverfahren [4] und wechselt im ausgelegten Entwurf für eine überarbeitete Richtlinie zum Begriff additive Fertigung [5]. Die Gruppe der additiven Fertigungsverfahren umfasst eine Vielzahl von Verfahren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien und verarbeiteten Werkstoffen und deckt somit ein breites Spektrum an Anwendungen ab [2, 3, 5]. Die hier betrachtete laseradditive Fertigung ist ein Verfahren zur additiven Fertigung von komplexen, dreidimensionalen Bauteilen aus Metall, dabei erfolgt die Herstellung der Bauteile schichtweise durch Aufschmelzen von Metallpulver mit einem Laser. Der Begriff *laseradditive Fertigung* wird als herstellerneutrale Bezeichnung gewählt, da er die beiden wesentlichen Eigenschaften des Verfahrens betont: die additive Fertigung und die Energieeinbringung durch den Laser. Alternative, herstellergebundene Verfahrensbezeichnungen, die in der VDI-Richtlinie 3404 genannt werden, sind Selective Laser Melting (SLM), Laser-Cusing und Direktes-Metall-Laser-Sintern (DMLS) [4, 5].

2.1.1. Prozessbeschreibung

Die große geometrische Gestaltungsfreiheit der laseradditiven Fertigung ergibt sich aus dem schichtweisen Aufbau der Bauteile. Das 3D-CAD-Modell des Bauteils wird zunächst in ein STL-Modell umgewandelt¹. Das STL-Dateiformat approximiert die Bauteilgeometrie durch Dreiecke an der Oberfläche. Zu jeder Dreiecksfacette gehört ein Normalenvektor, der festlegt, welche Seite des Dreiecks aus dem Bauteil heraus zeigt. Dieses Dreiecksmodell wird in einzelne Schichten mit einer definierten Schichtstärke aufgeteilt. Anhand dieser Schichtinformationen wird der Fertigungszyklus, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, gesteuert. [3, 6]

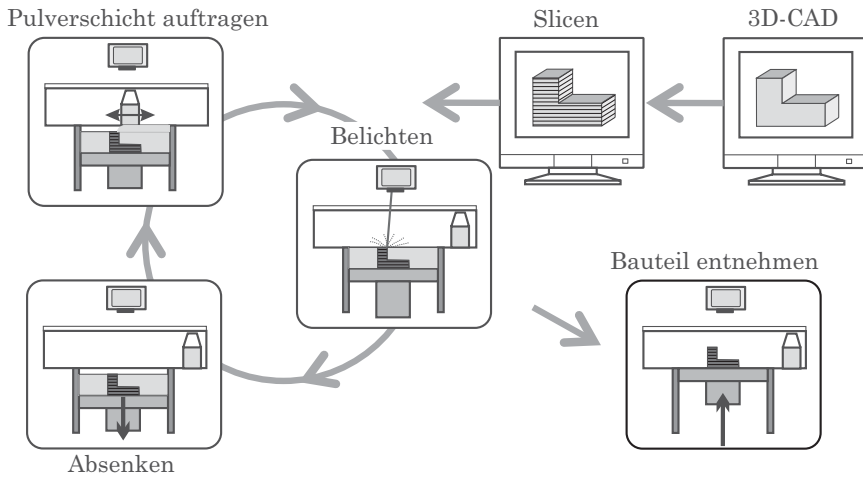


Abbildung 2.1.: Prozesszyklus der laseradditiven Fertigung [8]

