

Light Engineering für die Praxis

Vanessa Seyda

Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung

Herausgegeben von Claus Emmelmann

 Springer Vieweg

Light Engineering für die Praxis

Reihe herausgegeben von
C. Emmelmann, Hamburg, Deutschland

Technologie- und Wissenstransfer für die photonische Industrie ist der Inhalt dieser Buchreihe. Der Herausgeber leitet das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik an der Technischen Universität Hamburg sowie die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT. Die Inhalte eröffnen den Lesern in der Forschung und in Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte und Prozesse zu erkennen und so ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken. Die Kenntnisse dienen der Weiterbildung von Ingenieuren und Multiplikatoren für die Produktentwicklung sowie die Produktions- und Lasertechnik, sie beinhalten die Entwicklung lasergestützter Produktionstechnologien und der Qualitätssicherung von Laserprozessen und Anlagen sowie Anleitungen für Beratungs- und Ausbildungsdienstleistungen für die Industrie.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13397>

Vanessa Seyda

Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung

Vanessa Seyda
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447 ISSN 2522-8455 (electronic)
Light Engineering für die Praxis
ISBN 978-3-662-58232-9 ISBN 978-3-662-58233-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58233-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Zusammenfassung

Die laseradditive Fertigung metallischer Bauteile hat in den vergangenen Jahren eine steigende Verbreitung in der industriellen Produktionslandschaft erfahren. Bei diesem Fertigungsprozess wird ein flächig aufgetragenes Metallpulver mittels Laserstrahlung lokal vollständig aufgeschmolzen und auf Basis eines virtuell zerlegten 3D-Datensatzes schichtweise in ein physisches Bauteil umgewandelt. Das Prozessergebnis wird, neben der Art der Fertigungsanlage und der Wahl der Prozessparameter zur Bauteilherstellung, vom Eigenschaftsprofil des eingesetzten Pulverwerkstoffs beeinflusst. Allerdings stellen u. a. fehlende Vorgaben für die Qualität und Qualitätssicherung des Metallpulvers und mangelnde Kenntnisse über den Einfluss der Pulvereigenschaften auf die Qualitätsmerkmale der Bauteile besondere Herausforderungen dar, die die Etablierung der laseradditiven Fertigung als (Serien-) Produktionsverfahren in Hochtechnologiebranchen, wie z. B. in der Luftfahrt, erschweren.

Gegenstand dieser Dissertation sind daher grundlegende Untersuchungen zum Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung. Dabei wird die Eignung von verschiedenen gas- und plasmaverdünnten Pulverwerkstoffen der Titanlegierung Ti-6Al-4V für die laseradditive Fertigung von qualitativ hochwertigen Bauteilen bewertet und die Anwendbarkeit verschiedener Prüfmethoden zur Charakterisierung der eingesetzten Pulverwerkstoffe beurteilt. Ferner werden ausgewählte handhabungs-, prozess- und anlagenseitige Einflussfaktoren auf die charakteristischen Eigenschaften der Ti-6Al-4V-Pulver beim Transport und der Lagerung, beim Pulverauffrag und beim Sieben und Mischen analysiert.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden die zum Zwecke der Qualitätssicherung zu prüfenden Pulvereigenschaften vorgeschlagen und Anforderungen an das Eigenschaftsprofil eines Ti-6Al-4V-Pulverwerkstoffs für die laseradditive Fertigung formuliert. Mithilfe der erzielten Ergebnisse werden weiterhin Maßnahmen entwickelt, durch die Vorgänge, die eine Veränderung der Pulvereigenschaften bewirken, vermieden und Bedingungen, unter welchen eine Beeinflussung des Pulvers erfolgt, frühzeitig erkannt werden können. Zusätzlich werden Handlungsempfehlungen zum Transport, zur Lagerung und zum Recycling von Ti-6Al-4V-Pulvern abgeleitet.

Sowohl das erweiterte Verständnis des Werkstoff- und Prozessverhaltens als auch die abgeleiteten Maßnahmen und Handlungsempfehlungen können zukünftig zur Qualitätssicherung der in der laseradditiven Fertigung eingesetzten Pulverwerkstoffe genutzt werden. Bereits existierende Qualitätssicherungsmethoden für den laseradditiven Fertigungsprozess werden somit um Vorgaben für die vor- und nachgelagerten Schritte ergänzt, was zu einer ganzheitlichen Qualitätssicherung entlang der gesamten Prozesskette beiträgt.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1 Einleitung.....	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Laseradditive Fertigung.....	3
2.1.1 Verfahren und Funktionsweise.....	3
2.1.2 Wirkprinzip und Prozessparameter	6
2.1.3 Produktivität und Qualitätsmerkmale	8
2.2 Eigenschaften von Metallpulvern.....	11
2.2.1 Grundlegende charakteristische Eigenschaften	11
2.2.2 Mechanische Eigenschaften	18
2.2.3 Thermische Eigenschaften.....	22
2.2.4 Optische Eigenschaften	23
2.2.5 Elektrische Eigenschaften	24
2.2.6 Pyrophore Eigenschaften.....	24
2.3 Herstellung von Metallpulvern.....	25
3 Zielsetzung und Lösungsweg.....	31
4 Systematische Einflussanalyse	33
4.1 Strukturierung des betrachteten Systems.....	33
4.2 Handhabungs-, anlagen- und prozessseitige Einflussfaktoren.....	34
4.3 Korrelation zum Eigenschaftsprofil des Metallpulvers	40
4.4 Bewertung der Einflussfaktoren	51
5 Versuchsbedingungen und Messmethoden	59
5.1 Versuchswerkstoff.....	59
5.2 Anlagentechnik.....	62
5.2.1 Pulverauftragssysteme.....	63
5.2.2 Pulverwerkstoffaufbereitung	65
5.3 Methoden zur Pulvercharakterisierung.....	66
5.4 Methoden zur Festkörpercharakterisierung	71
6 Eignung von Pulverwerkstoffen und Prüfverfahren.....	73
6.1 Werkstoffeigenschaften der verwendeten Pulver	73
6.1.1 Partikelmorphologie und –größenverteilung	74
6.1.2 Chemische Zusammensetzung und Feuchtigkeit.....	85
6.1.3 Fließeigenschaften.....	86
6.2 Prozessverhalten der verwendeten Pulver	102
6.3 Qualität der gefertigten Bauteile.....	106

6.3.1	Dichte und Porosität	107
6.3.2	Chemische Zusammensetzung und Mikrostruktur	110
6.3.3	Oberflächenrauheit	112
6.3.4	Härte und mechanische Festigkeit	112
6.4	Fazit	114
7	Pulverauftrag in der laseradditiven Fertigung	119
7.1	Numerische Untersuchungen zum Pulverauftrag	119
7.1.1	Systembeschreibung und Modellbildung	120
7.1.2	Modellumsetzung	126
7.1.3	Simulationsergebnisse	131
7.1.4	Validierung	140
7.2	Experimentelle Untersuchungen zum Pulverauftrag	147
7.2.1	Pulverauftragssysteme	147
7.2.2	Pulverauftragsgeschwindigkeit	154
7.3	Fazit	160
8	Transport und Lagerung von Pulverwerkstoffen	163
8.1	Vibration	163
8.2	Klima	169
8.2.1	Betauung	170
8.2.2	Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel	173
8.3	Fazit	179
9	Recycling von Pulverwerkstoffen	185
9.1	Wiederverwendung	185
9.1.1	Einfluss auf den Pulverwerkstoff	185
9.1.2	Einfluss auf die Bauteilqualität	188
9.2	Pulververgrößerung	191
9.2.1	Bildung von Spritzern	192
9.2.2	Sintern von Pulverpartikeln	198
9.3	Sieben und Mischen	202
9.3.1	Sieben des Pulverwerkstoffs	202
9.3.2	Einfluss des Siebens	205
9.3.3	Einfluss des Mischens	210
9.4	Fazit	213
10	Zusammenfassung	217
	Literaturverzeichnis	221
	Anhang	245

