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 fruchtvollen Diskussionen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Instituskolleginnen 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

Gersthofen, im November 2016 *Harald Krauss*

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 Systemeinteilung . . . 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 Schichtanbindung . . . 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 Hauptein-flussgrößen 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

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 *Analysis of Variance*
CAD *Computer-aided Design*
CCD *Charge-coupled Device*
CDPM *Cool-down Phase Model*
CMOS *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*
DoE *Design of Experiments*
DT Differenztransformation
EBM *Electron Beam Melting*
ESF *Edge Spread Function*
ESP Eigenspannungen
FFA Fehlerflächenanteil
FOV *Field of View*
FPA *Focal Plane Array*
FPGA *Field-programmable Gate Array*
HIP Heißisostatisches Pressen
IFA Indikator Flächenabweichung
IFB Indikator Fehlerfläche Schichtauftrag im Bauteilbereich
IFOV *Instantaneous Field of View*
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 *Hu*-Momente Wärmeeinflussbereich
IWI Indikator Integral Wärmeeinflussbereich
IWU Indikator Umfang Wärmeeinflussbereich
IWV Indikator Aspektverhältnis Wärmeeinflussbereich
IZU Indikator Zeit über Schwellwert

LED	*Light-emitting Diode*
LWIR	*Long-wavelength Infrared*
MTF	*Modulation Transfer Function*
NEP	*Noise-equivalent Power*
NETD	*Noise-equivalent Temperature Difference*
NIR	nahes Infrarot
NUC	*Non-uniformity Correction*
OEE	*Overall Equipment Effectiveness*
OEG	obere Eingriffsgrenze
OGW	oberer Grenzwert
OWG	obere Warngrenze
PID	*Proportional-integral-derivative*
POD	*Probability of Detection*
PSF	Punktspreizfunktion
QM	Qualitätsmanagement
SAA	schichtaufgelöste Auswertung
SLM	*Selective Laser Melting*
SNR	*Signal-to-noise Ratio*
SPC	*Statistical Process Control*
SRF	*Slit Response Function*
SVM	statistische Versuchsmethodik
SWA	schichtweise Auswertung
TGM	Temperaturgradientenmechanismus
TQM	*Total Quality Management*
UEG	untere Eingriffsgrenze
UGW	unterer Grenzwert
UWG	untere Warngrenze
UV	ultravioletter Wellenlängenbereich
VIS	sichtbarer (engl. *visible*) 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^*	$\mathrm{cm}\sqrt{\mathrm{Hz}}/\mathrm{W}$	Spezifische Detektivität
D_E	m	Eintrittspupillendurchmesser
E	J	Energie
E_{zug}	N/m^2	Elastizitätsmodul
F_{ij}	–	Sichtfaktor
G_R	$(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s})^{-1}$	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
$L(\lambda, T, \Theta)$	$\mathrm{W}/(\mathrm{sr} \cdot \mathrm{m}^2)$	Spektrale Strahldichte
L_B	$\mathrm{W}/(\mathrm{sr} \cdot \mathrm{m}^2)$	Strahldichte eines Schwarzen Strahlers
M	$\mathrm{W}/(\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{m})$	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
$M_{BB}(\lambda, T)$	$\mathrm{W}/(\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{m})$	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	$(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s})^{-1}$	Rekombinationsrate der Ladungsträger
S_1	K/s	Schwelle zur Bestimmung bewegter Partikel

S_2	$\mathrm{K/m^2}$	Schwelle zur Bestimmung liegender Partikel
S^*	$\mathrm{K/m^2}$	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	$\mathrm{m^2/s}$	Temperaturleitfähigkeit Festkörper
$\hat{a}_d$	–	Entscheidungsschwellwert für POD-Analyse
a_h	m	Hatch-Abstand
$\hat{a}_i$	–	Gewichtungsfaktor Signalqualität Indikator i
a_p	$\mathrm{m^2/s}$	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	$\mathrm{J/(kg \cdot K)}$	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
$\mathrm{erf}(x)$	–	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
$\overrightarrow{m_B}$	–	Merkmalsvektor
q	$\mathrm{K \cdot m^3/s}$	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

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	$\mathrm{W/(m \cdot K)}$	Wärmeleitfähigkeit
κ_p	$\mathrm{W/(m \cdot K)}$	Wärmeleitfähigkeit Pulver
κ_λ	$\mathrm{1/m}$	Dämpfungsfaktor
λ	m	Wellenlänge
ρ	–	Reflexionsgrad
σ_B	$\mathrm{W/(m^2K^4)}$	Stefan-Boltzmann-Konstante
ρ_m	$\mathrm{g/cm^3}$	Materialdichte
σ	$\mathrm{N/mm^2}$	Spannung
σ_y	$\mathrm{N/mm^2}$	Streckgrenze
τ	–	Transmissionsgrad
τ_A	–	Transmissionsgrad Atmosphäre
τ_{opt}	–	Transmissionsgrad Kameraoptik
τ_{th}	–	Thermische Zeitkonstante
τ_w	–	Transmissionsgrad Sichtfenster
Φ	$\mathrm{W/m^2}$	Strahlungsleistung / Strahlungsfluss / Bestrahlungsstärke
Φ_A	W	Absorbierte Laserleistung
Φ_B	$\mathrm{W/m^2}$	Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers
Φ_{B^*}	$\mathrm{W/m^2}$	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	°	Anzimutwinkel
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 marktgerechter 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.

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 Vorausentwicklung 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).

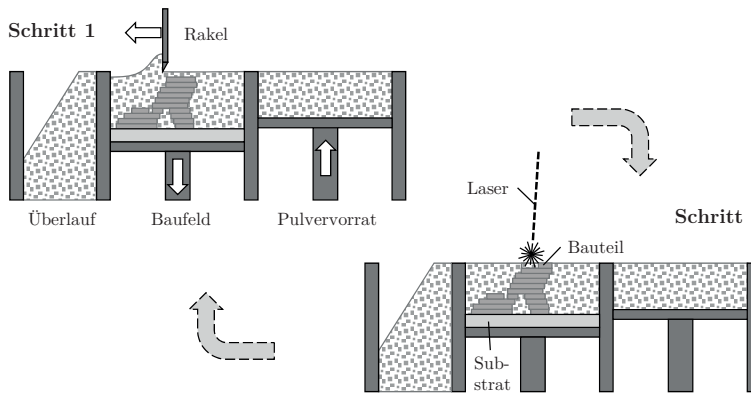


Abbildung 1.1: Verfahrensprinzip des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens

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-Fertigung[1] machen zu können.