Ausgangsmaterial für den laseradditiven Fertigungsprozess ist ein Metallpulver mit sphärischen Körnern. Es handelt sich heute meist um ein einkomponentiges Pulver, bei dem alle Partikel in der angestrebten Legierung vorliegen. Für die additive Herstellung von Bauteilen für Spritzgießwerkzeuge wird häufig der Werkzeugstahl X3NiCrMoTi mit der Werkstoffnummer 1.2709 verwendet. Um den Anforderungen der Referenzanwendung zu entsprechen, wird dieser Werkstoff auch für die luftdurchlässigen Mesostrukturen verwendet. Das Pulver für die Fertigung der luftdurchlässigen Strukturen aus diesem Werkstoff hat eine Korngröße von $25\mu\text{m}$ bis $62\mu\text{m}$ mit einem mittleren Durchmesser $d_{10} = 43,7\mu\text{m}$ [9]. Neben dem hier verwendeten Werkzeugstahl ist eine zunehmende Anzahl an metallischen Werkstoffen kommerziell als Pulver erhältlich. Verbreitete Materialien sind Titan-, Aluminium- und Stahl-Legierungen [2]. Das Pulver befindet sich zu Beginn des Prozesses in einem Vorratsbehälter. Eine Beschichtungseinrichtung trägt eine $20\mu\text{m}$ bis $60\mu\text{m}$ dünne Pulverschicht auf eine Substratplatte auf. Über eine Ablenkeinheit wird ein Laserstrahl entsprechend der aktuellen Bauteilschicht über das Pulverbett gelenkt, dabei schmilzt das Pulver des hier betrachteten Werkstoffs

¹Die Abkürzung STL steht für Standard Transformation Language [6], Standard Triangle Language [3], Surface Tessellation Language [4] oder geht auf die erstmalige Verwendung in der Stereolithografie [7] zurück.

vollständig auf und verbindet sich mit der darunter liegenden Schicht. Technologisch entspricht dieser Vorgang einem Wärmeleitungsschweißen [10]. Nach Abschluss dieser Belichtung senkt sich die Substratplatte um die Dicke der Schichten ab und eine neue Pulverschicht wird vom Beschichter aufgetragen. Dieser Zyklus in Abbildung 2.1 aus Beschichten, Belichten und Absenken wiederholt sich, bis das Bauteil vollständig aufgebaut ist. [3, 6, 8]

Die Prozesskette der Datenvorbereitung von dem digitalen Modell des Bauteils bis zur Festlegung der Prozessparameter und des Pfads des Lasers über das Pulverbett erfordert Einstellungen und erzeugt Daten, die auf drei Informationsebenen betrachtet werden können, welche in Abbildung 2.2 dargestellt sind. Auf der obersten Ebene steht die dreidimensionale Beschreibung des Bauteils in einem 3D-CAD-Modell. Dieses Modell enthält die Geometrie des Bauteils und kann durch weitere bauteilspezifische Informationen, wie den geforderten Toleranzen und Oberflächenrauheiten ergänzt werden. Die Informationen auf dieser Ebene sind zum Großteil bauteilspezifisch, da die Beschreibung unabhängig vom späteren Herstellungsprozess ist. Dieser findet sich lediglich im Sinne einer fertigungs- und funktionsgerechten Konstruktion in der beschriebenen Form wieder [11, 12]. Die Schichtinformationen stellen die zweite Informationsebene dar. Hierfür wird das 3D-CAD-Modell in der Datenvorbereitung für die additive Fertigung in einzelne Schichten zerlegt (*engl.* to slice). In diesem Prozess werden die Schichtdicke und der Weg des Lasers über die Pulverschichten festgelegt. Die zweidimensionale Beschreibung der Bauteilschichten ist sowohl bauteilspezifisch als auch prozessspezifisch. Die unterste Ebene der Information enthält die Bearbeitungsparameter und ist zurzeit weitgehend unabhängig vom Bauteil. Allerdings haben Gausemeier et al. 2013 für die Entwicklung der laseradditiven Fertigung bis 2020 unter anderem eine Steigerung der Fertigungsgeschwindigkeit und eine Erhöhung der Prozessstabilität prognostiziert [13]. Wird dies durch eine örtliche Anpassung der Bearbeitungsparameter realisiert, so wirkt sich zukünftig auch die Bauteilgeometrie auf die Parameter aus, die bestimmen, wie der Laser auf dem vorgegebenen Weg das Material aufschmilzt.