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Benennung
A	-; %; mm; cm^2	Absorption; Bruchdehnung; Amplitude; Fläche
A_i	cm^2	Fläche des i-ten Probekörpers
$A_{\text{Bevorrattung}}$	cm^2	Grundfläche der Bevorrattung
A_{Mantel}	cm^2	Mantelfläche
a	mm	Abstand
a_{effektiv}	m/s^2	Effektivbeschleunigung
a_z	m/s^2	Vertikalbeschleunigung
b_i	mm	Breite des i-ten Probekörpers
C_H	J	Hamaker-Konstante
c	N/mm^2 ; m/s^2	Scherfestigkeit; Lichtgeschwindigkeit
c_p, Gas	J/kg K	spezifische Wärmekapazität des Gases
$c_p, \text{Partikel}$	J/kg K	spezifische Wärmekapazität der Partikel
c_p, Pulver	J/kg K	spezifische Wärmekapazität des Pulvers
D_S	μm	Schichtdicke
D_{S^*}	μm	theoretische Schichtdicke
$D_{S, \text{eff}}$	μm	effektive Schichtdicke
D_{S, eff^*}	μm	angepasste effektive Pulverschichtdicke
$D_{S, \text{Oxid}}$	nm	Dicke der Oxidschicht
d	μm	Nenndrahtdicke
d_L	mm	Laserstrahldurchmesser
d_n	kg/s	Dämpfungskonstante in Normalenrichtung
d_p	%	relative Packungsdichte
d_s	%	relative Dichte
d_t	kg/s	Dämpfungskonstante in Tangentialrichtung
E	N/mm^2	E-Modul
E_{AE}	mJ	Belüftungsenergie
E_{BFE}	mJ	Basis-Fließfähigkeitsenergie
E_c	J/m^3	Kohäsionsenergiedichte
E_c, PG	J/m^3	Kohäsionsenergiedichte zwischen Pulverwerkstoff und Kontaktpartner
E_c, PG, Stahl	J/m^3	Kohäsionsenergiedichte der Paarung Ti-6Al-4V/Stahl
$E_c, PG, \text{Elastomer}$	J/m^3	Kohäsionsenergiedichte der Paarung Ti-6Al-4V/Elastomer
E_c, PP	J/m^3	Kohäsionsenergiedichte zwischen Pulverpartikeln
E_F	J/mm^2	Flächenenergie
E_L	J/mm^3	Energiedichte pro Volumeneinheit
E_S	J/mm	Streckenenergie
E_{SE}	mJ/g	spezifische Energie
E_V	J/mm^3	Volumenenergie

E^*	N/mm ²	mittlere Partikelsteifigkeit
F_0	%	Sieböffnungsgrad
$F(x)$	%	kumulierte Häufigkeitsverteilung für die Partikelgröße
$F(\alpha_{dyn})$	%	kumulierte Häufigkeitsverteilung für den Lawinenwinkel
f	mm; Hz; -	Fokusslage; Frequenz; Massenanteil des Feinguts
f_{ar}	-	Seitenverhältnis
f_c	-	Zirkularität
ff_c	-	Fließfähigkeit
F	N	Kraft
F_B	N	Scherkraft durch das Pulverauftragssystem
F_N	N	Normalkraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_H	N	Haftkraft
$F_{P, B}$	N	Tangentialkraft zwischen Partikeln und Pulverauftragssystem
$F_{P SP}$	N	Tangentialkraft zwischen Partikeln und Substratplatte
$F_{R, C}$	N	Reibungskraft nach Coulomb
F_{RW}	N	Rollwiderstandskraft
F_{vdW}	N	van-der-Waals-Kraft
$F_{vdW, 0}$	N	van-der-Waals-Kraft ohne Kontaktabplattung
$F_{vdW, B}$	N	van-der-Waals-Kraft zwischen Partikeln und Pulverauftragssystem
$F_{vdW, SP}$	N	van-der-Waals-Kraft zwischen Partikeln und Substratplatte
$F_{vdW, W}$	N	van-der-Waals-Kraft zwischen Partikeln und Wänden
G	GPa	Schubmodul
g	m/s ² ; -	Erdbeschleunigung; Massenanteil des Grobguts
HF	-	Hausner-Faktor
h	Js; mm	Planck'sches Wirkungsquantum; Höhe
h_0	mm	Ausgangshöhe
h_1	mm	Absprunghöhe nach Aufprall; Höhe an Position 1
h_k	µm	Kontaktabplattung
h_i	mm	Höhe an Position i
h_s	mm	Spurabstand
I	W/m ²	Laserstrahlintensität
i	-	Restitutionskoeffizient
J_i	kg·m ²	Massenträgheitsmoment des i-ten Partikels
KV_2	J	Kerbschlagarbeit
k_n	N/m	Federsteifigkeit in Normalenrichtung
k_t	N/m	Federsteifigkeit in Tangentialrichtung
l	mm	Länge
l_f	mm	mittlere freie Länge
l_{opt}	µm	optische Eindringtiefe

l_{sin}	mm	sinteraktive Länge
M_i	Nm	Moment am i-ten Partikel
M^2	-	Strahlqualität
m	g	Masse
m_A	g	Masse des Aufgabeguts
m_B	g	Masse des Feinguts aus dem Bauraum
$m_{Bauteil}$	g	Masse des Bauteils
m_F	g	Masse des Feinguts
m_G	g	Masse des Grobguts
m_{Gas}	g	Masse des Gases
$m_{Partikel}$	g	Masse des Partikels
m_{Pulver}	g	Masse des Pulvers
$m_{Pulver, s2}$	g	Masse des Pulvers von der Überlaufplattform
m_{Rest}	g	Masse der Rückstände
$m_{Rest, s1}$	g	Masse der Spritzer aus der Pulverschüttung
$m_{Spritzer}$	g	Masse der Spritzer
m_U	g	Masse des Feinguts aus dem Überlauf
N	-	Anzahl der Siebwürfe
n	-	Anzahl
P_L	W	Laserstrahlleistung
P_{L0}	W	Laserstrahlleistung vor dem Eintritt in das Material
p	Js/mm ²	Impulsdichte der Laserstrahlung
p_{Oxid}	%	Anteil der Oxidschicht
$Q_r(x)$	-	Verteilungssumme
$Q_3(x)$	-	Verteilungssumme (Volumenverteilung)
$Q_3(f_c)$	-	Verteilungssumme der Zirkularität
$q_r(x)$	1/μm	Verteilungsdichte
$q_3(x)$	1/μm	Verteilungsdichte (Volumenverteilung)
$q_{ges}(x)$	1/μm	Verteilungsdichte der Pulvergesamtheit
R	-	Reflexion
R_a	μm	arithmetische Mittenrauheit
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
R_z	μm	gemittelte Rautiefe
RH	%	relative Luftfeuchtigkeit
r	mm	Radius
$r_{1,2}$	μm	mittlerer Radius
r_{Stift}	mm	Radius des Stifts
$r_{Zylinder}$	mm	Radius des Zylinders
s	mm	Scherweg; Abstand
s_i	mm	Abstand an Position i
T	-; °C	Transmission; Temperatur
T_β	°C	Umwandlungstemperatur
T_T	°C	Taupunkttemperatur
T_{tr}	°C	Temperatur am Tripelpunkt von Wasser
t_B	h	Berechnungsdauer
t_D	s	Durchflussdauer

t_M	s	Mischdauer
t_S	s	Siebdauer
t_{Sim}	s	Simulationsdauer
$V_{Bauteil}$	cm ³	Volumen des Bauteils
$V_{Festkörper}$	cm ³	Volumen des Festkörpers
V_H	cm ³	Volumen der Hohlräume
V_{Oxid}	cm ³	Volumen der Oxidschicht
V_{Pulver}	cm ³	Volumen des Pulvers
V_Z	cm ³	Volumen der Zwischenräume
$V_{Zylinder}$	cm ³	Volumen des Zylinders
\dot{V}	W/s	Volumenaufbaurrate
v	-	Schiefe der Verteilung
v_A	-	Schiefe der Verteilung des Aufgabeguts
v_B	mm/s	Pulverauftragungsgeschwindigkeit
v_F	-	Schiefe der Verteilung des Feinguts
v_j	-	Mengenanteil einer Komponente
v_L	mm/s	Luftstromgeschwindigkeit
v_s	mm/s	Belichtungsgeschwindigkeit
W	-	Durchtrittswahrscheinlichkeit
w	μm	Maschenweite
\bar{w}	μm	mittlere Maschenweite
x	μm	Partikelgröße
$x_{10,3}$	μm	10 %-Partikelgröße (Volumen)
$x_{50,3}$	μm	Medianwert (Volumen)
$x_{90,3}$	μm	90 %-Partikelgröße (Volumen)
x_{max}	μm	maximale Partikelgröße
$x_{r,h}$	μm	Modalwert
$x_{3,h}$	μm	Modalwert (Volumen)
\bar{x}_r	μm	mittlere Partikelgröße
\bar{x}_0	μm	mittlere Partikelgröße (Anzahl)
\bar{x}_3	μm	mittlere Partikelgröße (Volumen)
x_i	μm	Trennpartikelgröße
\ddot{x}_i	m/s ²	Beschleunigung des i-ten Partikels

