



HERBERT UTZ VERLAG WISSENSCHAFT

FORSCHUNGSBERICHTE

325

Harald Krauss

**Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch
schichtweise thermografische In-Process-Überwachung**

Harald Krauss

**Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen
durch schichtweise thermografische In-Process-
Überwachung**

Herbert Utz Verlag · München 2017

Forschungsberichte IWB
Band 325

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7293-6 Version: 1 vom 21.03.2017
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4628-9
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für

Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch
schichtweise thermografische In-Process-Überwachung**

**Dipl.-Phys.
Harald Krauss**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Wolfgang Polifke, Ph.D.

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Die Dissertation wurde am 30.03.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 31.08.2016 angenommen.

Harald Krauss

**Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen
durch schichtweise thermografische
In-Process-Überwachung**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 325

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2016

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2017

ISBN 978-3-8316-4628-9

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern des Institutes, für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferates und die stets fruchtbaren Diskussionen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Institutskolleginnen und -kollegen für die inhaltliche Unterstützung und die sehr angenehme Zusammenarbeit. Die freundschaftliche Atmosphäre und die gegenseitige Hilfsbereitschaft wird in positiver Erinnerung bleiben.

Bei meiner Familie bedanke ich mich für den Rückhalt und das Verständnis, das mir fortwährend entgegengebracht wurde. Meiner Frau Heike danke ich schließlich für die Geduld, den Freiraum und die bedingungslose und liebevolle Unterstützung.

Für Tim Johann

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
Verzeichnis der Formelzeichen	vii
1 Einleitung	1
1.1 Additive Fertigung im produktionstechnischen Umfeld	1
1.2 Ausgangssituation und Motivation	3
1.3 Handlungsbedarf und Zielsetzung	4
2 Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1 Überblick	7
2.2 Grundlagen des Laserstrahlschmelzens	7
2.2.1 Verfahrensprinzip	7
2.2.2 Prozesskette und Einflussgrößen	8
2.2.3 Strahl-Stoff-Wechselwirkungen	10
2.2.4 Schichtverfestigung und Wärmehaushalt	14
2.3 Materialeigenschaften beim Laserstrahlschmelzen	18
2.3.1 Grundlegende Eigenschaften	18
2.3.2 Gefügeausbildung	19
2.3.3 Werkstoff Iconel 718	20
2.4 Qualitätssicherung und Prozessüberwachung	24
2.4.1 Grundlegendes	24
2.4.2 Qualitätssicherung im Fertigungsprozess	25
2.4.3 Qualitätssicherung in der additiven Fertigung	28
2.4.4 Grundlagen der Prozessüberwachung	30
2.5 In-Process-Überwachung	34
2.5.1 Prozessüberwachung in Laserfertigungsprozessen	35
2.5.2 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschmelzen	37
2.5.3 Zwischenfazit	43
2.6 Grundlagen der berührungslosen Infrarot-Thermografie	44
2.6.1 Strahlungsemission	44
2.6.2 Strahlungstransport	47
2.6.3 Thermografische Messung	49
2.6.4 Detektoren	53
2.7 Schlussfolgerungen aus den Betrachtungen zum Stand der Wissenschaft und Technik	57
3 Vorgehensweise	59
3.1 Überblick	59
3.2 Thermografische In-Process-Überwachung	59
3.3 Vorgehen	60

4	Analyse des Laserstrahlschmelzprozesses	63
4.1	Überblick	63
4.2	Prozess- und Systemgrundlagen	63
4.2.1	Allgemeine Systemteilung	63
4.2.2	Prozesssteuerung und Einflussgrößen	65
4.3	Analyse von Einflussgrößen	67
4.3.1	Versuchsumgebung	67
4.3.2	Versuchsplanung und Zielgrößen	68
4.3.3	Systematische Einflüsse auf das Prozessergebnis	72
4.3.4	Geometriebedingte Einflüsse auf das Prozessergebnis	79
4.3.5	Störgrößen und zufällige Einflüsse	85
4.4	Einteilung von Fehlern und Unregelmäßigkeiten	87
4.5	Zusammenfassung	89
5	Abkühlverhalten und Materialeigenschaften	91
5.1	Überblick	91
5.2	Modellbildung zur Temperaturentwicklung beim SLM	91
5.2.1	Grundlagen aus der Lasermaterialbearbeitung	91
5.2.2	Temperaturmodelle für die Hatch-Verfestigung	94
5.2.3	Temperaturmodell für den Schichtauftrag	101
5.3	Materialeigenschaften und thermische Zyklierung	105
5.3.1	Abkühlverhalten	105
5.3.2	Hatch-Zyklierung	106
5.3.3	Scanfeldzyklierung	110
5.3.4	Schichtzyklierung	110
5.4	Wärmeabfuhr und Wärmehaushalt	112
5.4.1	Einfluss von Überhängen	112
5.4.2	Einfluss von porösem Grundmaterial	114
5.4.3	Eigenspannungen und Verzug	117
5.4.4	Schichtenanbindung	119
5.5	Zusammenfassung	120
6	Thermografische In-Process-Überwachung	123
6.1	Überblick	123
6.2	Methode	123
6.2.1	Aufbau der Methode	123
6.2.2	Datenverarbeitung und schichtweise Merkmalsextraktion	124
6.2.3	Indikatorbewertung und -reduktion	128
6.2.4	Anwendung und Klassifikation	130
6.3	Bildung von Indikatoren	133
6.3.1	Einteilung	133
6.3.2	Indikatoren für die Verfestigung	134
6.3.3	Indikatoren für den Schichtauftrag	141
6.4	Indikatoranalyse	144