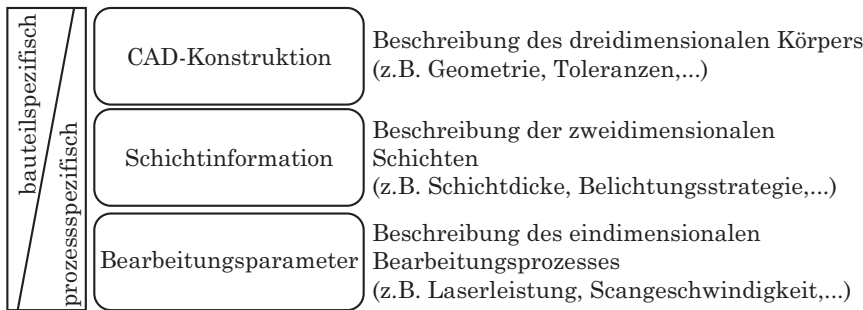


Abbildung 2.2.: Informationsebenen der additiven Fertigung von Bauteilen

Die weitere Beschreibung konzentriert sich auf die Ebenen der Schichtinformationen und der Bearbeitungsparameter, da eine möglichst flexible und bauteilunabhängige Lösung angestrebt wird. Die Proben und Bauteile für die Experimente werden mit einer M2Cusing des Anlagenherstellers Concept Laser gefertigt, daher wird verstärkt auf die Eigenschaften und Prozesse dieses Anlagentyps eingegangen.

2.1.2. Schichtinformationen

Die Verarbeitung einer einzelnen Schicht erfolgt unabhängig von dem darunter liegenden bereits gefertigten Körper oder den noch folgenden Schichten. Die dreidimensionale Fertigungsaufgabe eines komplexen Bauteils ist in einzelne, zweidimensionale Fertigungsschritte mit einfachen Konturen zerlegt worden. Der Laser schmilzt die Fläche nicht auf einmal auf, sondern fährt sie in einzelnen Bahnen ab. Abbildung 2.3 zeigt drei Belichtungsstrategien zum Füllen einer Bauteilschicht mit einzelnen Schmelzspuren. Die durchgehende Belichtung ist auf Grund der sehr unterschiedlichen Vektorlängen innerhalb einer Schicht nicht üblich, da lange Scanvektoren zu hohen Eigenspannungen führen. Die Unterteilung der Gesamtfläche in Streifen oder quadratische Teilflächen reduziert diese Spannungen. [14, 15, 16, 17, 18]

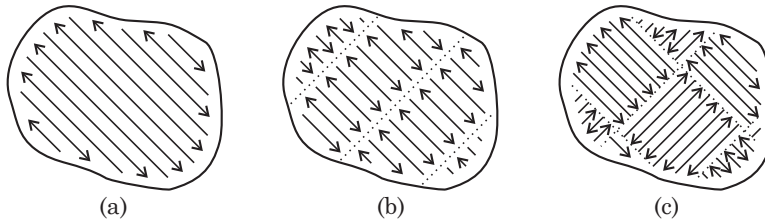


Abbildung 2.3.: Flächenbelichtung einer Bauteilschicht mit einer durchgehenden Belichtung (a), mit Streifen (b) und einem Schachbrettmuster (c)

Damit das produzierte Bauteil trotz des Aufbaus aus einzelnen Schmelzspuren isotrope Eigenschaften besitzt, werden Ausrichtung und Position des Belichtungsmusters zwischen den Schichten variiert. Die Abbildung 2.4 zeigt dies am Beispiel des Schachbrettmusters aus Abbildung 2.3(c). Die Scanrichtung der übereinanderliegenden Schachbrettfelder wird um 90° gedreht und das Muster in der Schichtebene in x - und y -Richtung verschoben. Die Drehung der Felder gleicht die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und thermischen Eigenspannungen entlang und quer zu der Schmelzspur aus und sorgt so für isotrope Materialeigenschaften des Bauteils. Die Anfangs- und Endpunkte der Schmelzspuren können Entstehungsorte für Poren sein. Die Verschiebung ermöglicht es, dass in der nächsten Schicht Fehlstellen mit durchgehenden Schmelzspuren geschlossen werden. Mit dieser Strategie wird eine relative Dichte von über 99 % erreicht [9, 15, 16, 17, 19]. Dies wurde unter anderem von Yasa et al. [9] und Kempen et al. [19] für den in dieser Arbeit verwendeten Werkzeugstahl X3NiCrMoTi (1.2709) gezeigt.