Griechische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Benennung
Δp	mbar	Druckabfall
ΔQ_3	%	Anteil der Agglomerate
α	°	Schüttwinkel
α_{dyn}	°	Lawinenwinkel
$\bar{\alpha}_{dyn}$	°	Mittelwert des Lawinenwinkels
β	1/cm	Absorptionskoeffizient
ε	-	Porosität der Pulverschüttung
η_{Rest}	-	Anteil der Rückstände
$\eta_{Spritzer}$	-	Anteil der Spritzer
λ	μm; W/mK	Wellenlänge; Wärmeleitfähigkeit

λ_{eff}	W/mK	effektive Wärmeleitfähigkeit
μ_{ges}	-	Menge der Pulvergesamtheit
μ_{Haft}	-	Haftreibungskoeffizient
μ_i	-	Reibungskoeffizient
μ_j	-	Menge einer Komponente
$\mu_{P, B}$	-	Reibungskoeffizient zwischen Partikeln und Pulverauftragssystem
$\mu_{P, SP}$	-	Reibungskoeffizient zwischen Partikeln und Substratplatte
μ_{Roll}	-	Rollreibungskoeffizient
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ_{Ar}	g/cm ³	Dichte von Argon
ρ_b	g/cm ³	Schüttdichte
ρ_{CBD}	g/cm ³	konditionierte Schüttdichte
ρ_f	g/cm ³	Dichte des Gases
ρ_N	g/cm ³	Dichte von Stickstoff
ρ_p	g/cm ³	Packungsdichte
$\bar{\rho}_p$	g/cm ³	mittlere Packungsdichte
ρ_s	g/cm ³	Festkörperdichte
ρ_t	g/cm ³	Stampfdichte bzw. Klopfdichte
σ	N/mm ²	Normalspannung
σ_l	N/mm ²	Verfestigungsspannung
σ_c	N/mm ²	Druckfestigkeit
σ_G	N/mm ²	Spannung durch Eigengewicht des Pulvers
σ_h	N/mm ²	Horizontalspannung
σ_t	N/mm ²	Zugfestigkeit
τ	N/mm ²	Schubspannung
τ_c	kPa	Kohäsion
φ	°	Reibungswinkel
φ_{opt}	-	Kennzahl zur optischen Bewertung des Fließverhaltens
ψ_W	-	Sphärizität nach Wadell
$\dot{\omega}_i$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit des i-ten Partikels
ϕ	%	Porosität

Abkürzungen

Abkürzung	Benennung
3D	dreidimensional
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	computer aided design
CCD	charge-coupled device
cw	continuous wave
DEM	Diskrete Elemente Methode
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direktes Metall Laser Sintern

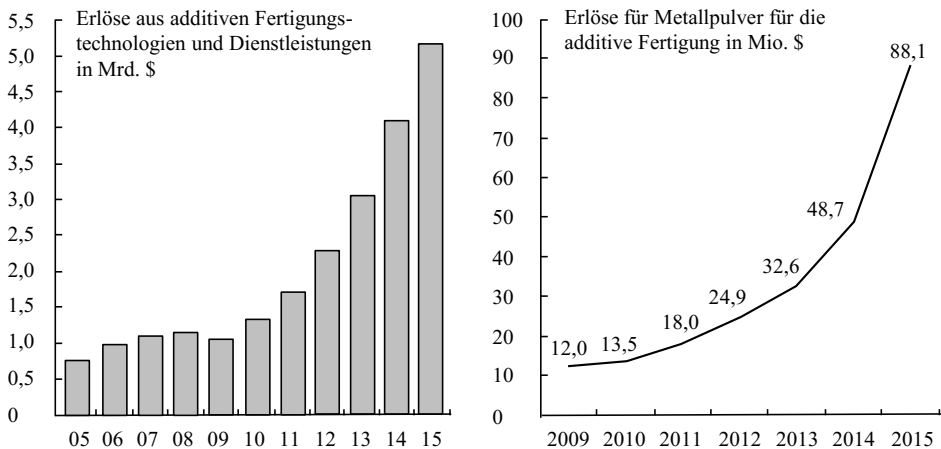
EIGA	Electrode Induction Gas Atomization
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis, Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse
HDH	Hydride Dehydride
LMF	Laser Metal Fusion
NGI	Norwegian Geotechnical Institute
NIR	Nahes Infrarot
PMT	Powder Manipulation Technology
PREP	Plasma Rotating Electrode Process
REM	Rasterelektronenmikroskop
SIGI	Swedish Geotechnical Institute
SLM	Selective Laser Melting
STL	Surface Tessellation Language
TGHE	Trägergasheißextraktion
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy, Röntgenphotoelektronenspektroskopie

1 Einleitung

Durch Megatrends wie Globalisierung, Individualisierung und Konnektivität werden Unternehmen mit einer sich zunehmend verschärfenden Wettbewerbssituation konfrontiert. Vor allem die wachsenden Kundenansprüche an die Individualität der Produkte bei gleichzeitig immer kürzeren Produktlebenszyklen und die Notwendigkeit, immer kostengünstiger produzieren zu müssen, stellen Unternehmen vor große Herausforderungen. Eine erhöhte Flexibilisierung der Produktion kann eine Chance bieten, den steigenden Anforderungen gerecht zu werden.

In diesem Zusammenhang wird der additiven Fertigung als disruptiver Technologie das Potenzial zugesprochen, zukünftig die Wertschöpfung von Produkten weltweit zu verändern. Bereits heute besitzt der Markt der additiven Fertigung ein Volumen von mehr als 4,5 Mrd. € (Stand: 2015) mit durchschnittlichen Wachstumsraten von 30 % pro Jahr im Zeitraum von 2012 bis 2015 (vgl. Abbildung 1.1 a)) [Woh16]. Auch für die nächsten Jahre wird ein massives Wachstum des Marktes für additive Fertigungstechnologien und Dienstleistungen prognostiziert. Verschiedenen Schätzungen zufolge wird erwartet, dass sich die Marktgröße bis zum Jahr 2020 vervierfachen wird [Rol16].

Insbesondere die additive Fertigung mit Metall ist zur Herstellung von Funktionsbauteilen von großem Interesse. Der Einsatz der laseradditiven Fertigung, bei der ein Laserstrahl als Energiequelle genutzt wird, um ein Metallpulver schichtweise aufzuschmelzen, hat in den vergangenen Jahren in der industriellen Produktionslandschaft zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die stetig angestiegenen Umsatzerlöse für metallische Werkstoffe für die additive Fertigung und der für Metallpulver in 2015 zu verzeichnende Zuwachs der Umsatzerlöse von über 80 % verleihen dieser Entwicklung Ausdruck (vgl. Abbildung 1.1 b)) [Woh16].



a) Entwicklung der Marktgröße für additive Fertigungstechnologien und Dienstleistungen

b) Entwicklung der Umsatzerlöse für Metallpulver

Abbildung 1.1: Bedeutung der additiven Fertigung in Metall [Woh16]