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

[1] Fehlerfreie, 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 ortsaufgelöste 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 Prozess[1], 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 Strahlablenkungseinheiten, um auch die Verarbeitung von hochschmelzenden, schlecht absorbierenden oder hoch wärmeleitfähigen Materialien zu ermöglichen und die Aufbauraten zu steigern (Wiesner &

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

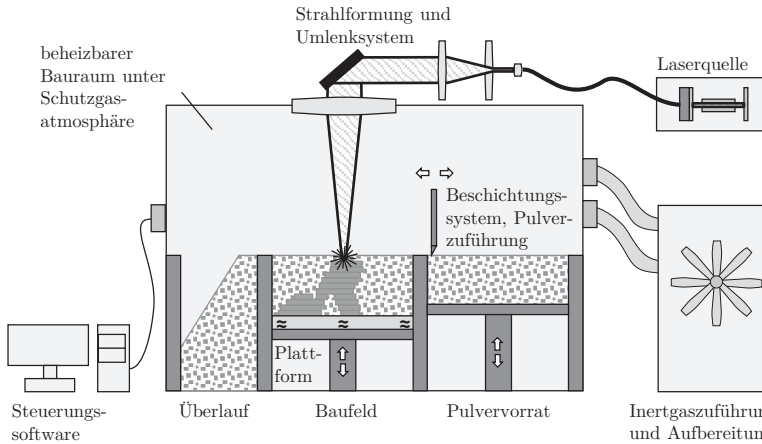


Abbildung 2.1: Komponenten einer SLM-Anlage: beheizbarer Bauraum mit höhenverstellbarer Plattform, Pulvervorratsbehälter und Beschichtungssystem, Laser mit optischem Ablenksystem, Evakuierungssystem mit Inertgaszuführung, Pulverabsaug- und Aufbereitungssystem (nicht dargestellt), Steuerungssoftware (Berger 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 $70\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{h}$ 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.

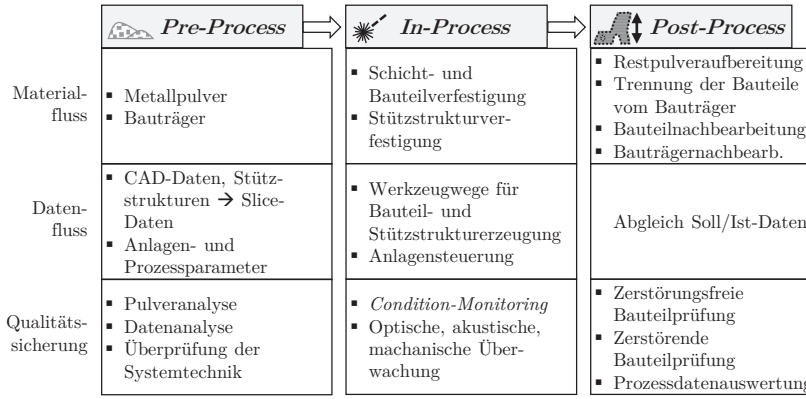


Abbildung 2.2: Prozesskette beim Strahlschmelzen

Der *In-Process* umfasst die eigentliche Schicht- bzw. Bauteilverfestigung nach dem in Unterabschnitt 2.2.1 vorgestellten zweistufigen Verfahrensprinzip. Die Verfahrwege 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* $\leftrightarrow$ *Post-Process*), wirken sich Prozessemissionen in Form von Spritzerpartikeln auf die nachfolgenden Schichten aus (*In-Process* $\leftrightarrow$ *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

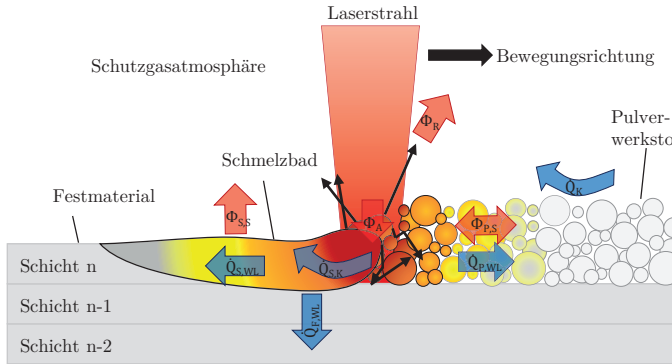


Abbildung 2.3: Wärmeströme und Strahlungsflüsse in der Wechselwirkungszone beim SLM

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 µm zur Anwendung (Poprawe 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 Aufheizvorganges 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-Tracings* (Laoui et al. 2000; Streek et al. 2013) und der analytischen Streutheorie (Gusarov & Kruth 2005) bekannt.

Tabelle 2.1: Strahlungsabsorption bei λ=1,06 µm 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):

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

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):

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

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

Zur Berücksichtigung beider Phasen[2] (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.

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

(2007) handelt es sich beim SLM demnach nicht um ein Sinterverfahren, sondern um ein Schmelzverfahren. Nachfolgend wird auf die wesentlichen physikalischen Phänomene beim Aufschmelzen bzw. bei der Verfestigung eingegangen.

Schmelzbadströmung Der Wärmetransport in der Schmelze erfolgt zum einen durch Wärmeleitung und zum anderen durch Konvektion. Letztere ist dabei geprägt von der niedrigen Viskosität und der gleichzeitig hohen Oberflächenspannung, die typischerweise in Metallschmelzen vorherrscht. Temperaturgradienten an der Schmelzbadoberfläche führen aufgrund der temperaturabhängigen Oberflächenspannung zu Gradienten in der Oberflächenspannung, die sog. Marangoni-Strömungen zur Folge haben. Abhängig von Vorzeichen und Wert des Gradienten kommt es zu unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen des Schmelzbades (Rombouts et al. 2006).

Benetzung Für das Verfahrensprinzip ist eine ausreichende Benetzung der noch nicht verfestigten Pulverkörner und der bereits verfestigten Schichten durch das Schmelzbad notwendig. Verunreinigungen z. B. durch Sauerstoff[3] stellen ein wesentliches Problem in diesem Zusammenhang dar (Kruth et al. 2007). Es kommt zu einer Reduktion der Oberflächenspannung und kontaminierte bzw. oxidbelegte Oberflächen werden nicht benetzt. Letztlich entstehen dadurch größere, kugelförmige Schmelzetropfen beim Aufschmelzvorgang (Rombouts et al. 2006).