Die einzelnen Schmelzspuren in einer Schicht überlappen sich sowohl mit der parallelen Nachbarspur als auch an den Spurenden mit den Spuren im benachbarten Schachbrettfeld beziehungsweise Streifen. Untersuchungen von Yadroitsev et al. mit einzelnen Spuren haben gezeigt, dass durch den Laserstrahl ein breiter Streifen Pulver aufgeschmolzen wird. Wie die Abbildung 2.5(a) zeigt, zieht die Oberflächenspannung die Schmelze einer einzelnen Spur zusammen und sie nimmt eine zylindrische Form an [20]. Durch dieses Zusammenziehen ist die erstarrte Schmelzspur höher als die Schichtdicke des Pulverbetts. Diese Spurüberhöhung ist immer dann zu beobachten, wenn die Schmelze keine Möglichkeit hat, sich an eine Nachbarspur anzulegen [21]. Die weiteren

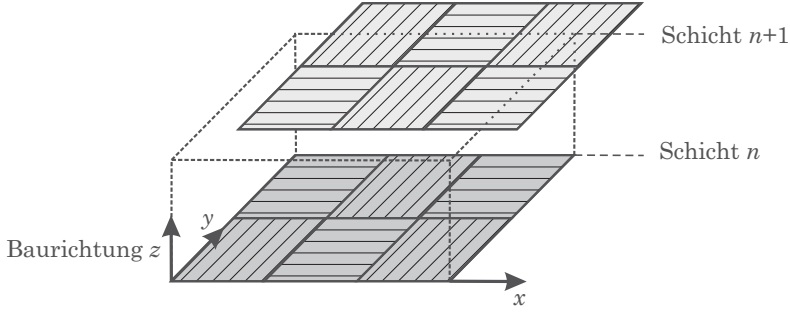


Abbildung 2.4.: Variation des Schachbrettmusters in Aufbaurichtung

Spuren in Abbildung 2.5(b) und (c) bieten der Schmelze eine zusätzliche, feste Oberfläche, an die sich die Schmelze anlegen kann. Hierdurch stabilisiert sich die Schmelze und die Spurüberhöhung fällt geringer aus. Für das Verhältnis zwischen dem Abstand der Spuren h_s und der Schmelzspurbreite b_{Spur} hat sich ein empirischer Zusammenhang von

$$h_s = 0,7 \cdot b_{\text{Spur}} \quad (2.1)$$

als besonders vorteilhaft für die gegenseitige Stabilisierung der Schmelzspuren herausgestellt² [14].

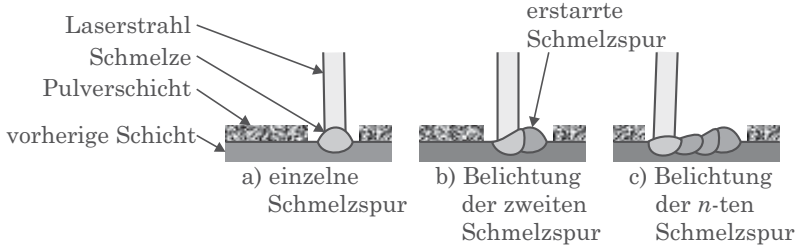


Abbildung 2.5.: Anlegen von Schmelze an bereits erstarrte Schmelzspuren [22]