Dennoch erschweren hohe Materialkosten und fehlende Qualitätsstandards für Metallpulver die Etablierung der laseradditiven Fertigung metallischer Bauteile als industrielles (Serien-) Produktionsverfahren. Diesbezüglich hervorzuheben sind Aspekte wie u. a. ein geringes Verständnis des verwendeten Pulverwerkstoffs, mangelnde Kenntnisse über die Beziehung zwischen dem Eigenschaftsprofil des Pulvers und den Qualitätsmerkmalen der gefertigten Bauteile sowie fehlende Vorgaben für die Qualität des Metallpulvers für den Einsatz in der laseradditiven Fertigung.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung grundlegend zu untersuchen. Schwerpunkte bilden die Identifizierung von qualitätsrelevanten Einflüssen und deren Auswirkungen auf das Metallpulver sowie die experimentelle Analyse ausgewählter Einflussfaktoren für den Versuchswerkstoff Ti-6Al-4V. Zur Definition der Pulverqualität werden ferner die zu mesenden Eigenschaften eines Pulverwerkstoffs identifiziert, die zu erfüllenden Anforderungen ermittelt und die Eignung verschiedener Prüfverfahren zur Beurteilung von Qualitätsmerkmalen bewertet. Durch das gewonnene erweiterte Verständnis des Pulverwerkstoffs und die aus den Untersuchungen abgeleiteten Handlungsempfehlungen wird ein Beitrag zur Qualitätssicherung von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung geleistet. Die Beherrschung des laseradditiven Fertigungsprozesses und das Wissen über die Eigenschaften des genannten Pulverwerkstoffs bieten nicht nur Optimierungspotenziale hinsichtlich der Funktion, des Gewichts und der Kosten von Bauteilen, sondern tragen auch durch ihre Material- und Energieeffizienz zu einer besseren Öko-Bilanz der gesamten Produktionsprozesskette bei.



2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die laseradditive Fertigung metallischer Bauteile, auch unter den Bezeichnungen (*Laser-*) *Strahlschmelzen* [VDI14], *Direktes-Metall-Laser-Sintern (DMLS)* [EOS17a], *Selective Laser Melting (SLM)* [SLM17a], *LaserCUSING* [Con17a], *Laser Metal Fusion (LMF)* [Tru17] und *industrieller 3D-Druck* [EOS17a] bekannt, zählt zu den pulverbettbasierten Verfahren und erlaubt die schichtweise Herstellung von Funktionsbauteilen mittels Laserstrahlung aus einkomponentigen Metallpulvern [VDI14]. Im Folgenden wird zunächst der Stand von Wissenschaft und Technik zur laseradditiven Fertigung metallischer Bauteile zusammengefasst. Anschließend werden die grundlegenden Eigenschaften der eingesetzten Metallpulver vermittelt und deren Herstellung erläutert.

2.1 Laseradditive Fertigung

Bei der laseradditiven Fertigung handelt es sich um ein generatives Verfahren, welches der ersten Hauptgruppe der Fertigungsverfahren *Urformen* zugeordnet wird [DIN03]. Generative bzw. additive Fertigungsverfahren zeichnen sich im Allgemeinen durch das diskontinuierliche Fügen einzelner Volumenelemente in Aufbaurichtung eines Bauteils aus [Geb07]. In der laseradditiven Fertigung wird im Speziellen ein einkomponentiges Metallpulver durch die Energie eines Laserstrahls selektiv vollständig aufgeschmolzen und Schicht für Schicht auf Basis eines virtuell zerlegten 3D-Datensatzes in ein Bauteil umgewandelt. Durch diesen schichtweisen Aufbau von Bauteilen in einem Pulverbett bietet die laseradditive Fertigung eine hohe Gestaltungsfreiheit und ermöglicht die gleichzeitige Herstellung individueller Bauteile mit hoher Komplexität und integrierten Funktionen. Industriell werden diese Verfahrensvorteile derzeit vor allem im Werkzeug- und Formenbau [Kla13], in der Medizintechnik [Emm11a] und in der Automobil- und Luftfahrtindustrie [Emm11b, Ohl15, Spi15a] genutzt. In diesen Branchen wird die laseradditive Fertigung von funktionalen Endprodukten aus Metallpulvern mit Einzelteil- oder (Klein-) Seriencharakter im Sinne des *Rapid Manufacturing* eingesetzt. Zum Einsatz kommen dabei hauptsächlich Werkzeug- und Edelmetalle (z. B. 1.2709, 1.4404, 1.4542), Aluminiumlegierungen (z. B. AlSi10Mg, AlSi12), Titanlegierungen (z. B. Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb) sowie Kobalt-Chrom-Legierungen (z. B. CoCrMo) und Nickelbasislegierungen (z. B. IN718, IN625) [Con17b, EOS17b, SLM17b].

2.1.1 Verfahren und Funktionsweise

Die Prozesskette der laseradditiven Fertigung gliedert sich in die in Abbildung 2.1 dargestellten Prozessschritte. Den Ausgangspunkt bildet ein am Computer erstelltes, ein durch bildgebende Verfahren erzeugtes oder ein durch *Reverse Engineering* von einem physischen Bauteil gewonnenes virtuelles 3D-CAD-Modell. Die Geometriedaten dieses dreidimensionalen Datensatzes werden durch Triangulation der Oberfläche des Volumenmodells in das STL (*Surface Tessellation Language*) Standarddateiformat umgewandelt. Das im STL-Format vorliegende Modell wird im Raum orientiert, positioniert und ggf. mit Stützstrukturen versehen, bevor es durch das sogenannte *Slicen* in Schichten mit bestimmter Schichtdicke geschnitten wird. Den erzeugten Schichten werden im Folgeschritt durch das Füllen der Flächen mit einzelnen Vektoren, dem *Hatchen*, anlagen- und

prozessspezifische Fertigungsparameter zugewiesen. Dieser vollständige Datensatz enthält die notwendigen Informationen zur Durchführung des Fertigungsprozesses, in dem ein Bauteil durch das wiederholte Aneinanderfügen und schmelzmetallurgische Verbinden einzelner Schichtelemente hergestellt wird [Geb13]. Dem beendeten Fertigungsprozess können Nach- und Endbearbeitungsschritte zur Bauteilreinigung, zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften oder zur Steigerung der Oberflächengüte des Bauteils folgen.

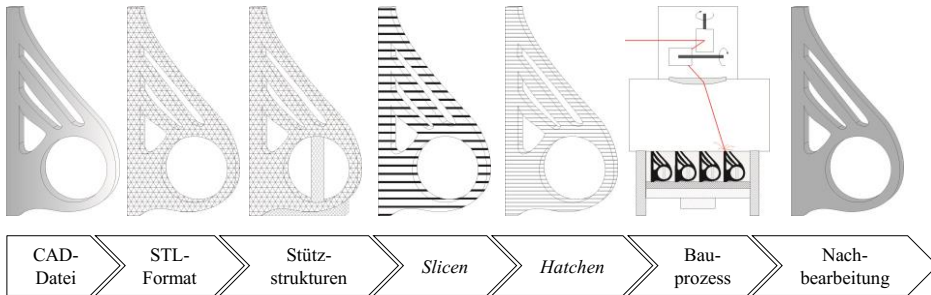


Abbildung 2.1: Prozesskette der laseradditiven Fertigung

Abbildung 2.2 zeigt einen typischen Bauraum und das automatisierte, zyklische Verfahrensprinzip der laseradditiven Fertigung, welches den derzeit kommerziell verfügbaren Fertigungsanlagen gemein ist.