6.4.1 Schichtweise Überwachung - globale Unregelmäßigkeiten	144
6.4.2 Schichtaufgelöste Überwachung - lokale Unregelmäßigkeiten	149
6.5 Kennzahlensystem und Qualitätsbewertung	153
6.5.1 Priorisierung von Indikatoren	153
6.5.2 Indikation der Bauteilqualität	155
6.5.3 Schichtübergreifende Überwachung	157
6.5.4 Vergleichbarkeit von Prozessen	159
6.6 Anwendungsbeispiele	161
6.6.1 Delamination	161
6.6.2 Fehlerhafte Supportanbindung	163
6.7 Zusammenfassung	165
7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	167
7.1 Überblick	167
7.2 Wirtschaftliche Potenziale	167
7.3 Kostenbetrachtung	168
8 Schlussbetrachtung	173
8.1 Zusammenfassung	173
8.2 Ausblick	174
Literaturverzeichnis	177
Anhang	213
A.1 Prozessanalyse	213
A.1.1 Gut-Schlecht-Vergleich zur Identifikation von Haupteinflussgrößen	213
A.1.2 Realbauteil zur Untersuchung der Maßhaltigkeit	213
A.1.3 Versuchsplanung zur Prozessanalyse und -optimierung	214
A.1.4 Regressionsanalyse	216
A.1.5 Strahlprofil der Versuchsanlage	216
A.2 Thermografische Messung beim Laserstrahlschmelzen	217
A.2.1 Off-Axis-Integration	217
A.2.2 Ortsauflösung	224
A.2.3 Zeitauflösung	227
A.2.4 Temperaturbestimmung beim Strahlschmelzen	230
A.2.5 Zusammenfassung	245
A.3 Modellbildung	245
A.3.1 Oberflächenwärmequelle	245
A.3.2 Abkühlverhalten im Modell der Linienwärmequelle	247
A.3.3 Erwärmungsverhalten beim Schichtauftrag	251
A.4 Wärmehaushalt	254
A.4.1 Einfluss umgebender Wärmekapazitäten	254
A.4.2 Einfluss der Bauhöhe	255

Inhaltsverzeichnis

A.5 Prozessüberwachung	257
A.5.1 Detektionsgrenze	257
A.5.2 Indikatorkorrelationen	258
A.5.3 Software zur Prozessüberwachung	260
Quellen für den Anhang	265
Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten	269
Verzeichnis der eigenen Arbeiten	271

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CCD	<i>Charge-coupled Device</i>
CDPM	<i>Cool-down Phase Model</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
DT	Differenztransformation
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
ESF	<i>Edge Spread Function</i>
ESP	Eigenspannungen
FFA	Fehlerflächenanteil
FOV	<i>Field of View</i>
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
FPGA	<i>Field-programmable Gate Array</i>
HIP	Heißisostatisches Pressen
IFA	Indikator Flächenabweichung
IFB	Indikator Fehlerfläche Schichtauftrag im Bauteilbereich
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IFP	Indikator Fehlerfläche Schichtauftrag im Pulverbettbereich
IIN	Indikator Zeitintegral
IMA	Indikator Maximaltemperatur
IR	Infrarot
ISA	Indikator Spritzeraktivität
ISB	Indikator Spritzerbelegung
ISD	Indikator lokale Schichtdicke
ITL	Indikator effektive Temperaturleitfähigkeit
IVF	Indikator verfestigte Fläche
IWA	Indikator Fläche Wärmeeinflussbereich
IWH	Indikator <i>Hu</i> -Momente Wärmeeinflussbereich
IWI	Indikator Integral Wärmeeinflussbereich
IWU	Indikator Umfang Wärmeeinflussbereich
IWW	Indikator Aspektverhältnis Wärmeeinflussbereich
IZU	Indikator Zeit über Schwellwert

Abkürzungsverzeichnis

LED	<i>Light-emitting Diode</i>
LWIR	<i>Long-wavelength Infrared</i>
MTF	<i>Modulation Transfer Function</i>
NEP	<i>Noise-equivalent Power</i>
NETD	<i>Noise-equivalent Temperature Difference</i>
NIR	nahes Infrarot
NUC	<i>Non-uniformity Correction</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OEG	obere Eingriffsgrenze
OGW	oberer Grenzwert
OWG	obere Warngrenze
PID	<i>Proportional-integral-derivative</i>
POD	<i>Probability of Detection</i>
PSF	Punktspreizfunktion
QM	Qualitätsmanagement
SAA	schichtaufgelöste Auswertung
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SNR	<i>Signal-to-noise Ratio</i>
SPC	<i>Statistical Process Control</i>
SRF	<i>Slit Response Function</i>
SVM	statistische Versuchsmethodik
SWA	schichtweise Auswertung
TGM	Temperaturgradientenmechanismus
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UEG	untere Eingriffsgrenze
UGW	unterer Grenzwert
UWG	untere Warngrenze
UV	ultravioletter Wellenlängenbereich
VIS	sichtbarer (engl. <i>visible</i>) Wellenlängenbereich
WEB	Wärmeeinflussbereich
WEZ	Wärmeeinflusszone
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Oberfläche
A_D	m^2	Detektorfläche
A_{zug}	–	Bruchdehnung
B	–	Einzelbild (Pixelmenge)
C	–	Bauteilbereich im Einzelbild (Pixelmenge)
C_{pk}	–	Prozessfähigkeitsindex
C_{th}	J/K	Wärmekapazität
D^*	$cm\sqrt{Hz}/W$	Spezifische Detektivität
D_E	m	Eintrittspupillendurchmesser
E	J	Energie
E_{zug}	N/m^2	Elastizitätsmodul
F_{ij}	–	Sichtfaktor
G_R	$(m^3 \cdot s)^{-1}$	Generationsrate der Ladungsträger
G_a	K/m	Temperaturgradient bei der Abkühlung
G_{th}	W/K	Thermischer Leitwert
$I(\Theta)$	W/sr	Strahlstärke
I_i	–	Indikator i
K_Q	–	Gemittelte Qualitätskennzahl einer Schicht
K_f	–	Prioritätswert für Fehlerbild f
$L(\lambda, T, \Theta)$	W/(sr · m ²)	Spektrale Strahllichte
L_B	W/(sr · m ²)	Strahllichte eines Schwarzen Strahlers
M	W/(m ² · m)	Spektrale spezifische Ausstrahlung
M_S^*	–	Element im Schichtmerkmalsraum
M_S	–	Element im akkumulierten Schichtmerkmalsraum
$M_{BB}(T)$	W/m ²	Spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers
$M_{BB}(\lambda, T)$	W/(m ² · m)	Spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers
P	W	Leistung der Wärmequelle
$\dot{Q}_{P,WL}$	W	Wärmeleitung im Pulverbett
$\dot{Q}_{F,WL}$	W	Wärmeleitung im Festkörper
$\dot{Q}_{S,WL}$	W	Wärmeleitung im Schmelzbad
$\dot{Q}_{S,K}$	W	Konvektion im Schmelzbad
R_a	μm	Mittlere Oberflächenrauheit
$R_{p0,2}$	N/m^2	Streckgrenze
R_D	V/W	Empfindlichkeit Detektor
R_R	$(m^3 \cdot s)^{-1}$	Rekombinationsrate der Ladungsträger
S_1	K/s	Schwelle zur Bestimmung bewegter Partikel