Instabilitäten und *Balling* Instabilitäten bei der Erzeugung von einzelnen Schmelzspuren sind u. a. durch die Schmelzbadgeometrie und das Verhältnis von Schmelzbadlänge zu -breite bedingt. Lange, dünne Schmelzbäder können unter Minimierung der Oberflächenenergie zusammenbrechen (Chandrasekhar 1981), sodass einzelne Schmelzetropfen (sog. *Balling*) ausgebildet werden (Hauser et al. 1999; Klocke & Wagner 2003; Tolochko et al. 2004). Verursacht wird dieser Effekt durch die Plateau-Rayleigh-Instabilität, die bei niederviskosen Flüssigkeiten (z. B. Metalle oberhalb ihrer Schmelztemperatur) relevant ist (Gusarov et al. 2007; Rayleigh 1892). Beim SLM vergrößert sich das Verhältnis von Schmelzbadlänge zu -breite mit zunehmender Scangeschwindigkeit, sodass prinzipiell eine obere Grenze für die Verfestigungsgeschwindigkeit besteht (Kruth et al. 2007). Der Sauerstoff spielt auch hier eine entscheidende Rolle, da exotherme Oxidbildung zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg führt, der das Schmelzbad vergrößert und Instabilitäten, z. B. in Form von *Balling*, auslösen kann (R. Li et al. 2012; Rombouts et al. 2006).

[3] Sauerstoff aus Pulverbett/Schmelzbad, der nicht gelöst werden kann.

Verdampfung, Plasma und Spritzerbildung Bei der Verfestigung metallischer Pulver kommt es zur Verdampfung, wenn die Temperatur aufgrund von überhöhtem Energieeintrag bzw. ungenügender Wärmeabfuhr deutlich über die Schmelztemperatur ansteigt. Der Metalldampf über der Schmelze expandiert und generiert einen Rückstoß auf das Schmelzbad (Kruth et al. 2004). Der damit verbundene lokale Überdruck begünstigt ebene Schmelzschichten, führt jedoch bei zu hoher Ausprägung zu Schmelzbadaustrieben (Spritzern) (Park & Rhee 1999; Yadroitsev 2009). Bei hohen Leistungsdichten kann es zur (teilweisen) Ionisation des Metalldampfes kommen, die die effektive Strahlabsorption begünstigt (Allmen & Blatter 1998). Der Austrieb von Spritzerpartikeln ist nach Meiners (1999) auch eine Folge von explosionsartiger Verdampfung, die durch lokale Unregelmäßigkeiten bzw. einen fehlenden Wärmekontakt verursacht wird.

2.2.4 Schichtverfestigung und Wärmehaushalt

Um eine Pulverschicht selektiv zu verfestigen, werden Einzelspuren (Schweißraupen) auf Basis einer vordefinierten Belichtungsstrategie (vgl. Abbildung 2.4) in einem festen Abstand nebeneinander erzeugt (engl. *Hatching*). Durch die schmelzmetallurgische Verbindung zwischen den einzelnen Schweißraupen und den bereits verfestigten Schichten entsteht ein fester Verbund. Die wesentlichen Parameter umfassen die Laserleistung P, die Geschwindigkeit des Laserfokus (Scangeschwindigkeit) v, den Strahldurchmesser in der Bearbeitungsebene d, den Abstand der Einzelspuren a_h und die Schichtdicke d_l.

Zur Kontrolle des Wärmehaushaltes werden Einzelspuren in sog. Scanfeldern zusammengefasst. Neben der einfachen Schraffur (Einzelspuren überstreichen den gesamten Bauteilquerschnitt ohne Unterteilung) sind die Streifenbelichtung (Einzelspuren werden in Streifen fester Breite zusammengefasst und mäanderförmig abgefahren) und die Schachbrett-/Inselbelichtung (Einzelspuren sind in Quadraten zusammengefasst, die nach fester oder zufälliger Reihenfolge abgefahren werden) etabliert.

Einzelspur und Schmelzbadform Nach Ramos et al. (2002) entsteht beim SLM ein dynamisches thermisches Equilibrium, in dem das Schmelzbad bei gegebener Scangeschwindigkeit, Laserleistung und Wärmeleitfähigkeit eine konstante Form annimmt (Grong 1994). Eine gleichzeitig hohe Laserleistung und Scangeschwindigkeit führen bei geringer Leitfähigkeit zu kometförmigen Schmelzbädern. Kleine Scangeschwindigkeiten und geringe Laserleistungen führen hingegen zu einer sphärischen Schmelzbadform. In Vasinonta et al. (2001) werden diesbezüglich dimensionslose Größen eingeführt, die u. a. zur geometrischen Charakterisierung des Schmelzbades anhand von Prozessmappen dienen. Auf Basis des Rosenthal-Modells einer bewegten Wärmequelle

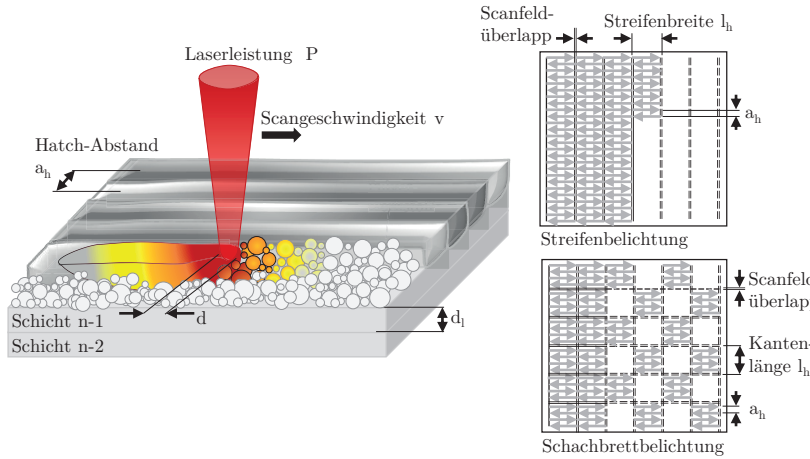


Abbildung 2.4: Schichtverfestigung beim SLM

(vgl. Abschnitt 5.2) wird damit gezeigt, wie sich das Schmelzbad in Bauteilrandbereichen ausprägt (Davis & Klingbeil 2010). Das Schmelzbad ist nicht ausschließlich auf den Bereich des Laserfokus beschränkt. Umliegende Pulverkörner werden durch Kapillarkräfte in das Schmelzbad hineingezogen und vergrößern dieses bei gleichzeitiger Abkühlung (Rombouts et al. 2006; Yadroitsev 2009).