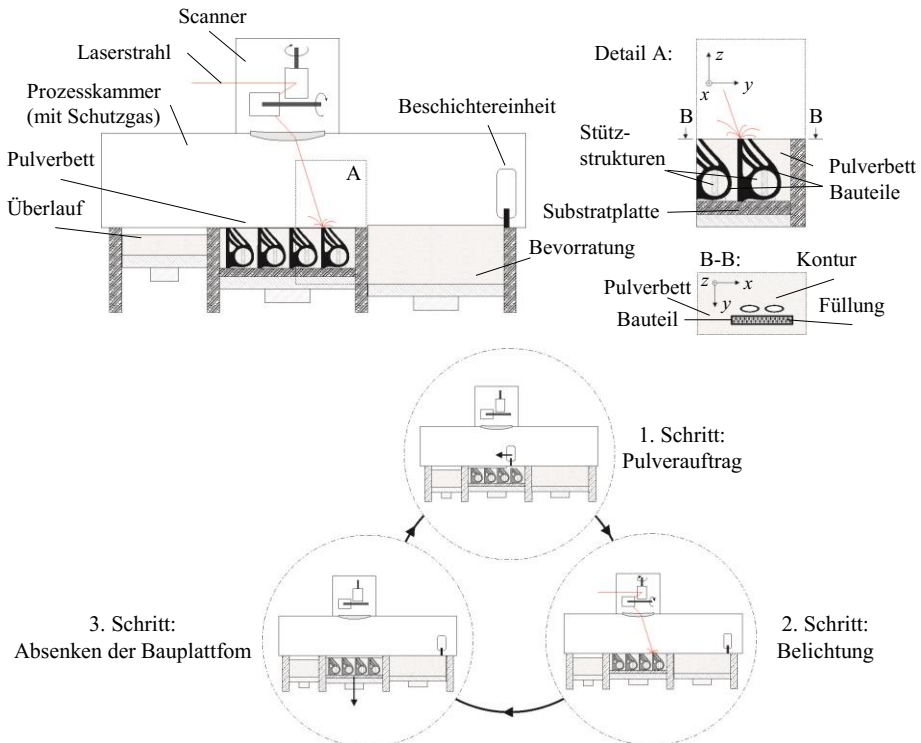


Abbildung 2.2: Typischer Bauraum und Verfahrensprinzip der laseradditiven Fertigung in Anlehnung an [Her16]

Diese Anlagen unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Anlagenspezifika, u. a. in Bezug auf die Größe des Bauraums, die Zufuhr und Verteilung des Metallpulvers, die Anzahl und Leistung der eingesetzten Laserstrahlquellen sowie die verwendeten Elemente zur Strahlführung und -formung.

Im ersten Fertigungsschritt wird eine Pulverschicht auf einer auf der Bauplattform befestigten Substratplatte mit den geometrischen Abmessungen von 50 mm x 50 mm bis zu 800 mm x 400 mm aufgetragen [Con17c]. Die Schichtdicke D_s wird durch die Absenkstrecke z der Bauplattform angegeben und beträgt zwischen 20 μm und 100 μm [Bre11]. Das zum Auftrag benötigte Metallpulver wird entweder durch das definierte Anheben eines linear beweglichen Vorratssystems neben der Bauplattform vorgelegt oder durch einen über der Bauplattform horizontal fahrbaren Pulverbehälter bereitgestellt, der den Pulverwerkstoff für den Schichtauftrag dosiert. Zur flächigen Verteilung des Metallpulvers fährt der Pulverbehälter oder eine Beschichtereinheit mit einer festgelegten Geschwindigkeit horizontal oder in einer Drehbewegung über die zu beschichtende Arbeitsebene hinweg. Diese Bewegung verläuft entweder in eine Richtung (unidirektionale Beschichtung) oder in beide Verfahrrichtungen (bidirektionale Beschichtung). Dabei wird der Pulverwerkstoff jeweils mithilfe eines Beschichters auf der Substratplatte verstrichen. Gleichzeitig sorgt der Beschichter während der Überfahrt für eine Nivellierung des aufgetragenen Pulvers. Auf eine nachträgliche Verdichtung des Pulverbetts wird verzichtet [VdS95]. Die unterschiedlichen Pulverauftragsmechanismen sind in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.

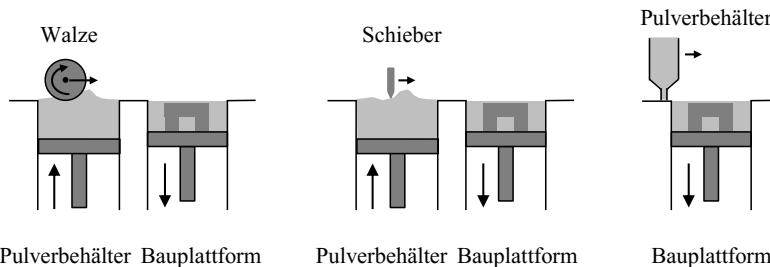


Abbildung 2.3: Unterschiedliche Pulverauftragsmechanismen [Mei99, VdS95]

Der Beschichter kann als dynamische Walze, die sich entgegen der Pulverauftragsrichtung dreht, oder als statische Klinge oder Wischer ausgelegt werden. Als statische Beschichter kommen starre Systeme in Form von einer Stahl- oder Keramik Klinge oder flexible Werkzeuge wie eine Elastomerklinge, eine Silikonlippe oder eine Kohlenstofffaserbürste zum Einsatz. Metallpulver, das nicht auf der Arbeitsebene verbleibt, wird vom Beschichter in einen Überlauf hinter der Bauplattform transportiert.

Im zweiten Fertigungsschritt wird ein Laserstrahl mithilfe einer Scanneroptik, bestehend aus einer Ablenkeinheit und einer Fokussieroptik, über die pulverbefüllte Arbeitsebene gelenkt und oberhalb, auf oder unterhalb der Pulverbettsoberfläche fokussiert [Eis10]. Das Metallpulver wird entsprechend des Bauteilquerschnitts in der x - y -Ebene entlang der Kontur und im Innenbereich selektiv belichtet und lokal aufgeschmolzen. Eingesetzt werden vorwiegend Single Mode Faserlaser im Dauerstrichbetrieb (cw), die im TEM_{00} -Grundmode arbeiten und beugungsbegrenzte Strahlung (Beugungsmaßzahl $M^2 \approx 1,1$) mit einer Wellenlänge λ im nahen Infrarot (NIR) (1060 nm – 1080 nm) emittieren [IPG17]. Die Leistung P_L der Laserstrahlquelle beträgt zwischen 20 W [Rea17] und 1 kW

[Con17c, EOS17c]. Mithilfe von zwei drehbar gelagerten Galvanometerspiegeln wird der Laserstrahl mit einer Belichtungsgeschwindigkeit v_s in der x - y -Ebene bewegt. Zur Strahlführung und -formung kommen sowohl präobjektive Scanner in Verbindung mit einer sogenannten F-Theta-Optik zur Abbildung des Fokus in einer Ebene unabhängig von der Spiegelauslenkung als auch postobjektive Scanner mit einer dynamischen Fokussieroptik zum Einsatz. Bei präobjektiven Scannern erfolgt die Positionierung des Laserstrahls vor dem Durchgang durch die Fokussierlinse, während sich bei postobjektiven Scannern die Fokussieroptik vor der Spiegelableitheit befindet [Sch12].

Nach der selektiven Belichtung des Pulverbetts wird im dritten Fertigungsschritt die Bauplattform um den Betrag der Schichtdicke D_s in negative z -Richtung bewegt. Das Metallpulver für die folgende Schicht wird nachdosiert und der Fertigungszyklus beginnt erneut, indem der bereitgestellte Pulverwerkstoff durch den Beschichter auf der Arbeitsebene verteilt wird. Der aus den drei Schritten bestehende Kreislauf wird bis zur Fertigstellung des Bauteils iteriert.

Der laseradditive Fertigungsprozess findet in einer geschlossenen Prozesskammer statt, in der eine Schutzgasatmosphäre kontinuierlich aufrechterhalten wird, sodass der Restsauerstoffgehalt in dieser Kammer weniger als 0,1 % beträgt. Stickstoff oder Argon werden dabei zur Vermeidung von unerwünschten Wechselwirkungen des Metallpulvers mit der Umgebung, wie beispielsweise der Oxidation des Pulverwerkstoffs, und zum Schutz der Schmelze strömend zugeführt. Weiterhin werden durch die Umspülung der Arbeitsebene mit einem Schutzgas Prozessnebenprodukte wie Schweißrauch, kondensierte Partikel und entstandene Schweißspritzer abtransportiert [Fer12, Lad16].

Nach der Beendigung des Fertigungsprozesses müssen die hergestellten Bauteile von umgebendem Metallpulver befreit werden, bevor die Substratplatte aus der Prozesskammer entnommen werden kann. Sowohl das nicht aufgeschmolzene Pulver aus dem Pulverbett als auch das im Überlauf befindliche Metallpulver werden recycelt und erneut eingesetzt. Die laseradditiv gefertigten Bauteile müssen nach der Entnahme aus der Fertigungsanlage zunächst von der Substratplatte getrennt und können im Anschluss nachbearbeitet werden.