Verzeichnis der Formelzeichen

S_2	K/m ²	Schwelle zur Bestimmung liegender Partikel
S^*	K/m ²	Adaptiver Schwellwert
T	K	Temperatur
T_A	K	Atmosphärentemperatur
T_D	K	Temperaturunterschied zwischen Festmaterial und Pulver
T_M	K	Gemessene Temperatur
T_O	K	Objekttemperatur
T_S	K	Schwellentemperatur
T_U	K	Umgebungstemperatur
T_W	K	Temperatur Sichtfenster
T_a	K	Außentemperatur Baukammer
T_d	K	Temperatur Detektor
T_i	K	Innentemperatur Baukammer
U_n	V	Signalspannung
U_s	V	Rauschspannung

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit Festkörper
\hat{a}_d	–	Entscheidungsschwellwert für POD-Analyse
a_h	m	Hatch-Abstand
\hat{a}_i	–	Gewichtungsfaktor Signalqualität Indikator i
a_p	m ² /s	Temperaturleitfähigkeit Pulver
\hat{b}_{iq}	–	Normierte Detektionsgrenze Indikator i , Qualitätsmerkmal q
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
\hat{c}_{iq}	–	Gewichtungsfaktor Korrelation Indikator i , Qualitätsmerkmal q
c_p	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität
cc_x, cc_y	px	Position Bildhauptpunkt
d	m	Strahldurchmesser in der Bearbeitungsebene
d_D	m	Detektordicke
d_l	m	Schichtdicke
d_s	m	Schmelzbadtiefe
d_u	m	Scanfeldüberlapp
$\text{erf}(x)$	–	Fehlerfunktion
f	Hz	Frequenz
f_B	Hz	Sampling- bzw. Bildrate

f_{Hatch}	Hz	Hatch-Frequenz
f_{cx}, f_{cy}	px	Fokuslage in x- und y-Richtung
h	px	Bildhöhe
h_p	Js	Planck'sches Wirkungsquantum
k^*	–	Korrekturfaktor Hatch-Belichtung
k_B	J/K	Boltzmann-Konstante
k_D	–	Blendenzahl
$k_{c1} - k_{c5}$	–	Radial- und Tangentialkomponenten im Verzeichnungsmodell
l	m	Effektive Tiefe des Energieeintrages
l_h	m	Hatch-Länge bzw. Streifenbreite bei Streifenbelichtung
m	kg	Masse
\vec{m}_B	–	Merkmalsvektor
q	$K \cdot m^3/s$	Temperaturleitung einer Punktquelle
\hat{q}_q	–	Gewichtung Qualitätsmerkmal q
r_g	m	Strahlradius einer Gauß-Quelle
r_{ij}	m	Abstand zweier Flächenelemente i und j
s	m	Entfernung
t_A	s	Verfestigungszeit Flächenelement A
t_O	s	Zeit über Schwellentemperatur
t_s	s	Samplingzeit
v	m/s	Scangeschwindigkeit des Lasers
v_t	m/s	Transversale Scangeschwindigkeit des Lasers
v_a	K/s	Abkühlrate
v_x	m/s	Geschwindigkeit Punktquelle in x-Richtung
w	px	Bildbreite

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	–	Absorptionsgrad
α_B	°	Aufbauwinkel
α_c	–	Scherungsfaktor
β	°	Streifenwinkel
β_a	°	Abbildungsmaßstab
β_b	°	Beschichtungswinkel
β_p	°	Pupillenmaßstab
Δt	m	Zeitauflösung
Δx	m	Ortsauflösung

Verzeichnis der Formelzeichen

Δz	m	Fokuslagenverschiebung
ϵ	–	Emissionsgrad / Emissivität
ϵ_{pl}	–	plastische Dehnung
ϵ_{th}	–	thermische Dehnung
$\Theta(x)$	–	Heaviside-Funktion
Θ_0	°	Off-Axis-Winkel der Beobachtung
θ	°	Polarwinkel
κ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
κ_p	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit Pulver
κ_λ	1/m	Dämpfungsfaktor
λ	m	Wellenlänge
ρ	–	Reflexionsgrad
σ_B	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante
ρ_m	g/cm ³	Materialdichte
σ	N/mm ²	Spannung
σ_y	N/mm ²	Streckgrenze
τ	–	Transmissionsgrad
τ_A	–	Transmissionsgrad Atmosphäre
τ_{opt}	–	Transmissionsgrad Kameraoptik
τ_{th}	–	Thermische Zeitkonstante
τ_w	–	Transmissionsgrad Sichtfenster
Φ	W/m ²	Strahlungsleistung / Strahlungsfluss / Bestrahlungsstärke
Φ_A	W	Absorbierte Laserleistung
Φ_B	W/m ²	Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers
Φ_{B^*}	W/m ²	Strahlungsleistung in einem eingegrenzten Wellenlängenbereich
$\Phi_{P,S}$	W	Strahlungsaustausch im Pulverbett
Φ_R	W	Reflektierte Laserleistung
$\Phi_{S,S}$	W	Strahlungsverluste an der Schmelzbad- bzw. Festkörperoberfläche
$\Phi_{\alpha,\rho,\tau}$	W	Absorbierte, reflektierte, transmittierte Strahlung
Φ_ϵ	W	Eigenstrahlung Objekt
ϕ	°	Anzimitwinkel
Ω	sr	Raumwinkel
ω	Hz	Anregungsfrequenz

1 Einleitung

1.1 Additive Fertigung im produktionstechnischen Umfeld

Die additiven Fertigungsverfahren gewinnen stetig an Bedeutung und stellen heute eine interessante Alternative zu konventionellen Fertigungstechnologien dar. Durch das sukzessive Hinzufügen von Material, meist in Form einzelner Schichten, ergeben sich bei der Bauteilherstellung Einsparpotenziale gegenüber spanabhebenden und abtragenden Verfahren. Prinzipbedingt wird nur die Menge an Material verarbeitet, die für die Bauteilgeometrie benötigt wird. Die additiven Verfahren ermöglichen es zudem, die Produktfunktion in den Vordergrund zu stellen, da neben komplexen, belastungsoptimierten Geometrien auch mehrere Werkstoffe zu Multimaterialbauteilen kombiniert werden können.