Um eine ebene Oberfläche zu schaffen und eine gleichmäßige Pulverschichtdicke für die nachfolgenden Schichten aufzutragen, werden möglichst kontinuierliche und ebene Einzelspuren benötigt (Yadroitsev & Smurov 2011), die nicht durch *Balling*-Effekte o. ä. unterbrochen sind. In Gusarov & Smurov (2010) wird gezeigt, dass die Stabilität einer einzelnen zylinderförmigen Schmelzspur wesentlich von der Scangeschwindigkeit und der Schichtdicke abhängt. Je größer dabei die effektive Wärmeleitung in den Festkörper ist, desto enger wird das Prozessfenster, in dem sich stabile Schmelzspuren ausbilden (Yadroitsev et al. 2010).

Wärmehaushalt Neben der Zusammensetzung des Schmelzbades ist der Wärmehaushalt, charakterisiert durch lokale Temperaturen, Verweilzeiten und lokale Abkühlgradienten, nach Anam et al. (2013) eigenschaftsbestimmend für die späteren Materialphasen. Der Wärmehaushalt einer Schicht bzw. des verfestigten Volumens ist wiederum abhängig von der Bauraumtemperierung, dem Energieeintrag und der lokalen Wärmeabfuhr[4]. Unabhängig von der gewählten

[4] Wird Konvektion und Strahlung vernachlässigt, ist die Wärmeabfuhr durch die Wärmeleitung und den zugrunde liegenden geometrischen Wärmeleitungsquerschnitt bestimmt.

Scanflächenaufteilung ergibt sich der Volumenenergieeintrag zu:

$$E = \frac{P}{d_l a_h v} \tag{2.3}$$

Der Pulverwerkstoff weist gegenüber dem Feststoff eine um Größenordnungen verminderte Temperaturleitfähigkeit auf, sodass er effektiv als Isolator wirkt (Alkahari et al. 2012). An überhängenden Flächen und in filigranen Bauteilbereichen kommt es daher zu Wärmestauungen und erhöhten Maximaltemperaturen. Darüber hinaus sind die Schichtzeiten im SLM-Prozess bei konstanter Aufbaurate durch die Anzahl und Größe der Bauteile im Bauraum festgelegt. Da die zu verfestigenden Querschnittsflächen jedoch schichtweise variieren, kommt es auch zu variablen Schicht- bzw. Abkühlzeiten und damit zu variablen Grundtemperaturen für nachfolgende Schichten.

Der Wärmehaushalt einer Schicht wird des Weiteren durch die zeitliche Abfolge der einzelnen Scanvektoren und die oben genannten Prozessparameter charakterisiert. Sie bestimmen die Eigenspannungen und Verformungen während des Aufbauprozesses (Kruth et al. 2004) und sind nach Branner (2011) direkt mit dem Bauteilstrukturverhalten in Verbindung zu bringen.

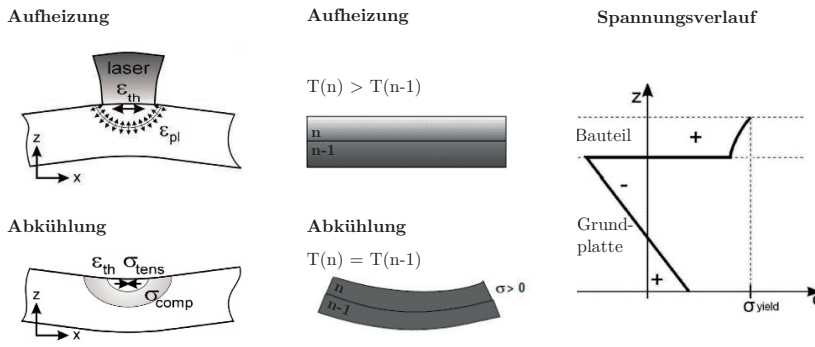
Verzug und Eigenspannungen Eigenspannungen (ESP) stellen nach Kempen et al. (2013) eine Grenze für additive Verfahren dar, die die Verarbeitung vieler Werkstoffe verhindert. Sie sind durch die hohen, schnellen und lokalisierten Temperaturänderungen im Prozess bedingt und entstehen als Folge von thermischen Spannungen im verfestigten[5] Material (Kruth et al. 2012). Diese werden wiederum durch Temperaturgradienten oder durch die Kontraktion des umgebenden, aufgeschmolzenen Materials induziert. Während thermische Spannungen unterhalb der Elastizitätsgrenze (Dehngrenze) des Werkstoffs kein Problem darstellen, führen sie oberhalb der Grenze zu resultierenden ESP.

Die Folgen umfassen Rissbildung, Schichtablösungen und Bauteilverzug, wenn es zu einer Überschreitung der Festigkeitsgrenzen bzw. Relaxation der Spannungen kommt. ESP können nach Withers & Bhadeshia (2001) in verschiedene Typen eingeteilt werden, wobei für das SLM hauptsächlich die Makroeigenspannungen (Typ I) relevant sind (Mercelis & Kruth 2006). Hohe ESP bilden sich nach Kempen et al. (2013) v. a. bei Materialien mit geringer Temperaturleitfähigkeit bzw. bei spröden und harten Materialien aus.

Für die Beschreibung der ESP haben sich zwei Modelle etabliert (vgl. Abbildung 2.5a, 2.5b). Beim Temperaturgradientenmechanismus (TGM) entsteht aufgrund der verhältnismäßig geringen Wärmeleitung ein steiler Temperaturgradient zwischen der Bearbeitungszone in der aktuellen Schicht und der

[5] Für die Ausbildung von ESP sind nach Kruth et al. (2004) nur Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur relevant.

darunterliegenden, bereits verfestigten Schicht. Gleichzeitig wird die Werkstofffestigkeit durch die erhöhten Temperaturen herabgesetzt. Da die thermische Ausdehnung des heißen Volumens durch das umgebende Material behindert wird, werden elastische Druckeigenspannungen erzeugt, die beim Überschreiten der temperaturabhängigen Fließgrenze zu plastischen Verformungen führen. Bei der Abkühlung kommt es dann zu einer Umwandlung in Zugeigenspannungen, da die Kontraktion des heißen Volumens durch die darunterliegende kalte Schicht teilweise blockiert wird (Branner 2011; Kruth et al. 2004; Mercelis & Kruth 2006).