2.1.3. Bearbeitungsparameter

Bei der Belichtung bewegt sich der Fokus des Laserstrahls mit der Scangeschwindigkeit v_s über das Pulverbett, schmilzt das Pulver der aktuellen Schicht mit einer Schichtdicke s auf und verschweißt es mit dem darunterliegenden Material. Die Energie, die der Strahl mit der Laserleistung P_L hierbei in die Schmelze einbringt, bestimmt das Verhalten des Schmelzpool. Der Energieeintrag in das Material kann entweder als Streckenenergie E_S [23]

$$E_S = \frac{P_L}{v_s \cdot s} \quad (2.2)$$

²Wenn nicht anders angegeben, werden die im Formelverzeichnis angegebenen Einheiten verwendet.

2. Begriffsbestimmung und Verfahrensbeschreibungen

oder als Volumenenergie E_V [24]

$$E_V = \frac{P_L}{v_s \cdot s \cdot h_s} \quad (2.3)$$

betrachtet werden. Viele Autoren haben einen empirischen Zusammenhang zwischen der eingebrachten Energie und der Dichte des produzierten Materials beobachtet, unter anderem [9, 14, 15]. Eine quantitative Beschreibung des Zusammenhangs zwischen eingebrachter Energie und erreichter Bauteildichte steht noch aus [25].

Bei zu geringer Energie wird das Pulver nur angeschmolzen und zwischen den Partikelresten verbleiben Hohlräume. Eine zu hohe Energie führt zu einer erhöhten Temperatur der Schmelze, da die Wärme nicht ausreichend durch das umgebende Material abgeleitet werden kann. Als Folge der heißeren Schmelze bilden sich vermehrt Spritzer und die Viskosität der Schmelze sinkt. Durch die dünnflüssigere Schmelze gewinnt wiederum deren Hydrodynamik an Bedeutung, da vor allem die durch unterschiedlichen Grenzflächenspannungen in der Schmelze angetriebene Marangoni-Konvektion zunimmt und mit ihren hohen Strömungsgeschwindigkeiten die Schmelze destabilisiert [26].

Zusätzlich verändert eine höhere Temperatur die Geometrie des Schmelzpool. Da das Material länger flüssig bleibt, wird der Schmelzpool länger. Der längere Schmelzpool erreicht die Grenze der Plateau-Rayleigh-Instabilität [27, 28, 29] und zerfällt in zwei oder mehr Tropfen. Dieser Effekt wird bei der laseradditiven Fertigung als *balling* bezeichnet. Für einen kreisrunden Flüssigkeitszylinder ohne Kontakt zu benachbarten Strukturen und dem Durchmesser d gilt

$$\frac{\pi d}{l} > 1 \quad (2.4)$$

als hinreichende und notwendige Stabilitätsbedingung gegen axiale harmonische Störungen des Radius. Der Schmelzpool bleibt stabil, solange die Wellenlänge der Störung l kleiner ist als der Umfang des Zylinders. [20]

Ist der Flüssigkeitszylinder, wie in Abbildung 2.6, in Kontakt mit der Substratplatte, dann gilt für einen Zylinder mit dem Kontaktwinkel Φ die Gleichung

$$\frac{\pi d}{l} > \sqrt{2} \sqrt{\frac{\Phi(1 + \cos(2\Phi)) - \sin(2\Phi)}{2\Phi(2 + \cos(2\Phi)) - 3\sin(2\Phi)}}. \quad (2.5)$$

als Stabilitätsbedingung [20].

Eine gute Benetzung der vorangegangenen Schicht und die Anbindung an die Nachbarspur wirken sich über den Kontaktwinkel Φ stabilisierend auf den Prozess der laseradditiven Fertigung aus. Mit einem stabilen Prozess werden eine hohe Bauteildichte und dadurch gute mechanische Eigenschaften erreicht.