Für einen Produktionsstandort bergen diese Technologien ein hohes Potenzial, um auf die sich verändernden Marktanforderungen, die Globalisierung, die Individualisierung und die verkürzten Produktlebenszyklen sowie die Ressourcenverknappung zu reagieren (ABELE & REINHART 2011). In Deutschland sind über 10 Mio. Arbeitsplätze direkt oder indirekt vom produzierenden Gewerbe abhängig (STATISTISCHES BUNDESAMT 2014), die es hinsichtlich zukünftiger Herausforderungen mithilfe von intelligenter Produktionstechnik und marktge-rechter Innovationen zu sichern gilt. Die additiven Verfahren können hierbei eine entscheidende Rolle übernehmen und gelten im Kontext der durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung definierten Schlüsseltechnologien „Produktionssysteme und -technologien“ sowie „Werkstofftechnologien“ als aktuelle und zukünftige Forschungsschwerpunkte (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG 2012).

Vor allem in den Leitbranchen „Mobilität“ und „Gesundheit, Ernährung“ befinden sich die additiven Verfahren in einer Transitionsphase aus dem Entwicklungsbereich hin zur Industrialisierung. Im Automotive- und Luftfahrtbereich werden neben Prototypenteilen unterdessen erste Serienteile mit additiven Verfahren gefertigt (MEIXLSPERGER 2010; MTU AERO ENGINES AG 2014) und ein sprunghafter Anstieg ist mittelfristig zu erwarten (DILBA 2011; GE AVIATION 2014). Im Medizinbereich dienen additive Verfahren dagegen schon länger als Mittel der Wahl, um kundenindividuelle Zahnprothesen oder Implantate herzustellen (UCKELMANN 2012; WOHLERS 2011). Die verwendeten Materialien umfassen neben Kunststoffen und Metallen zunehmend auch Keramiken (BROOKE 2014).

„Additive Fertigung“ wird synonym mit vielen weiteren Begriffen, darunter „3D-Druck“ und „Rapid Prototyping“ verwendet. Es können jedoch drei Anwendungsbereiche unterschieden werden, deren Begrifflichkeiten in der Richtlinie VDI 3404 bzw. VDI 3405 geregelt sind. *Rapid Prototyping* bezieht sich auf die additive Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität.

1 Einleitung

Diese dienen als Prototypen und Versuchsteile, das Material muss nicht notwendigerweise dem Serienmaterial entsprechen. Beim *Rapid Manufacturing* werden Bauteile additiv hergestellt, die alle Merkmale des Endproduktes aufweisen und damit für den Serieneinsatz ausgelegt sind. Im Bereich *Rapid Tooling* werden dagegen additive Verfahren verwendet, um Werkzeuge und Formen möglichst kostengünstig und schnell aufzubauen. Von diesen Anwendungsfeldern zu differenzieren ist der Consumer-Bereich, der sich durch die Verfügbarkeit von kostengünstigen Druckern für den Heim- und Bürobereich stetig weiterentwickelt, mit der Fertigung von Serienbauteilen jedoch nicht verwechselt werden darf.

Die zunehmende Bedeutung der additiven Verfahren liegt in ihren wesentlichen Potenzialen begründet, die sich wie folgt zusammenfassen lassen (vgl. GEBHARDT (2012)):

- Designfreiheit und Möglichkeit der geometrischen Komplexitätssteigerung von Bauteilen ohne Zusatzkosten
- Möglichkeiten der Funktionsintegration, z. B. durch Materialkombinationen, gradierte Eigenschaften, innen liegende Strukturen etc.
- Ressourceneffizienz durch Materialeinsparung
- Reduzierte *Time-to-Market* und On-Demand-Produktion aufgrund direkter Fertigung anhand digitaler Modelle
- Kosteneinsparung durch geringeren Materialeinsatz sowie reduzierte Werkzeug- und Lagerkosten

Die Potenziale kommen erfolgreich zum Tragen, wenn es sich um komplexe, integrierte, für die additive Fertigung ausgelegte Produkte bei geringen Stückzahlen handelt (KRAUSS et al. 2011). Eine reine Substitution konventioneller Fertigungsprozesse für konventionelle Geometrien ist dagegen selten wirtschaftlich (ZÄH 2006). Die additiven Verfahren regen zu einem Umdenken an und fördern Produktinnovationen. Sie stellen damit ein ausgezeichnetes Beispiel für das *Push-Pull*-Prinzip dar, das bestimmend für die moderne Produktion und Produktionsforschung ist. Während die Industrie bzw. der Markt produktionstechnische Herausforderungen zur Steigerung der Produktivität und Qualität verlangt (*Technology Pull*), kann die Wissenschaft durch Vorausbildung neue Wege öffnen (*Technology Push*) und Innovationen schaffen.

Die vorliegende Dissertation greift die aktuellen Entwicklungen auf und soll einen Beitrag dazu leisten, die additiven Fertigungsverfahren als Serientechnologien weiter zu etablieren. Zu diesem Zweck wird im Rahmen der Qualitätssicherung die thermische Prozessüberwachung fokussiert.

1.2 Ausgangssituation und Motivation

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die pulverbettbasierte additive Fertigung betrachtet, die sich gegenüber den lokal auftragenden Verfahren durch eine feste Bearbeitungsebene auszeichnet. Darüber hinaus erfolgt eine Fokussierung auf das Selektive (Laser-)strahlschmelzen, engl. *Selective Laser Melting* (SLM). Bei diesem Verfahren wird in einem zweistufigen Prozess metallisches Pulvermaterial schichtweise aufgebracht und anschließend durch lokal eingebrachte Laserenergie unter Schutzgasatmosphäre aufgeschmolzen und verfestigt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Geometrie vollständig hergestellt ist (vgl. Abbildung 1.1). Um hohe Genauigkeiten zu erreichen, werden Schichtdicken im Bereich von wenigen zehn Mikrometern appliziert, die zusammen mit der Ausdehnung des Schmelzbades die Auflösung des Verfahrens begrenzen.