2.1.2 Wirkprinzip und Prozessparameter

Das der laseradditiven Fertigung zugrunde liegende physikalische Wirkprinzip ist das Verbinden der einzelnen Spuren und Schichten in einem mit dem Wärmeleitungsschweißen vergleichbaren Prozess [Pop05]. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.4 schematisch skizziert.

Der Laserstrahl mit der Leistung P_L wird mit der Belichtungsgeschwindigkeit v_s entlang festgelegter, paralleler Bahnen geführt und fährt dabei Innen- und Außenkonturen sowie die dazwischenliegenden Schichtflächen des Bauteils ab. Entlang der jeweils belichteten Spur wird die Streckenenergie

$$E_S = \frac{P_L}{v_s} \quad (2.1)$$

eingbracht. Durch die absorbierte Energie wird das Metallpulver lokal erwärmt und bei entsprechender Bestrahlungsstärke durch das Überschreiten der Schmelztemperatur des Pulverwerkstoffs vollständig aufgeschmolzen. Die dafür notwendige mittlere Intensität I ergibt sich aus der Laserleistung P_L und dem Durchmesser des Laserstrahls d_L zu

$$I = \frac{4 \cdot P_L}{\pi \cdot d_L^2} \quad (2.2)$$

Ein weiterer Intensitätsanstieg in der Wechselwirkungszone, z. B. durch eine Erhöhung der Laserleistung P_L bei gleichbleibendem Laserstrahldurchmesser d_L , geht bei konstanter Belichtungsgeschwindigkeit v_s mit einem Anstieg der Streckenenergie E_S einher. Dies führt zu einer Verdampfung des Pulverwerkstoffs, in deren Folge eine vermehrte Entstehung von Spritzern zu beobachten ist [Mei99]. Darüber hinaus ist die Bildung eines für das Laserstrahl-tiefschweißen charakteristischen Keyholes möglich [Gon14, Kin14].

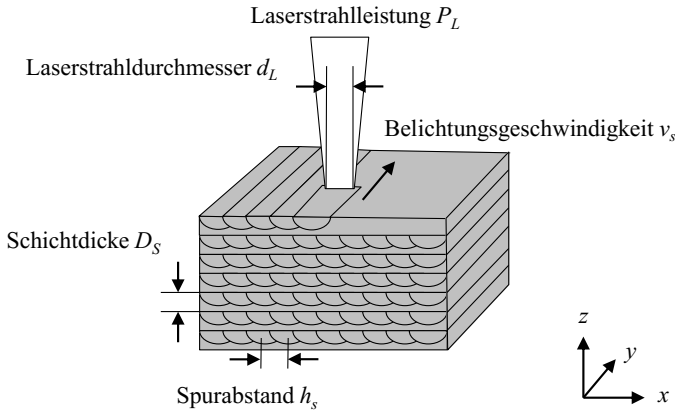


Abbildung 2.4: Wirkprinzip der laseradditiven Fertigung nach [Ove03]

Die Ausdehnung einer aufgeschmolzenen Spur wird durch den Laserstrahldurchmesser d_L und den Durchmesser der sich um den Laserstrahl ausbildenden Erstarrungszone bestimmt [Mei99]. Entsprechend einer festgelegten zeitlichen und örtlichen Abfolge, der sogenannten Belichtungsstrategie, werden die einzelnen Schmelzspuren einander überlappend mit dem Spurb Abstand h_s und der zum Schmelzen notwendigen Flächenenergie

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

aneinandergesetzt. Dabei gilt zum Erreichen eines optimalen Überlappungsgrads der Spuren nach Meiners [Mei99] der empirisch ermittelte Zusammenhang

$$h_s = 0,7 \cdot d_L. \quad (2.4)$$

Die an den Grenzflächen der Metallpulverschicht und die im sich ausbildenden Schmelzbad absorbierte Volumenenergie

$$E_V = \frac{P_L}{v_s \cdot h_s \cdot D_s} \quad (2.5)$$

führt nicht nur zum Schmelzen der gesamten belichteten Pulverschicht, sondern gelangt weiterhin durch Wärmeleitung in die daran angrenzenden Bereiche. Erstarrt die Schmelze schließlich, bildet sich zwischen den einzelnen Schmelzspuren und der bereits verfestigten, nächst unteren Schicht ein schmelzmetallurgischer Zusammenhalt [Pop05].

Das während der Belichtungszeit aufgeschmolzene Gesamtvolumen wird durch den Quotienten der Gleichung (2.5), die sogenannte Volumenaufbaurrate

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = v_s \cdot h_s \cdot D_s, \quad (2.6)$$

beschrieben. Die Volumenaufbaurrate \dot{V} , die zumeist zur Abschätzung der Fertigungszeit herangezogen wird, ist weiterhin von der eingesetzten Fertigungsanlage und deren maschinenspezifischen Einstellungen (Scanner- und Laser-Delays, Belichtungsgeschwindigkeit der Innen- und Außenkonturen etc.) und dem verwendeten Metallpulver abhängig. Für die gesamte Fertigungszeit muss außerdem die Beschichtungszeit, die zum Auftrag der einzelnen Pulverschichten benötigt wird, berücksichtigt werden. Typische Volumenaufbauraten liegen gegenwärtig je nach gewählter Fertigungsanlage, eingesetztem Pulverwerkstoff und zu fertigender Bauteilgeometrie zwischen $2 \text{ cm}^3/\text{h}$ [Con17d] und $105 \text{ cm}^3/\text{h}$ [SLM17c].

2.1.3 Produktivität und Qualitätsmerkmale

Die Prozesskenngrößen Streckenenergie E_S , Flächenenergie E_F und Volumenenergie E_V sowie die Laserstrahlintensität I und die Volumenaufbaurrate \dot{V} leiten sich aus den grundlegenden Prozessparametern Laserleistung P_L , Belichtungsgeschwindigkeit v_s , Spurabstand h_s , Laserstrahldurchmesser d_L und Schichtdicke D_s ab. Diese Kenngrößen und die letztgenannten Parameter beeinflussen neben über 130 weiteren Größen den laseradditiven Fertigungsprozess, dessen Produktivität und das Prozessergebnis [Reh05, Reh10, Eis10, Seh10, Skr10].

Die Produktivität bemisst sich nach dem Verhältnis zwischen dem umgeschmolzenen Volumen und der Anzahl der über die gesamte Bauteilhöhe belichteten Schichtflächen (Output) zur gesamten Fertigungszeit (Input). In zurzeit kommerziell verfügbaren Fertigungsanlagen wird diese Produktivität im Wesentlichen durch die eingesetzten Belichtungssysteme und die seriell ablaufenden Vorgänge des Auftrags und der Belichtung der einzelnen Pulverschichten eingeschränkt. Es wird allerdings eine Erhöhung der Produktivität durch eine Reduzierung der Fertigungszeit angestrebt [Wis15].

Zum einen kommt der Volumenaufbaurrate \dot{V} eine zentrale Bedeutung zu [Sch12]. Aufgrund des beschriebenen physikalischen Wirkprinzips und der erläuterten Wechselbeziehungen der einzelnen Prozessparameter sind der Steigerung der Volumenaufbaurrate durch eine Steigerung der Belichtungsgeschwindigkeit, durch eine Vergrößerung des Spurabstandes, durch eine Anhebung der Schichtdicke und durch eine notwendigerweise damit einhergehende Erhöhung der Laserleistung Grenzen gesetzt. Innerhalb dieser Grenzen ermöglichen sowohl der Einsatz eines Multilaser-Systems als auch die Verwendung des Hülle-Kern-Prinzips eine Verringerung der benötigten Fertigungszeit durch eine Reduzierung der volumenbezogenen Belichtungszeit [Con17d, Sch12, SLM17c, Wie14]. Bei einem Multilaser-System wird eine Reduktion der Belichtungszeit durch den Einsatz von mehreren gleichzeitig arbeitenden Single Mode 200 W-, 400 W-, 700 W- oder 1 kW-Faserlasern erreicht [Con17d, SLM17c, Wie14]. Das Hülle-Kern-Prinzip setzt eine Aufteilung der Geometrie in einen Innenbereich (Kern) und einen diesen umgebenden Außenbereich (Hülle) voraus. Während die Hülle in jeder Schicht belichtet wird, wird das im Kern befindliche Metallpulver entsprechend einem Vielfachen der Schichtdicke aufgeschmolzen, sodass sich die insgesamt zum schichtweisen Aufbau benötigte Belichtungszeit reduziert [She04]. Eine zusätzliche Verringerung der Belichtungszeit wird durch eine Erhöhung der Laserleistung bei einer gleichzeitigen Steigerung der Belichtungsgeschwindigkeit erreicht. Um dabei einen Intensitätsanstieg