2.1.4. Mechanische Eigenschaften

Die laseradditive Fertigung wird häufig als ein geeignetes Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing und Rapid Tooling angegeben. Diese Begriffe bezeichnen die

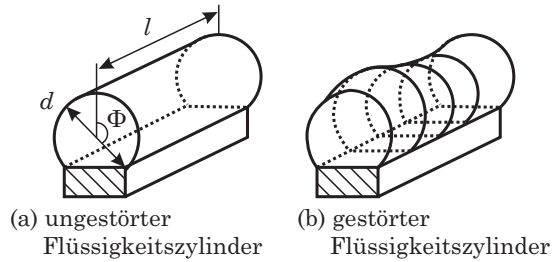


Abbildung 2.6.: Ungestörter und gestörter Flüssigkeitszylinder auf einer Substratplatte [20]

schnelle Fertigung von Endprodukten beziehungsweise Werkzeugformen und wurden gewählt, um die laseradditive Fertigung von den Rapid Prototyping Verfahren abzugrenzen [6]. Rapid Prototyping ist die schnelle Herstellung von Anschauungsobjekten für die Visualisierung von Produktideen und Konzepten im Entwicklungsprozess. Nach Burns erfüllt ein Rapid Prototyping Fertigungsverfahren folgende Kriterien [30, 31]:

- Das Ausgangsmaterial ist ein formloser Stoff.
- Der Prozess erfordert kein signifikantes Eingreifen durch den Bediener.
- Die erzeugten Teile haben eine komplexe, dreidimensionale Form.
- Das Verfahren ist werkzeuglos.
- Es werden Teile gefertigt und keine Baugruppen zusammengesetzt.

Diese Definition ist auf die laseradditive Fertigung anwendbar, aber durch die Weiterentwicklung des Verfahrens gehen die Möglichkeiten über die Erstellung von reinen Prototypen hinaus. Es werden mit konventionellen Serienwerkstoffen vergleichbare mechanische Eigenschaften erreicht [9, 32, 33, 34, 35, 36], daher ist der Einsatz der laseradditiven Fertigung zur schnellen Herstellung von Endprodukten (Rapid Manufacturing) und Werkzeugformen (Rapid Tooling) heute Stand der Technik. [2, 31, 37, 38, 39, 40]

Für die laseradditive Fertigung von Werkzeugformen wird der martensit-aushärtbare Werkzeugstahl X3NiCrMoTi (1.2709) verwendet. Dieser Werkstoff ist gut schweißbar und kann durch Ausscheidungshärten vergütet werden. Bei diesem Prozess wird durch eine Wärmebehandlung eine fein verteilte, intermetallische Phase ausgeschieden, die die Festigkeit des Materials erhöht [41, 42]. Bei der laseradditiven Fertigung wird nur ein kleiner Teil des Bauteils im Schmelzpool aufgeschmolzen und anschließend mit einem hohen Temperaturgradienten wieder abgekühlt. Diese Prozesscharakteristiken finden sich auch in dem Gefüge wieder. Zum einen ist die erstarrte Schmelzpoolgeometrie in Schliffen erkennbar, zum anderen ist die Korngröße um etwa eine Zehnerpotenz kleiner als bei konventionellem Material [43]. Durch diese Unterschiede in der Mikrostruktur unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften von konventionell hergestelltem und

2. Begriffsbestimmung und Verfahrensbeschreibungen

additiv gefertigtem Material. Die mechanischen Kennwerte von X3NiCrMoTi (1.2709) als konventionelles und laseradditiv gefertigtes Material sind in Tabelle 2.1 aufgeführt [9, 19, 44, 45].