Die Technologie des SLM wird von zahlreichen Herstellern kommerzialisiert und weiterentwickelt. Sie stellt neben dem Elektronenstrahlschmelzen, engl. *Electron Beam Melting* (EBM), bei dem der Energieeintrag in die Pulverschicht durch einen hochenergetischen Elektronenstrahl erfolgt, eine zentrale Technologie im Bereich des *Rapid Tooling* und *Rapid Manufacturing* metallischer Serienbauteile dar (LJUNGBLAD et al. 2014; WOHLERS 2014).

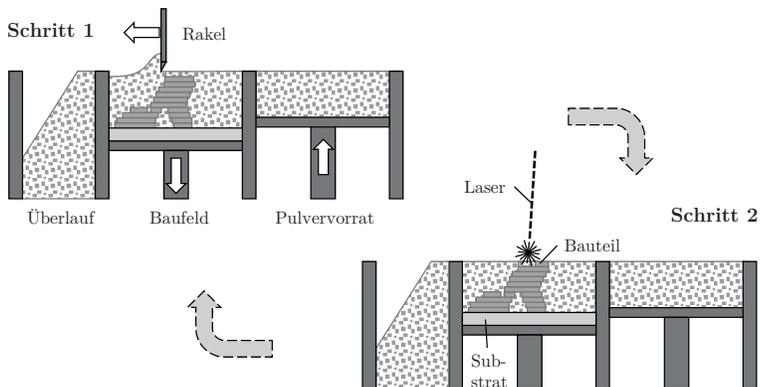


Abbildung 1.1: Verfahrensprinzip des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens

Neben den zuvor genannten, vielfältigen Potenzialen dieser Technologie, sind eine Reihe von Einschränkungen und Herausforderungen zu beachten, die die Ausgangssituation charakterisieren. Es bestehen nur wenige Kenntnisse über werkstoffkundliche Zusammenhänge – neue Materialien müssen daher anlagenspezifisch mit hohem Aufwand qualifiziert werden (EISEN 2009; KRUTH 2007; MEIER & HABERLAND 2008). Des Weiteren beschränkt sich die Materi-

alvielfalt im Metallbereich vornehmlich auf Stähle, Nickelbasis- und Titanlegierungen sowie Aluminium (GEBHARDT 2007). Aus ökonomischer Sicht ist der Energieaufwand pro Materialeinheit teilweise höher als bei der konventionellen Fertigung (WOHLERS 2012). Aufgrund der Gefährdungspotenziale der Ausgangsmaterialien (Pulverwerkstoffe) sind zudem besondere Maßnahmen hinsichtlich Arbeitsschutz notwendig. Zuletzt erfordert die erreichbare Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit in vielen Anwendungen eine zusätzliche Nachbearbeitung (SEHRT 2010), was Kosten und Durchlaufzeiten erhöht.

Das SLM-Verfahren ist durch eine Vielzahl an Einflussgrößen gekennzeichnet (REHME & EMMELMANN 2005), die zu einer hohen Streuung der resultierenden Bauteileigenschaften führen (vgl. Abschnitt 2.2). Die Prozessrobustheit wird durch die verwendete Anlagentechnik und durch den nutzer- bzw. bauteilspezifischen *Pre-Process* beeinflusst. So können sich maschinenspezifische Charakteristika ebenso auf die Bauteilqualität (z. B. Form- und Maßgenauigkeit) auswirken (ESCHEY et al. 2011), wie die nutzerbedingte Orientierung, Positionierung und Stützstrukturauslegung im Bauraum (HOEREN & WITT 2012). Eine zentrale Herausforderung ist darüber hinaus in dem Langzeitverhalten additiv gefertigter Komponenten gegeben. Dieses muss, aufgrund veränderter Gefüge- und Oberflächeneigenschaften im Vergleich zu konventionell gefertigten Komponenten, aufwendig qualifiziert werden (LEUDERS et al. 2014).

Die genannten Potenziale und Hürden sind im Besonderen am Beispiel der Luftfahrtindustrie zu erkennen. Während eine hohe Nachfrage nach neuen Bauweisen und optimierten Produkten vorherrscht, muss nach VALLÉS (2014) noch immer viel Aufwand für die Validierung und Prüfung der Anwendungen bzw. Bauteile investiert werden, um die strengen Anforderungen zu erfüllen (LYONS 2012). Dieser Sachverhalt stellt die wesentliche Motivation für die vorliegende Arbeit dar.

1.3 Handlungsbedarf und Zielsetzung

Die dargestellte Ausgangssituation zeigt einen Handlungsbedarf in mehreren Bereichen auf. Zum einen ist eine Steigerung des Prozessverständnisses notwendig, um die Auswirkungen der Vielzahl an Prozessparametern weiter zu durchdringen, den Prozess zu verbessern und die Prozessrobustheit zu erhöhen. Ausschusskosten, deren Ursache auf Prozessunregelmäßigkeiten zurückzuführen sind, gilt es zu reduzieren, um einen weiteren Schritt in Richtung First-Time-Right-Fertigung¹ machen zu können.

Zum anderen muss die frühzeitige Erkennung fehlerhafter Bauteile verbessert und der Aufwand für die nachgeschaltete Qualitätssicherung reduziert werden.

¹Fehlerfreie, qualitätskonforme Fertigung im ersten Anlauf

Handlungsbedarf herrscht zudem bei der Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Prozessergebnisse, da die Zusicherung regulärer Prozessbedingungen zukünftig selbst für Standardanwendungen von wachsender Bedeutung sein wird (WIESEMANN 2004) und die Akzeptanz bzw. Marktdurchdringung erhöhen kann. Der Einsatz von Methoden der Online-Überwachung (vgl. Abschnitt 2.5) kann in diesen Zusammenhängen einen Beitrag zur Deckung des Handlungsbedarfs leisten.

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht in der frühzeitigen Erkennung von Prozessfehlern und -unregelmäßigkeiten auf Basis eines gesteigerten Prozessverständnisses. Durch den Einsatz einer Online-Überwachung sollen Abweichungen quantifiziert und bewertet werden können, um eine Vergleichbarkeit additiv gefertigter Bauteile hinsichtlich diverser Qualitätskriterien zu schaffen.