(a) TGM nach Kruth et al. (2004)

(b) CDPM nach Meiners (1999)

(c) Spannungsverlauf nach Kruth et al. (2012)

Abbildung 2.5: Modellvorstellungen zur Entstehung von Eigenspannungen. Nach Kruth et al. (2012) und Mercelis & Kruth (2006) liegen im Bauteil Zugeigenspannungen vor, die in der obersten Schicht die Streckgrenze (σ_y) erreichen. Durch den festen Verbund mit der Grundplatte werden in dieser Zug- und Druckeigenspannungen (σ_{tens} bzw. σ_{comp}) induziert (n = Schichtnummer).

Beim *Cool-down Phase Model* (CDPM) werden ESP während der Abkühlung der aufgeschmolzenen Schicht induziert. Da die thermische Kontraktion dieser Schicht durch die darunterliegenden Schichten blockiert wird, entstehen in der aufgeschmolzenen Schicht Zugeigenspannungen und darunter Druckeigenspannungen (Meiners 1999; Mercelis & Kruth 2006). Die Eigenspannungszustände verändern sich während des schichtweisen Aufbaus und werden maßgeblich durch die Grundplatte mitbestimmt. Abbildung 2.5c zeigt das resultierende Eigenspannungsprofil auf Basis von theoretischen Modellen (Mercelis & Kruth 2006; Shiomi et al. 2004).

Die Ausbildung von ESP wird wesentlich durch die Scanstrategie, insbesondere die Aufteilung der Scanflächen, die Länge der Scanvektoren und deren

zeitliche Abfolge, beeinflusst. In Kruth et al. (2004) wird gezeigt, dass sich, im Vergleich zu einer Schachbrettbelichtung, bei der einfachen Schraffur größere ESP, v. a. senkrecht zu der Schraffurrichtung, ausbilden. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Abkühlzeit und damit der Temperaturgradient zwischen aufeinanderfolgenden Vektoren größer ist. Kurze Scanvektoren erzeugen daher im Allgemeinen geringere ESP (Kruth et al. 2012).

Wird der gesamte Prozess über eine Vielzahl von Schichten hinweg betrachtet, so wirkt sich auch die spezifische Bauteilgeometrie auf den Wärmehaushalt bzw. die Prozesstemperaturen und damit das Eigenspannungsniveau aus (Keller & Ploshikhin 2014; Mercelis & Kruth 2006; Zäh & Lutzmann 2010). Zur Vorhersage der resultierenden ESP und Verformungen muss demnach neben der Thermodynamik auch die Mechanik berücksichtigt werden (Kruth et al. 2012).

Durch Variation der Belichtungsstrategie von Schicht zu Schicht oder die Unterteilung der Belichtungsfläche in eine Vielzahl einzelner Scanflächen wird eine Homogenisierung erreicht, die das Eigenspannungslevel je nach Werkstoff auf einem prozesstauglichen[6] Niveau halten kann. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der ESP im Prozess besteht in der Senkung des Temperaturgradienten durch die Vorheizung des Bauträgers bzw. der bereits verfestigten Schichten (Kempen et al. 2013).

2.3 Materialeigenschaften beim Laserstrahlschmelzen

Nachfolgend soll ein Überblick über die Materialeigenschaften laserstrahlgeschmolzener Bauteile gegeben werden. Ein Schwerpunkt wird auf die Nickelbasis-Superlegierung Inconel 718 gelegt, die Gegenstand der späteren Untersuchungen ist. Prinzipiell sind die Eigenschaften additiv hergestellter Bauteile, ausgenommen die Duktilität, vergleichbar mit denjenigen konventionell hergestellter Bauteile, da hohe Dichten erreichbar sind (Gebhardt 2012; Kruth et al. 2010; Spierings et al. 2010). Sie müssen jedoch immer applikationsspezifisch und im Zusammenhang mit dem konkreten Fertigungsprozess betrachtet werden und es sind keine allgemeingültigen Aussagen dazu möglich (Shellabear & Nyrhilä 2007).

2.3.1 Grundlegende Eigenschaften

Der schichtweisen Aufbau beim SLM hat eine Anisotropie der Festigkeitseigenschaften zur Folge (Brandl et al. 2008; Kruth et al. 2007, 2010; Sehrt 2010). Das entstehende Materialgefüge ist transversal isotrop und in Aufbaurichtung sind nach Zäh (2006) geringere Festigkeitswerte zu erwarten. Die

[6] Prozess ist dahingehend robust, dass die entstehenden Verformungen den Schichtauftrag und die Schichtverfestigung nicht blockieren.

vorherrschenden Temperaturgradienten begünstigen ein Kornwachstum über mehrere Schichten in Aufbaurichtung, was nach Kruth et al. (2004) zu einer Versprödung führt und die Ausbildung von Rissen begünstigt.

Während die statischen Eigenschaften für diverse Materialien bereits vielerorts untersucht und verstanden wurden (Delgado et al. 2012; Meier & Haberland 2008), herrscht bei den dynamischen Eigenschaften nach Kruth et al. (2010) noch Nachholbedarf. Sowohl die Restporosität als auch eine reduzierte Oberflächenqualität (Krauss et al. 2013; Rombouts, Froyen, Bourell et al. 2005) spielen in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle, da sie das Hochtemperaturverhalten und die Dauerfestigkeit beeinflussen (Emmelmann et al. 2012; Kruth et al. 2010)

2.3.2 Gefügeausbildung

Durch die schnelle Abkühlung aus der Schmelze[7] kommt es beim SLM zur Ausprägung eines feinkörnigen Gefüges (Ramos et al. 2002; Rombouts et al. 2006; Simchi & Pohl 2004), das nach Zhao et al. (2008) hohe Festigkeitswerte begünstigt. Die mikrostrukturellen Eigenschaften des späteren Werkstoffs ergeben sich aus den lokalen Abkühlbedingungen an der Fest-Flüssig-Grenze (vgl. Yadroitsev (2009)) und können anhand von Theorien zur Erstarrung beschrieben werden (vgl. Askeland & Fulay (2006) und K. Zhang et al. (2007)). Nach Bontha et al. (2006) sind hierbei vornehmlich die Abkühlrate v_a und der Temperaturgradient G_a entscheidend. Bei einem großen Verhältnis G_a/v_a steigt die Unterkühlung und es bildet sich bevorzugt ein dendritisches Gefüge aus. Bei einem kleineren Verhältnis G_a/v_a findet keine gerichtete Erstarrung mehr statt und es bilden sich gleichachsige Kornstrukturen aus (Yadroitsev 2009).