Tabelle 2.1.: Mechanische Eigenschaften von konventionell und laseradditiv gefertigtem Werkzeugstahl X3NiCrMoTi (1.2709) [19, 44, 45, 46, 47, 48]

	Streckgrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Härte HRC
	konventionell gefertigt		
lösungsgeglüht [45, 46, 48]	900 [48]	980 - 1100 [48] 950 - 1100 [45]	32 [46]
ausgehärtet (490 °C) [48]	1800	1900 - 2100	55
	laseradditiv gefertigt		
unvergütet [19]	1214 ± 99	1290	39,6 ± 0,1
vergütet (480 °C) [19]	1998 ± 32	2217 ± 73	58 ± 0,1
vergütet (540 °C) [44]	1550	1650	48

	Elastizitäts- modul E [10 ³ N/mm ²]	Bruchdehnung A [%]	Dichte ρ [g/cm ³]
	konventionell gefertigt		
lösungsgeglüht [48]	200	10	8,10
ausgehärtet (490 °C) [48]	k.A.	9	k.A.
	laseradditiv gefertigt		
unvergütet [19]	163 ± 4,5	13,3 ± 1,9	8,042
vergütet (480 °C) [19]	189 ± 2,9	1,6 ± 0,26	k.A.
vergütet (540 °C) [44]	160	> 2-3	k.A.

Für den Einsatz in Spritzgießwerkzeugen sind zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften auch die thermischen Eigenschaften von Bedeutung. In Tabelle 2.2 werden diese für 20 °C aufgeführt [19, 48, 49, 50].

Tabelle 2.2.: Thermische Eigenschaften von konventionell und laseradditiv gefertigtem Werkzeugstahl X3NiCrMoTi (1.2709) [19, 48, 49, 50]

	konventionell	laseradditiv
Dichte ρ [g/cm ³]	8,10 [48]	8,042 [19]
Wärmeleitungskoeffizient λ [W/(m K)]	21 [48]	14,2 [49]
spez. Wärmekapazität c_p [kJ/(kg K)]	420 [48]	450 ±20 [50]
Wärmeausdehnungskoeffizient α [10 ⁻⁶ m/(m K)]	10,3 [48]	10,3 [49]

2.2. Luftdurchlässige Strukturen

Luftdurchlässige Materialien werden hier als zusammenhängende Festkörper definiert, die über eine für die Funktion erforderliche Durchlässigkeit für Luft verfügen. Ein zusammenhängender Festkörper schließt lose Schüttungen von undurchlässigen Partikeln aus, bei denen die Luft um die einzelnen Partikel herum strömt. Da Luft ein Gasgemisch ist folgt aus der Luftdurchlässigkeit, dass das Material auch für andere Gase und Gasgemische durchlässig ist [51].

Ein Beispiel für die Verwendung von luftdurchlässigen Materialien sind Filterelemente. Diese erfüllen in einer Vielzahl von technischen Anwendungen unterschiedliche Funktionen. Die Hauptfunktionen von Filtern sind in Abbildung 2.7 aufgeführt. Filter mit sichernder Funktion sind beispielsweise Flammensperren in Leitungen für brennbare Gase, welche die Ausbreitung eines Brandes in die Zuleitung verhindern. Beim Filtrieren und Trennen hält der Filter Partikel zurück, die größer als der maximale Durchmesser der Öffnungen im Filter sind. Die Verwirbelung in einem Filter kann zum Verteilen und Dispergieren von verschiedenen Gasen genutzt werden. Der Strömungswiderstand und das Volumen eines Filters reduzieren Druckstöße und beruhigen Strömungen. Ebenso kann ein Filter genutzt werden, um Schüttgut zu begasen und durch das Einblasen von Luft fließfähig zu machen. [52]

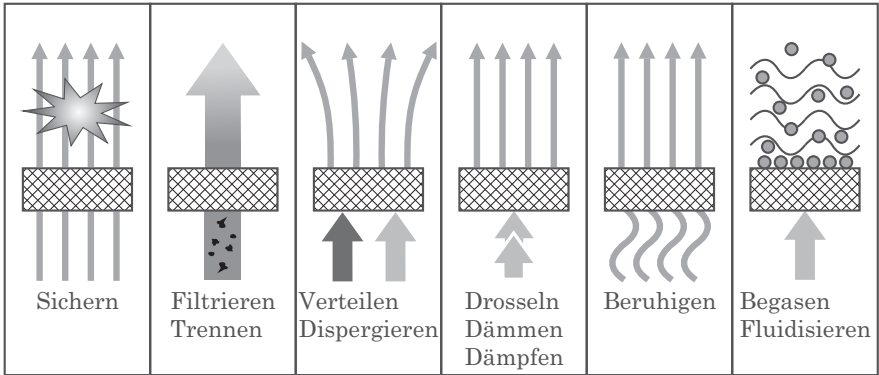


Abbildung 2.7.: Hauptfunktionen von Filterelementen [52]