Beim SLM handelt es sich um einen thermischen Prozess und der Wärmehaushalt wird durch eine Vielzahl an prozessspezifischen Einflüssen bestimmt. Durch die Analyse des zyklischen Aufheiz- und Abkühlverhaltens während der Verfestigung einer Schicht sollen Qualitätsindikatoren auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen abgeleitet werden. Die Überwachung aller Einzelschichten bietet dann eine Möglichkeit zur durchgängigen Qualitätssicherung. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht dabei die orts aufgelöste Temperaturmessung durch Thermografie.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Überblick

Im vorliegenden Kapitel werden die Grundlagen und der Stand der Wissenschaft in den relevanten Themengebieten aufbereitet. Dazu zählen der eigentliche Fertigungsprozess des SLM, die Methoden der Qualitätssicherung und die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der In-Process-Überwachung. Abgeschlossen wird das Kapitel mit den Grundlagen der berührungslosen Thermografie, die die zentrale Sensorik für den in dieser Arbeit behandelten Qualitätssicherungsansatz darstellt.

2.2 Grundlagen des Laserstrahlschmelzens

2.2.1 Verfahrensprinzip

Das SLM-Verfahren wird nach DIN 8580 in der Hauptgruppe 4 (Fügen) den Verfahren „Fügen durch Schweißen (4.6)“ zugeordnet. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsprinzipien, Unterschiede und Einteilungsmöglichkeiten weiterer additiver Verfahren ist bei diversen Autoren zu finden (vgl. EISEN (2009), GEBHARDT (2007) und ZÄH (2006)).

Wie in Abschnitt 1.2 erwähnt, handelt es sich beim SLM um einen zweistufigen Prozess¹, in dem metallisches Pulver auf einem ebenen Pulverbett mit definierter Schichtdicke appliziert und anschließend durch den selektiven Energieeintrag mithilfe eines fokussierten Laserstrahls verfestigt wird. Der Werkstoff wird über den Schmelzpunkt aufgeheizt und vollständig aufgeschmolzen. Beim Abkühlen aus der Schmelze entsteht ein fester Verbund mit der darunterliegenden, bereits verfestigten Schicht. Durch Aneinanderreihen mehrerer Schmelzbahnen anhand einer im Vorfeld definierten Belichtungsstrategie bzw. -reihenfolge wird sukzessive der gesamte Bauteilquerschnitt einer Schicht verfestigt. Anschließend beginnt der Prozess von Neuem, indem der Bauträger um eine Schichtdicke abgesenkt wird und eine neue Schicht appliziert wird. Um die Oxidbildung zu vermeiden und reaktive Materialien (z. B. Titan oder Aluminium) verarbeiten zu können, findet der Prozess unter Schutzgasatmosphäre statt.

Eine SLM-Anlage besteht nach BERGER et al. (2013) aus mindestens den in Abbildung 2.1 dargestellten Komponenten. Die aktuelle Technologieentwicklung beim SLM konzentriert sich auf den Einsatz von leistungsstarken Energiequellen und mehreren Strahlableitungseinheiten, um auch die Verarbeitung von hochschmelzenden, schlecht absorbierenden oder hoch wärmeleitfähigen Materialien zu ermöglichen und die Aufbauraten zu steigern (WIESNER &

¹In der Literatur wird vielfach auch ein dreistufiger Prozess beschrieben, bei dem die Absenkung der Bauplattform und der Schichtauftrag jeweils einen gesonderten Schritt darstellen.

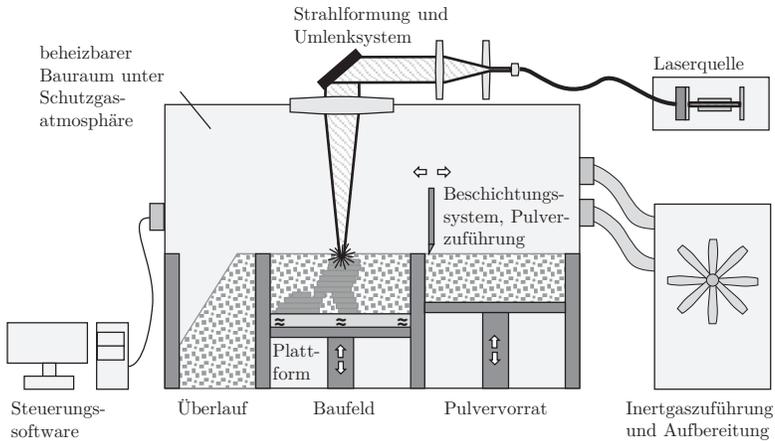


Abbildung 2.1: Komponenten einer SLM-Anlage: beheizbarer Bauraum mit höhenverstellbarer Plattform, Pulvervorratsbehälter und Beschichtungssystem, Laser mit optischem Ablenkensystem, Evakuierungssystem mit Inertgaszuführung, Pulverabsaug- und Aufbereitungssystem (nicht dargestellt), Steuerungssoftware (BERGER et al. 2013)

SCHWARZE 2014). Fortgeschrittene Belichtungsstrategien unterscheiden dabei zwischen der Hülle eines Bauteils, die mit mäßigem Energieeintrag und einem kleinen Strahlquerschnitt verfestigt wird, und dem Kern eines Bauteils, bei dem mehrere Schichten gleichzeitig bei hohen Energieeinträgen und großen Strahlquerschnitten aufgeschmolzen werden (BUCHBINDER et al. 2011). Während beim SLM Aufbauraten in der Größenordnung von $70 \text{ cm}^3/\text{h}$ erreicht werden, liegen diese bei anderen auftragenden Verfahren (z. B. Pulver- oder Drahtauftrag) um eine Größenordnung höher (BERGER et al. 2013).

Den metallischen, pulverbettbasierten Verfahren ist gemein, dass aufgrund des hohen Schmelzpunktes sog. Stützstrukturen an überhängenden Bauteilbereichen benötigt werden (WOHLERS 2014). Diese stellen eine ausreichende Wärmeableitung sicher und wirken einer Verformung der Bauteile aufgrund von thermisch induzierten Spannungen während des Prozesses entgegen. Sie werden aus dem gleichen Ausgangsmaterial aufgebaut und müssen nach dem Prozess wieder entfernt werden.