Gefügefehler Wie von anderen Schweißverfahren bekannt ist, kommt es auch beim SLM zur Ausbildung von Gefügefehlern in Form von Poren, Einschlüssen und Bindefehlern. Sie beeinflussen die mechanische Festigkeit in negativer Art und Weise, da es im Belastungsfall zu lokalen Spannungsüberhöhungen kommen kann. Durch die Gefügefehler wird zudem die relative Werkstoffdichte herabgesetzt (Kaufman & Rooy 2004). Die Werkstoffdichte wird daher in zahlreichen Untersuchungen als wichtiges Merkmal angesehen, das die mechanischen Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit der gefertigten Bauteile bestimmt (Hauser et al. 2002; Haynes 1991; Kruth et al. 2010; Spierings et al. 2011).

Poren entstehen durch die Konzentration von Gasen (z. B. Sauerstoff, Inertgas), sobald deren Löslichkeit beim Verfestigungsvorgang in der metallischen

[7] Die Temperaturgradienten bzw. Abkühlraten liegen in der Größenordnung von 10×10^4 K/mm bzw. 10×10^6 K/s (Branner 2011; Over 2003).

Schmelze sinkt. Ist die Viskosität der Schmelze hoch, können die Gase nicht mehr austreten und es kommt, unter Minimierung der Grenzflächenenergie, zur Ausbildung von sphärischen Poren (Gasporen)(Hasse & Brunhuber 2001; Rombouts et al. 2006). Davon zu unterscheiden sind schrumpfungsbedingte Poren und Lunker, die ihre Ursache in der Volumenabnahme beim Übergang von Schmelze zu Feststoff haben.

Einschlüsse sind Einlagerungen oder Fremdkörper im Gefüge, die nicht mit dem Grundwerkstoff verbunden sind. Hierbei handelt es sich z. B. um Schlacke (nichtmetallische Oxidrückstände) (Zenzinger et al. 2014).

Bindefehler entstehen, wenn der Pulverwerkstoff nicht vollständig aufgeschmolzen wird und die Schmelze benachbarte, bereits verfestigte Bereiche nicht benetzen kann. Der Grund hierfür liegt nach Yasa et al. (2011) in der unebenen bzw. rauen Oberfläche laserstrahlgeschmolzener Bauteile, die einen homogenen Schichtauftrag erschwert und ungenügende Durchschweißungen verursacht. Bindefehler können oxidbelegt sein (Kellerer & Werner 2011), zeichnen sich durch variable Morphologien aus und weisen teilweise scharfe Spitzen auf. Mit einer Dicke von 10 µm können sie sehr flach ausfallen und nur noch anhand von Schliffbildern nachgewiesen werden (Zenzinger et al. 2014).

2.3.3 Werkstoff Iconel 718

Grundlagen Iconel 718 (Werkstoffnummer 2.4668)[8] ist eine Nickelbasis-Superlegierung, die aufgrund ihrer guten Hochtemperatur- und Korrosionsbeständigkeit u. a. im Bereich der Luft- und Raumfahrt, der Energieerzeugung und der Chemie- und Erdölindustrie zum Einsatz kommt (Bargel & G. Schulze 2012). Sie zeichnet sich weiterhin durch eine gute Schweißeignung und eine hohe Zug-, Kriech- sowie Bruchfestigkeit aus. Infolgedessen wird sie für Gasturbinenschaufeln, Brennkammern, Turbolader und korrosionsbeständige Gehäuse- und Strukturteile bis zu einer Einsatztemperatur von 700 °C verwendet (Amato et al. 2012).

Die hohe Härte und Festigkeit des Werkstoffs erschweren die konventionelle, spanende Bearbeitung (Ezugwu et al. 1999; Nalbant et al. 2007) und verursachen einen hohen Werkzeugverschleiß bzw. gesteigerte Bearbeitungskosten. Die Legierung stellt daher aus ökonomischer Sicht ein gutes Beispiel für die mögliche Verarbeitung mit alternativen Fertigungsverfahren, wie dem SLM, dar. Die Bestandteile der Legierung nach DIN EN 10302 gehen aus Tabelle 2.2 hervor.

[8] Inconel ist ein Markenname der Firma Special Metals Corporation (vgl. Special Metals Corporation (2007)).

Tabelle 2.2: Legierungszusammensetzung von Iconel 718. Gewichtsprozent nach DIN EN 10302. Elemente P, S, B jeweils $\leq 0{,}015\,\%$.

Element	Ni	Cr	Fe (bal.)	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu	Si,Mn
min.	50	17	11,3	4,75	2,8	0,6	0,3	–	–	–
max.	55	21	24,5	5,5	3,3	1,2	0,7	1,0	0,3	0,35

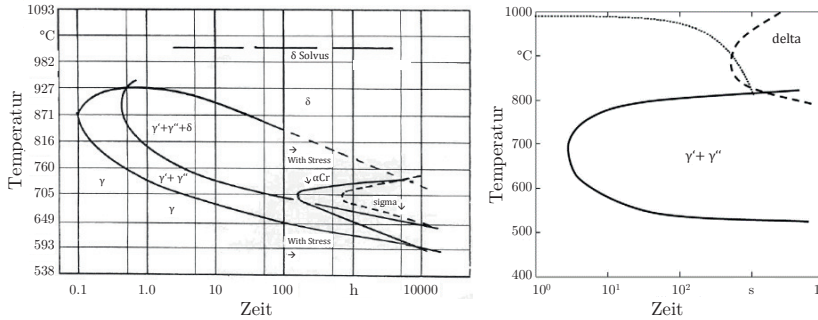
Iconel 718 ist eine ausscheidungshärtbare Legierung mit austenitischer Matrix auf Nickelbasis, deren Festigkeit maßgeblich von der Ausbildung der γ'- und γ''-Phasen bestimmt wird. Ihre Mikrostruktur und thermophysikalischen Eigenschaften sind u. a. von Antonsson & Fredriksson (2005), Cieslak et al. (1989), Göbenli (2005), Pottlacher et al. (2002) und Repper (2010) untersucht worden, sodass hier nur ein kurzer Überblick erfolgen soll.

Die umwandlungsfreie γ-Matrix liegt in kubisch-flächenzentrierter Konfiguration vor, in der die Elemente Cr, Fe, Nb und Mo als Mischkristallhärter wirken (Bürgel 2006). Durch gezielte Wärmebehandlungen entstehen die festigkeitsbestimmenden, intermetallischen Ausscheidungsphasen γ' bzw. γ''.

Die γ'-Phase Ni_3(Al,Ti) bildet sich ebenfalls in kubisch-flächenzentrierter Konfiguration aus und ist gleichmäßig in den Körnern verteilt. Durch ihre geringe Fehlpassung ist sie nach Bürgel (2006) besonders temperaturstabil. Da die Anteile der Elemente Al und Ti zugunsten des Elements Nb reduziert sind, spielt diese Phase nach Renhof (2007) nur eine untergeordnete Rolle.