Entsprechend den unterschiedlichen Hauptfunktionen sind die Anwendungsmöglichkeiten für luftdurchlässige, metallische Strukturen in einem industriellen Umfeld entsprechend vielfältig. Kapitel 8 beschreibt die Verwendung des laseradditiv gefertigten, luftdurchlässigen Materials in einem Druckluftauswerfersystem für Spritzgießwerkzeuge. In dieser Anwendung erfüllt das laseradditiv gefertigte Material zwei der Funktionen aus Abbildung 2.7. Das Material soll undurchdringlich für die Kunststoffschmelze sein, was der Hauptfunktion Trennen entspricht. Für den Auswurf der Kunststoffartikel muss die Oberfläche über dem luftdurchlässigen Material gleichmäßig mit Druckluft beaufschlagt werden, dies erfordert die Hauptfunktionen Verteilen und Begasen.

2.2.1. Klassifizierung von luftdurchlässigen Strukturen

Luftdurchlässige Materialien zeichnen sich dadurch aus, dass sie von Verbindungen durchzogen sind, die groß genug sind, um die Moleküle der Luft hindurch zu lassen. Ein Material mit einer Vielzahl von Hohlräumen im Inneren ist nicht automatisch luftdurchlässig, da die Verbindungen zwischen den Hohlräumen für die Durchlässigkeit entscheidend sind. Abbildung 2.8 zeigt die drei möglichen Arten von Hohlräumen im Material. Geschlossene Poren haben keine Verbindung zur Umgebung, blinde Poren haben nur eine Öffnung und durchgehenden Poren haben mindestens zwei Verbindungen zur Umgebung. Somit tragen nur die durchgehende Poren zur Luftdurchlässigkeit bei. [24]

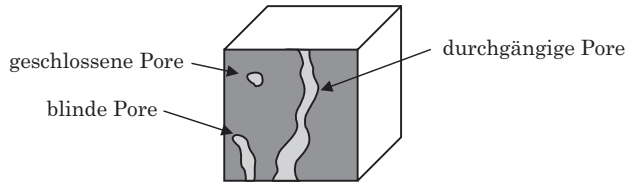


Abbildung 2.8.: Arten von Poren [24]

Für die Anforderungen an die laseradditiv gefertigte, luftdurchlässige Mesostruktur ist eine funktionale Einteilung der Porosität des Materials sinnvoll. Die absolute Porosität bezeichnet hierbei den Volumenanteil der Poren am Material unabhängig vom Porentyp. Alle Poren reduzieren unabhängig von den Verbindungen zur Umgebung die Festigkeit des Materials, da die Hohlräume keine Kräfte übertragen können und wie eine Kerbe wirken. Für mechanisch belastete, luftdurchlässige Materialien ist ein hoher Anteil an durchgehenden Verbindungen wichtig, da nur sie zur Funktion des Materials beitragen. Die durchgehende Porosität wird daher als Nutzporosität bezeichnet und ein hoher Wert wird als Ziel für die Entwicklung des laseradditiv gefertigten, luftdurchlässigen Materials definiert. [53]

Die Porosität ϵ bestimmt sich mit

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{Probe}}}{\rho_{\text{Ref}}} \quad (2.6)$$

aus der gemessenen Dichte ρ_{Probe} und der theoretischen Dichte ρ_{Ref} des porenfreien

Laseradditiv gefertigte, luftdurchlässige
Mesostrukturen

Herstellung und Eigenschaften für die Anwendung

Klahn, C.

2015, XVI, 208 S. 158 Abb., 48 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-47760-1