2.2.2 Prozesskette und Einflussgrößen

Die Prozesskette zur additiven Herstellung von Endprodukten lässt sich chronologisch in drei Abschnitte einteilen (vgl. Abbildung 2.2). Der *Pre-Process* dient der Planung und Auslegung des Bauauftrags auf Basis von vorhandenen

CAD-Daten. Für die zu fertigenden Bauteile wird unter Berücksichtigung der Bauhöhe, der Packungsdichte und der erwarteten Spannungen und Verzüge eine Bauteilposition und -orientierung festgelegt. Überhängende Bauteilbereiche bzw. Bereiche mit einer verminderten Wärmeabfuhr werden mit zusätzlichen Stützstrukturen versehen. An die Fertigungsanlage werden schließlich maschinenspezifische Schichtdaten (Slice-Daten) übergeben und es erfolgt eine Festlegung der Anlagen- und Prozessparameter. Der Materialfluss im *Pre-Process* beinhaltet die Bereitstellung des metallischen Pulverwerkstoffs und eines Bauträgers.

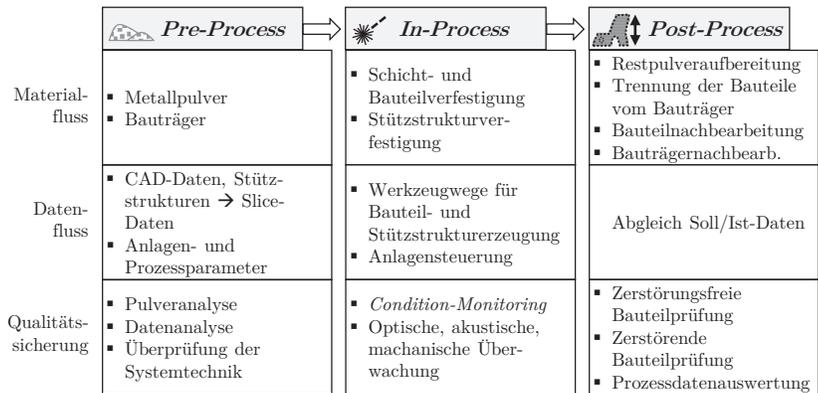


Abbildung 2.2: Prozesskette beim Strahlschmelzen

Der *In-Process* umfasst die eigentliche Schicht- bzw. Bauteilverfestigung nach dem in Unterabschnitt 2.2.1 vorgestellten zweistufigen Verfahrensprinzip. Die Verfahrenswegen des Laserfokuspunktes (Werkzeugweg) sind nach EISEN (2009) entweder schon im Voraus bekannt oder werden aus Kapazitätsgründen *on-the-fly* während des Prozesses berechnet. Es handelt sich um einen Batch-Prozess, bei dem mehrere Bauteile im selben Bauprozess hergestellt werden können.

Unter dem *Post-Process* sind sämtliche Schritte zu verstehen, die nach der Verfestigung der letzten Schicht erfolgen. Dies beinhaltet die Bauteilentnahme, die Restpulveraufbereitung, die Abtrennung der Bauteile von dem Bauträger und nachgelagerte Prozesse zur Herstellung der geforderten Bauteileigenschaften (z. B. spanende Prozesse in Form von Fräsen oder Schleifen bzw. Strahlen, Läppen und Wärmebehandlungen). Je nach geforderter Produktqualität sind hierbei unterschiedliche Prozessschritte notwendig (YASA et al. 2011).

Die Möglichkeiten einer durchgängigen Qualitätssicherung beim Strahlschmelzen mit Fokus auf der Prozesskette werden ausführlich in EISEN (2009) aufgezeigt. Sie umfassen u. a. im *Pre-Process* die Analyse der Pulverqualität, im

In-Process die Schichtüberwachung und im *Post-Process* die Prozessanalyse und Qualitätsprüfung.

Die Prozesskette beim additiven Aufbau im Allgemeinen und der *In-Process* im Speziellen unterliegen einer Vielzahl an Einflussgrößen und Wechselbeziehungen. Eine systematische Aufteilung der Einflüsse ist beispielsweise bei EISEN (2009), KÜSTERS et al. (2011), REHME (2009) und SKRYNECKI (2010) zu finden und soll an dieser Stelle nicht vollumfänglich wiederholt werden (vgl. Abschnitt 4.3). Hinsichtlich der Prozesskette sind v. a. die Wechselbeziehungen mit dem *Pre-Process* und die Wechselwirkungen innerhalb des *In-Process* zu beachten (KRAUSS et al. 2011). Während sich die Bauteilorientierung beispielsweise auf die Oberflächenbeschaffenheit von einzelnen Teilflächen auswirkt und zusätzliche Nacharbeitsprozesse erforderlich machen kann (*Pre-Process* ↔ *Post-Process*), wirken sich Prozessemissionen in Form von Spritzerpartikeln auf die nachfolgenden Schichten aus (*In-Process* ↔ *In-Process*).

2.2.3 Strahl-Stoff-Wechselwirkungen

Die grundlegenden Wechselwirkungen von Laserstrahlung und Feststoff bei der Lasermaterialbearbeitung sind u. a. in STEEN & MAZUMDER (2010) beschrieben und werden an dieser Stelle im Hinblick auf die Verfestigung einzelner Pulverschichten beim SLM zusammengefasst. Ein wesentlicher Unterschied zu der Bearbeitung reiner Feststoffe besteht darin, dass es beim SLM zu einer Koaleszenz einzelner Pulverpartikel kommt, welche sich auf die effektive Wärmeleitfähigkeit auswirkt (GUSAROV & SMUROV 2010). Die Wechselwirkung ist daher gekennzeichnet durch die Kopplung von Strahlungs- und Wärmeaustausch sowie die Verfestigungskinetik der Pulverpartikel (z. B. in Form einer Sinterrate (KOLOSSOV et al. 2004) oder einer Schrumpfung (XIAO & Y. ZHANG 2007)). Für das SLM können folgende Mechanismen grundsätzlich unterschieden werden, die zu vielfältigen physikalischen Phänomenen bei der Wechselwirkung bzw. Verfestigung führen (vgl. DAS (2003), Abbildung 2.3):

- Absorption und Reflexion der Laserstrahlung
- Wärmeübertragung im Pulverbett (Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung)
- Wärmeübertragung im Schmelzbad bzw. im Feststoff (Wärmeleitung, Konvektion)
- Wärmeübertragung an der Oberfläche (Strahlung, Konvektion und / oder Wärmeleitung)