in der Wechselwirkungszone zu vermeiden, wird der Laserstrahldurchmesser vergrößert und damit ebenfalls der Spurbstand erhöht [Buc11, Bre12, Sch12]. Durch den Einsatz eines modulierten 1 kW-Faserlasers mit einem Top Hat Profil ($M^2 = 10$) wird durch das größer werdende Schmelzbad ein vollständiges Aufschmelzen im Überlappungsbereich der einzelnen Spuren gewährleistet [Sch12, Sch15a]. Da jedoch die zunehmende Schmelzbadgröße zu einer Beeinträchtigung der Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit bzw. Formgenauigkeit der laseradditiv gefertigten Bauteile führt, wird zur Belichtung der Hülle ein 400 W-Faserlaser mit einer gaußförmigen Intensitätsverteilung eingesetzt [Mei99, Reh10, Sch12, Sch15a].

Zum anderen ist eine Optimierung des Pulverauftrags von Interesse, die zu einer Verkürzung der Beschichtungszeit und somit zu einer Reduzierung der Nebenzeiten beiträgt. Einerseits kann die Bewegung der Beschichtereinheit beschleunigt werden, indem der Beschichter nach unidirektionalem Pulverauftrag auf dem Baufeld in eine schräge Stellung gebracht wird, um mit erhöhter Geschwindigkeit in die Ausgangsposition zurückzukehren [Tru15]. Andererseits können die Beschichtung und das Aufschmelzen des Metallpulvers in einem kontinuierlichen Prozess simultan geschehen, indem in einem einseitig geschlossenen Hohlzylinder bei gleichzeitiger Belichtung eine rotatorische Relativbewegung zwischen der Bauplattform, dem Pulverbehälter und dem Beschichter erfolgt, die zum Auftrag einer gleichmäßigen Pulverschicht führt [Dei14].

Das Prozessergebnis in Form des laseradditiv gefertigten Bauteils lässt sich neben der Oberflächengüte und der Maßhaltigkeit durch weitere Qualitätsmerkmale beschreiben, zu denen die Dichte ρ_s und die Porosität ϕ , die mechanischen Eigenschaften und die Eigenspannungen zählen [Reh10, Mun13]. In der laseradditiven Fertigung ist es das übergeordnete Ziel, porenfreie Metallbauteile mit einer relativen Dichte d_s von nahezu 100 % herzustellen, die hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften Normvorgaben für z. B. Guss-, Walz- oder Schmiedematerial erfüllen. Dazu muss prinzipiell in der Wechselwirkungszone ein stabiles, geschlossenes Schmelzbad erzeugt werden, welches sich aufgrund des Fließ- und Benetzungsverhaltens der Schmelze in ausreichendem Maße ausdehnt, um zwischen den Spuren und Schichten eine schmelzmetallurgische Verbindung zu schaffen [Mei99]. Instabilitäten des laseradditiven Fertigungsprozesses durch ein unterbrochenes Schmelzbad aufgrund zu geringer Energieeinbringung oder durch einen Anstieg der Intensität in der Wechselwirkungszone und damit verbundener Spritzerbildung können eine Porosität der Bauteile zur Folge haben [Thi10, Vil11]. Poren wirken sich als Defekte im Gefüge negativ auf die Härte der Bauteile aus, begünstigen die Rissbildung und -ausbreitung und setzen somit die statischen und vor allem die dynamischen Festigkeitskennwerte der Bauteile herab [Carl16, Mas16, Reh05, Reh10, Wyc14].

Für das statische und dynamische Festigkeitsverhalten der Bauteile ist zudem das im laseradditiven Fertigungsprozess erzeugte Gefüge ausschlaggebend. Während der Bauteilherstellung folgt einer raschen, lokalen Erhitzung des Metallpulvers über die Schmelztemperatur das Abkühlen des schmelzflüssigen Werkstoffs innerhalb eines sehr kurzen Zeitintervalls mit einer hohen Geschwindigkeit und Abkühlraten von $> 10^6$ K/s [Ove03]. Bereits erstarrte Bereiche werden anschließend aufgrund des Fügens der einzelnen aufeinanderfolgenden Schichten erneut erwärmt und somit abermals thermisch beeinflusst. Unter diesen Bedingungen entstehen vornehmlich Nichtgleichgewichtsphasen und ein metastabiles Gefüge, welches im Vergleich zu einem Gussgefüge über sehr feine Körner verfügt [Gu12, Her16]. Laseradditiv gefertigte Metallbauteile weisen im

Allgemeinen Festigkeitseigenschaften auf, die oftmals bereits im Herstellungszustand den normativ geforderten Kennwerten von im Guss-, Walz- oder Schmiedeprozess hergestellten Bauteilen entsprechen bzw. diese übersteigen [Car16, Man14, Pra14, Rie14, Sch11]. Insbesondere bei der Verarbeitung von Titan und Titanlegierungen ist jedoch die im laseradditiven Fertigungsprozess erzielbare Bruchdehnung der Bauteile vergleichsweise geringer [Fac10, Vil11]. Durch eine anschließende Wärmebehandlung lassen sich die Festigkeitseigenschaften allerdings nachträglich beeinflussen und verändern [LeB15, Vil11, Wyc15]. Eine Anisotropie sowohl des Gefüges als auch der Festigkeitseigenschaften, die sich bei einigen laseradditiv gefertigten Bauteilen beobachten lässt, ist auf die schichtweise Fertigung in einem Pulverbett und die damit verbundene höhere Wärmeleitung in Aufbaurichtung zurückzuführen [Thi10, Thi13].

Auf die Dauerfestigkeit der im laseradditiven Fertigungsprozess hergestellten Bauteile wirken sich neben dem Gefüge auch die zuvor genannten Defekte im Bauteilinneren sowie die prozessbedingten rauen Oberflächen aus. Durch den schichtweisen Aufbau lässt sich an Flächen mit einem Neigungswinkel der sogenannte Treppenstufeneffekt beobachten. Dieser beeinträchtigt zusätzlich zu an der Oberfläche anhaftendem Metallpulver die Oberflächengüte [Mei99, Reh05]. Diese hohe Oberflächenrauheit, die im Herstellungszustand in etwa mit einer gemittelten Rautiefe R_z von $> 100 \mu\text{m}$ beziffert werden kann, führt zu Spannungskonzentrationen an der Bauteiloberfläche und damit zu einem vorzeitigen Versagen der Bauteile bei Dauerbeanspruchung [Bra10, Buc13, Wyc14]. Durch eine mechanische Oberflächenbehandlung, beispielsweise durch Reinigungsstrahlen, Kugelstrahlen oder Polieren, werden sowohl die Oberflächengüte als auch das Ermüdungsverhalten verbessert [Wyc12, Wyc13]. Eine nachträgliche Verdichtung laseradditiv gefertigter Bauteile durch heißisostatisches Pressen hat das Schließen von Poren und Fehlstellen im Bauteilinneren zur Folge, was ebenfalls in einer höheren Dauerfestigkeit resultiert [Bra10, Leu13, Wyc15].

Die den Treppenstufeneffekt an gekrümmten Flächen verursachende begrenzte Schichtdicke D_s beeinflusst die minimale Auflösung, die erreichbare Maßhaltigkeit und die realisierbare Formgenauigkeit. Auch sind die Maß- und Formgenauigkeit der Bauteile von der eingesetzten Anlagentechnik, vor allem von der Positionier- und Wiederholgenauigkeit des Ablenksystems und den optischen Komponenten, abhängig, außerdem von einer Schrumpfung der Bauteile sowie deren Verformung infolge von thermisch-induzierten Eigenspannungen [Mei99, Ove03, Reh10].