Die metastabile γ''-Phase Ni_3(Nb,Al,Ti) ist raumzentriert-tetragonal und stellt den wesentlichen Beitrag zur Härte bei gleichzeitiger Erhaltung der Duktilität (Repper 2010). Bei hohen Temperaturen über längere Zeit wandelt sich die γ''-Phase in eine stabile δ-Phase um, die spröde ist und zum Festigkeitsverlust führt (Renhof 2007). Aus diesem Grund ist die Einsatztemperatur auf ca. 650 °C–700 °C begrenzt.

Zur Ausbildung dieser festigkeitsbestimmenden Phasen sind nach Special Metals Corporation (2007) zwei Wärmebehandlungen etabliert. Sie umfassen jeweils Lösungsglühen und mehrstündiges Auslagern bei 718 °C bzw. 760 °C. Abbildung 2.6a zeigt das isotherme Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild von Inconel 718, aus dem die Gefügeentwicklung hervorgeht. Um diese für schnelle Umwandelungen, wie sie beim SLM auftreten, zu prognostizieren, sind jedoch spezielle, kontinuierliche Umwandlungskurven notwendig (vgl. Abbildung 2.6b). Nach Niang et al. (2010) ist für sehr kurze Umwandlungszeiten anzunehmen, dass sich keine Ausscheidungen bilden und das Gefüge nur aus einer γ-Matrix mit übersättigten Legierungselementen besteht.



(a) Isothermes Umwandlungsschaubild nach Oradei-Basile & Radavich (1991) und Repper et al. (2010)

(b) Kontinuierliches Umwandlungsschaubild nach Niang et al. (2010)

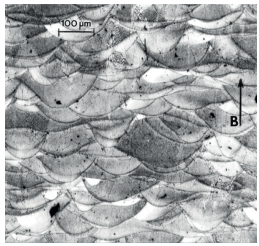
Abbildung 2.6: Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder für Iconel 718

Iconel 718 im laserstrahlgeschmolzenen Zustand Die mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften des Werkstoffs bei der Verarbeitung durch das SLM-Verfahren wurden u. a. von Amato et al. (2012), Benn & Salva (2010), Kelbassa et al. (2008) und Klocke & Wagner (2002) untersucht. Demnach ist die Charakteristik des additiv verarbeiteten Werkstoffs hinsichtlich Festigkeit und Duktilität, eine geeignete Wärmebehandlung vorausgesetzt, vergleichbar mit dem geschmiedeten Werkstoff (Wang et al. 2012; Zhao et al. 2008).

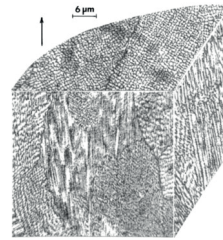
Die *Mikrostruktur* nach dem additiven Aufbau geht aus Abbildung 2.7 hervor. Darin zu erkennen sind die typischen Schmelzlinsen, die aus dem sukzessiven Aneinanderreihen einzelner Schmelzraupen entstehen. Sie besitzen, je nach Anlage und Prozessführung, eine Breite von typischerweise 75 µm–100 µm und erstrecken sich über mehrere Schichten (Amato et al. 2012). Es handelt sich nach Wang et al. (2012) um eine reguläre Mikrostruktur mit guter metallurgischer Verbindung, minimalen Defekten und feinen dendritischen Körnern. Die Körner sind regulär säulenförmig entlang der Aufbaurichtung angeordnet und erstrecken sich über mehrere Schmelzlinsen bzw. Schichten (Kellerer & Werner 2011). Die Textur ist in den hohen Abkühlraten beim SLM begründet und führt zu einem bevorzugten Kristallwachstum in <001>-Richtung (Zhao et al. 2008).

Nach Amato et al. (2012) bilden sich bereits in dem „wie gebaut“-Zustand scheibchenförmige γ''-Ausscheidungen aus. Die mikrostrukturelle Ausprägung ist immer im Zusammenhang mit den Aufbauparametern zu sehen. So führt z. B. „schnelles Bauen“ bei hohen Schichtdicken nach Kellerer & Werner (2011) zu kleineren Körnern, deren Ausrichtung von der Baurichtung gering-

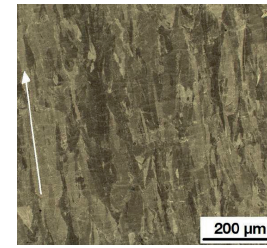
fügig abweicht. Die Wahl des Inertgases (Argon oder Stickstoff) hat dagegen keine Auswirkung auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften (Amato et al. 2012).



(a) Schmelzlinsen in Schliffebene parallel zur Aufbaurichtung (Amato et al. 2012)



(b) Säulenförmige Körner mit dendritischer Struktur (Amato et al. 2012)



(c) Kornwachstum über mehrere Schichten (Kellerer & Werner 2011)

Abbildung 2.7: Mikrostruktur von strahlgeschmolzenem Iconel 718 im „wie gebaut"-Zustand. Der Pfeil kennzeichnet die Aufbaurichtung.

Während die *Festigkeitskennwerte* in dem „wie gebaut"-Zustand geringer als bei Schmiedeverfahren ausfallen, kann die Duktilität des Werkstoffs größer sein (Wang et al. 2012). Durch geeignete Wärmebehandlungen ist nach Zhao et al. (2008) aber eine deutliche Steigerung Erstgenannter zu erreichen, da die γ'- und γ''-Phasen ausgeschieden werden. Ähnliches gilt auch für die *Bruchdehnung* und die *Härte*, die nach Amato et al. (2012) durch Heißisostatisches Pressen und Glühen bei geringfügiger Rekristallisation auf Schmiedeeigenschaften gesteigert werden können. Im Gegensatz zu den Festigkeitseigenschaften ist die Härte nach Wang et al. (2012) nicht richtungsabhängig.

Die Materialkennwerte für hohe Temperaturen und die Langzeitfestigkeiten sind in der Literatur noch nicht umfänglich untersucht. Für die verwandte Superlegierung Inconel 738C wurde von Rickenbacher et al. (2013) jedoch gezeigt, dass die Kriecheigenschaften für Proben entlang der Aufbaurichtung besser ausfallen als für Proben senkrecht zur Aufbaurichtung. Die Zeitstandfestigkeit ist jedoch geringer als beim Gusswerkstoff. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die diskutierten Werkstoffeigenschaften.