Bei der *Absorption* von Laserstrahlung im Pulverbett kommt es zu einer Umwandlung der elektromechanischen Energie des Lichtfeldes in innere Energie des Werkstoffs. Der Energietransfer wird zum einen durch intrinsische Eigenschaften des Werkstoffs und zum anderen durch die Morphologie der Pulveroberfläche bzw. die Pulverbeschaffenheit (GLARDON et al. 2001), das

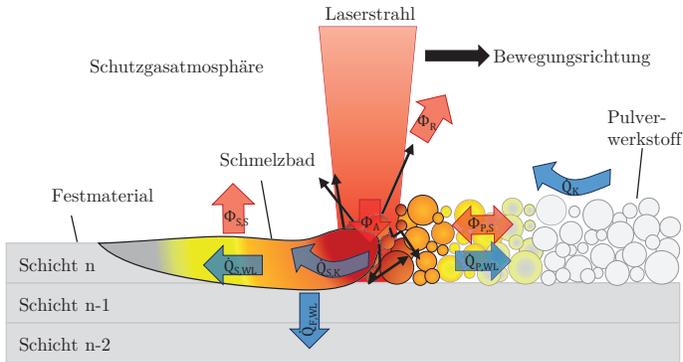


Abbildung 2.3: Wärmeströme und Strahlungsflüsse in der Wechselwirkungszone beim SLM

umgebende Inertgas, den Restsauerstoffgehalt und die Temperatur bestimmt (DULEY 1983).

In den metallischen Pulverpartikeln erfolgt die Absorption der einfallenden Laserstrahlung hauptsächlich durch die Schwingungsanregung freier Elektronen. Sie führt zu einem lokalen Temperaturanstieg und durch Stöße der Elektronen am Festkörpergitter bzw. an Fehlstellen stellt sich anschließend ein thermisches Gleichgewicht ein. Im Vergleich zu einem metallischen Festkörper kann die Laserstrahlung im Pulverbett durch Mehrfachreflexionen an den Partikeloberflächen tiefer in die Zwischenräume eindringen und besser absorbiert werden (FISCHER et al. 2003; TOLOCHKO et al. 2000).

Beim SLM kommen typischerweise Faserlaser mit der YAG-Wellenlänge von $1,06 \mu\text{m}$ zur Anwendung (POPRAWA 2004). Metallische Pulver weisen hier einen Absorptionsgrad auf, der den von Festkörpern deutlich übersteigt (vgl. Tabelle 2.1) und der sich durch den Temperaturanstieg während des Aufheizevorganges weiter erhöht (YADROITSEV 2009). Effektiv ist im Pulverbett dann ein Absorptionsgrad gegeben, der das 1,5 bis 2,5-Fache des Absorptionsgrades im Festkörper beträgt (TOLOCHKO et al. 2000). Während im Feststoff sehr geringe Eindringtiefen von 10 nm bis 1000 nm erreicht werden, betragen sie im Pulverbett mehrere Partikeldurchmesser (KOLOSSOV et al. 2004). Für die detaillierte Beschreibung des Energieaustausches bei der Absorption von Laserstrahlung im Pulverbett sind aus der Literatur verschiedene Modelle auf Basis der geometrischen Optik (MEINERS 1999) bzw. des *Ray-Trackings* (LAOUI et al. 2000; STREEK et al. 2013) und der analytischen Streutheorie (GUSAROV & KRUTH 2005) bekannt.

Tabelle 2.1: Strahlungsabsorption bei $\lambda=1,06\ \mu\text{m}$ für ausgewählte Materialien nach GLARDON et al. (2001), MEINERS (1999) und TOLOCHKO et al. (2000)

Material	Absorption Pulver	Absorption Festkörper
Fe	0,64	0,36
Ni	0,64	0,26
Ti	0,77	0,30

Der lokale Temperaturanstieg innerhalb der Wechselwirkungszone wirkt als Wärmequelle für die umgebenden Bereiche. Die Wärmeübertragung im Pulverbett bzw. im Feststoff erfolgt primär durch Wärmeleitung und wird durch nachfolgende Gleichung 2.1 mit einem Quellterm beschrieben (BUGEDA et al. 1999; CARSLAW & J. C. JAEGER 1986; PATIL & YADAVA 2007):

$$\rho_m c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T) + g(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

ρ_m : Materialdichte, c_p : spezifische Wärmekapazität, κ : Wärmeleitfähigkeit, g : Wärmequelle

Die Komplexität beim SLM ergibt sich nach ZENG et al. (2012) v. a. aus dem Übergang Pulver–Feststoff und aus den variablen bzw. temperaturabhängigen Materialkennwerten. Als Wärmequelle sind in der Literatur unterschiedliche Modelle bekannt (vgl. Unterabschnitt 5.2.1), eine zentrale Rolle spielt jedoch die Gauß'sche Form der Intensitätsverteilung (vgl. Gleichung 2.2):

$$g(x, y, z, t) := g(r) = \frac{2P}{\pi r_g^2} e^{-\frac{2r^2}{r_g^2}} \quad (2.2)$$

r_g : Strahlradius einer Gauß-Quelle, r : radialer Abstand von der Quelle, P : Leistung der Wärmequelle

Zur Berücksichtigung beider Phasen² (Pulver / Feststoff) wird in BUGEDA et al. (1999) eine effektive Wärmeleitfähigkeit verwendet, die die jeweiligen Massenverhältnisse und die gasgefüllten Zwischenräume im Pulverbett einbezieht. Der Energieaustausch durch Konvektion und Strahlung an der Oberfläche kann nach CARSLAW & J. C. JAEGER (1986) in Form von Anfangs- und Randbedingungen für die Gleichung 2.1 berücksichtigt werden. Eine vollständig analytische Lösung existiert nach ZENG et al. (2012) unter diesen Randbedingungen nicht, jedoch können vereinfachte Modelle abgeleitet werden.

Durch die Strahlungsabsorption kommt es zu einem Temperaturanstieg, der in einem vollständigen Aufschmelzen der Pulverpartikel resultiert und zur Ausbildung eines Schmelzbades führt. In der Aufteilung nach KRUTH et al.

²Im eigentlichen Sinne handelt es sich bei Pulver und Feststoff um die gleiche Phase. Eine Aufgliederung erfolgt nur aus Gründen der Modellbildung.