Eigenspannungen entstehen im laseradditiven Fertigungsprozess durch das Zusammenspiel verschiedener spannungsinduzierender Mechanismen, wie dem Temperaturgradient-Mechanismus und einer abkühlungsbedingten Bauteilschrumpfung. Dadurch bilden sich Zug- bzw. Druckspannungen in den einzelnen Bauteilschichten aus [Mei99, Mun13, Vol96]. Erfolgt ein Abbau dieser Spannungen durch plastisches Fließen, resultiert daraus ein Verzug während oder nach dem Fertigungsprozess. Die Folgen können sowohl Prozessinstabilitäten als auch Verformungen oder Risse an Bauteilen sein. Zur Reduktion der thermisch-induzierten Eigenspannungen können angepasste Belichtungsstrategien eingesetzt, höhere Schichtdicken verwendet und integrierte Vorheizungen der Bauplattform bis zu Temperaturen von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ oder $550 \text{ }^\circ\text{C}$ [Mos17] genutzt werden [Mun13]. Diese Maßnahmen führen zu einer Verringerung der auftretenden Temperaturgradienten und verhindern somit Bauteildefekte und -verzug [Kem13].

2.2 Eigenschaften von Metallpulvern

In der laseradditiven Fertigung werden Metallpulver verschiedener Legierungen als Ausgangsmaterialien eingesetzt. Bei Pulverwerkstoffen handelt es sich im Allgemeinen um sogenannte disperse Stoffsysteme [Sti09]. In diesem zweiphasigen System bilden die einzelnen Metallpulverpartikel des Kollektivs die disperse Phase, während das die Partikel umgebende Gas die kontinuierliche Phase darstellt.

In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften weisen Pulverwerkstoffe gegenüber Festkörpern und Fluiden ein grundsätzlich anderes Verhalten auf. Dieses wird aus dem in Abbildung 2.5 skizzierten Neigungsversuch eines Behälters deutlich. Während ein freistehender Festkörper die Form beibehält und ein Gas oder eine Flüssigkeit sich der Geometrie des umgebenden Raumes anpassen, nimmt ein Pulverwerkstoff eine Zwischenstellung ein.

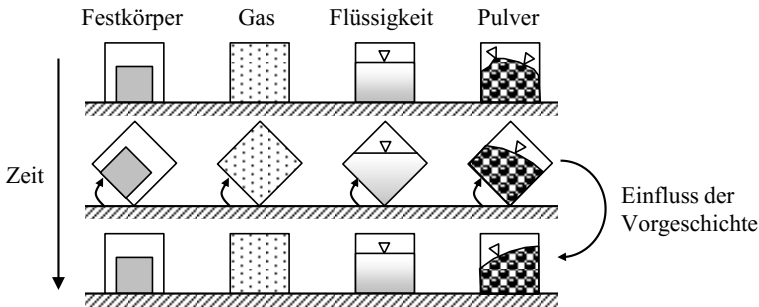


Abbildung 2.5: Neigung eines Behälters zum Vergleich von Pulverwerkstoff zu Festkörper, Gas und Flüssigkeit nach [Kal02, Tom03]

In Abhängigkeit von der Beanspruchungsvorgeschichte stellen sich die Spannungsverhältnisse eines Pulvers ein, sodass sich verschiedene Formen der Oberfläche des dispersen Partikelsystems ausbilden können [Kac09, Sch03a, Tom09]. Neben den mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich die physikalischen Eigenschaften, wie das Absorptionsverhalten, die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität und auch die elektrische Leitfähigkeit von Metallpulvern, von denen der Festkörper, Flüssigkeiten und Gase.

2.2.1 Grundlegende charakteristische Eigenschaften

Die Verarbeitbarkeit eines Pulverwerkstoffs ist von dessen Verhalten abhängig. Dieses ergibt sich aus den Wechselwirkungen einer Vielzahl von einzelnen Pulverpartikeln mit unterschiedlichen Eigenschaften. Wesentliche Informationen über das für den laseradditiven Fertigungsprozess vorliegende Partikelkollektiv liefern die nachfolgend beschriebenen charakteristischen Eigenschaften eines Metallpulvers.

2.2.1.1 Partikelform

Die Partikelform dient der Beschreibung der Morphologie einzelner Partikel des Kollektivs und reicht von nadelförmigen, dendritischen, unregelmäßig geformten und spratzierten Partikeln bis hin zu Pulverpartikeln mit nahezu idealer Kugelgestalt. Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über verschiedene Formen von Partikeln eines Pulverwerkstoffs.

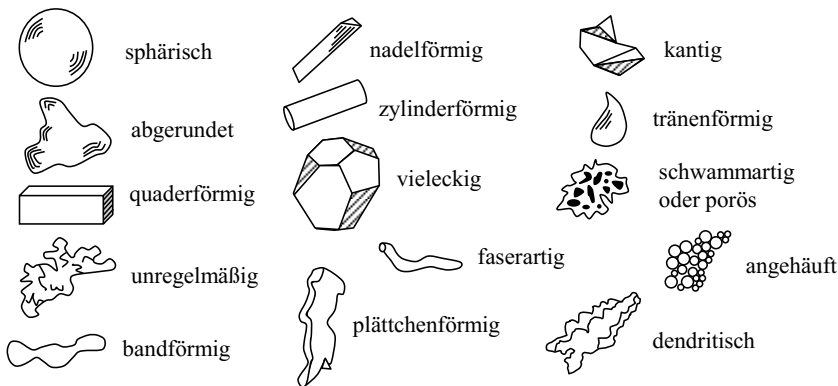


Abbildung 2.6: Unterschiedliche Partikelformen eines Pulvers nach [Ger94]

Zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Partikelformen eines Pulvers werden Formfaktoren angeführt. Ein Formfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis zweier geometrischer Größen eines Einzelpartikels [Rum75, Sti09]. In diesem Zusammenhang ist die Sphärizität ψ von besonderer Bedeutung. Für die Sphärizität nach Wadell ψ_w gilt

$$\psi_w = \frac{\text{Oberfläche einer volumengleichen Kugel}}{\text{tatsächliche Oberfläche des Partikels}} \leq 1 \quad [\text{Sti09}]. \quad (2.7)$$

Je größer der errechnete Wert für die Sphärizität ψ_w ist, desto regelmäßiger ist die Form des Partikels.

Um im laseradditiven Fertigungsprozess einen möglichst homogenen Auftrag der einzelnen Schichten zu erreichen, wird ein Metallpulver mit regelmäßig geformten Partikeln bevorzugt. Der Einsatz eines Pulvers mit sphärischen Partikeln führt zu gleichmäßigeren Pulverschichten und resultiert in Bauteilen mit hoher relativer Dichte und guten Druckfestigkeitseigenschaften [Att15]. Die Verwendung von Pulverwerkstoffen mit unregelmäßig geformten Partikeln ist hingegen nicht erstrebenswert [Sch14]. Pulverpartikel mit einer von der Kugelgestalt abweichenden Form können den Pulverauftrag verschlechtern und das Schmelzverhalten beeinträchtigen, wodurch in Folge Bauteile mit einer geringeren relativen Dichte entstehen können [Ola13].

2.2.1.2 Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung

Metallpulver werden auch durch die Größe der einzelnen Pulverpartikel und deren Verteilung im Partikelkollektiv charakterisiert. Die Partikelgröße x , die üblicherweise in Form eines Längenmaßes, z. B. als statistische Länge oder als Äquivalentdurchmesser, angegeben wird, beeinflusst insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Pulvers [Bei13, Sch03a].

Der statistische Durchmesser nach Feret stellt ein Merkmal dar, das häufig bei bildgebenden Verfahren zur Bestimmung der Partikelgröße zugrunde gelegt wird. Der Feretdurchmesser ist von der Orientierung des Partikels abhängig und gibt den Abstand zwischen zwei an die Kontur des Partikels angelegten, parallelen Tangenten an [Sch03a].

Aufschluss über die Abmessungen von unregelmäßig geformten Partikeln gibt der geometrische Äquivalentdurchmesser [Sch03a]. Dieser ist definiert als derjenige Kugel-