Tabelle 2.3: Werkstoffeigenschaften von Inconel 718 im Vergleich

Zustand	Zug-festigkeit MPa	Streck-grenze MPa	Bruch-dehnung %	E-Modul GPa	Härte HRC
SLM[a]	980	634	27	160	30
SLM[b]	1137	889	19	204	37
SLM[c]	1120	830	25	-	30
SLM WB[d]	1241	1034	12	170	47
SLM WB[e]	1280	1102	10	201	39
SLM HIP, WB[f]	1140	850	28	-	33
Geschmiedet[g]	1275	1030	12	200	34

[a] „wie gebaut“, (min.) (EOS GmbH 2011)
[b] „wie gebaut“, (mittel) (Wang et al. 2012)
[c] „wie gebaut“, (mittel) (Amato et al. 2012)
[d] wärmebehandelt nach AMS 5662, (min.) (EOS GmbH 2011)
[e] wärmebehandelt in Anlehnung an AMS 5662, (min.) (Wang et al. 2012)
[f] Heißisostatisches Pressen (HIP), geglüht, (mittel) (Amato et al. 2012)
[g] AMS 5662G, (min.) (Appa Rao et al. 2004; Special Metals Corporation 2007)

2.4 Qualitätssicherung und Prozessüberwachung

In diesem Abschnitt wird die Prozessüberwachung mit Fokus auf Fertigungsprozessen in den allgemeinen Kontext der Qualitätssicherung bzw. des Qualitätsmanagements eingeordnet. Nachdem ein grundlegender Überblick über vorhandene Konzepte und die Methoden der prozessnahen Qualitätssicherung gegeben wurde, erfolgt eine Diskussion des aktuellen Standes der Wissenschaft und Technik bei der Qualitätssicherung in der additiven Fertigung.

2.4.1 Grundlegendes

Nach DIN EN ISO 8402 wird die Qualität als *„Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“* definiert. Das Qualitätsmanagement (QM) beschreibt in diesem Zusammenhang alle organisatorischen Maßnahmen zur Verbesserung der Prozessqualität, der Leistungen und der Produkte. Das heutige QM kann in allen Unternehmensbereichen und Geschäftsprozessen angewandt werden und wird als Teil einer Unternehmenskultur verstanden. Die Qualitätslenkung fasst alle Maßnahmen zusammen, die vorbeugend, überwachend oder korrigierend in den Fertigungsprozess eingreifen, um Qualitätsanforderungen zu erfüllen. Davon zu unterscheiden ist die hier betrachtete Qualitätssicherung, die per Definition *„die Summe aller Maßnahmen ist, um eine konstante Produktqualität sicherzustellen“* (vgl. DIN EN ISO 8402). Sie dient daher im Speziellen der Schaffung von Vertrauen, dass die festgelegten

Qualitätsanforderungen realisiert werden. In diesem Zusammenhang stehen diverse Werkzeuge zur Verfügung, wobei der Prüfdatenerfassung und Messtechnik eine zentrale Rolle zukommt.

2.4.2 Qualitätssicherung im Fertigungsprozess

Unter der Qualitätssicherung im Fertigungsprozess werden alle Maßnahmen verstanden, die während des Fertigungsprozesses zum Einsatz kommen, um die Qualität des Prozesses und des erzeugten Produktes zu überwachen und zu prüfen. Darüber hinaus dient sie dazu, die Informationsgehalte aus prozessbegleitenden Messdaten und aus der nachfolgenden Bauteilprüfung miteinander zu korrelieren und diese vor dem Hintergrund einer stetigen Prozessverbesserung zu bewerten. Der Grundgedanke der Qualitätssicherung besteht darin, dass Qualität nur durch beherrschte Prozesse realisiert werden kann und nicht durch Prüfung des Endproduktes (Haist & Fromm 1991).

Eine im industriellen Umfeld gebräuchliche Charakterisierung der Prozessqualität ist durch die Prozessfähigkeit und durch die Prozesszuverlässigkeit gegeben: Ein Prozess gilt dann als fähig, wenn dessen Streuung ausschließlich durch zufällige Einflüsse hervorgerufen wird, sämtliche auftretenden Toleranzen stabil innerhalb vordefinierter Grenzen liegen und Werkzeuge zur Beeinflussung der Lage, Form und Streuung existieren (DIN ISO 21747).

Die *Prozessfähigkeit* C_{pk} bewertet sowohl die Lage des Mittelwerts $\bar{x}$ als auch die Streuung σ des Prozessergebnisses relativ zu den festgesetzten Grenzen (oberer Grenzwert (OGW), unterer Grenzwert (UGW)) und ist gegeben durch (vgl. Abbildung 2.8):

$$C_{pk} = \min\left[\frac{OGW - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - UGW}{3\sigma}\right] \tag{2.4}$$

Die *Prozesszuverlässigkeit* ist dagegen ein zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft und bestimmt nach Leischnig (2009) die Rentabilität einer innerbetrieblichen Wertschöpfungskette. Sie lässt sich durch die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) bemessen und setzt den Anteil der Prozessdurchführungen mit positivem Ergebnis zu der geplanten Stückzahl in Beziehung. Eine hohe Prozessfähigkeit und -zuverlässigkeit sind notwendig, um die erforderliche Produktqualität bei einer möglichst geringen Ausschussrate zu erreichen. Nachfolgende Methoden haben sich zur Steigerung und Sicherstellung der Produktqualität im Sinne einer produktionsbegleitenden Qualitätssicherung etabliert.

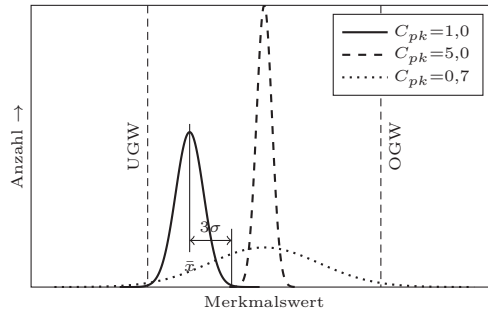


Abbildung 2.8: Prozessfähigkeit für normalverteilte Prozessergebnisse in Anlehnung an Zäh, Lindemann et al. (2011). Der Prozess gilt als fähig, wenn der C_{pk}-Wert eine definierte Schwelle übersteigt.

Statistische Versuchsmethodik Die statistische Versuchsmethodik (SVM) ist nach Kleppmann (2009) das eigentliche Werkzeug zur Verbesserung von Systemen im Rahmen einer Qualitätslenkung. Sie wird verwendet, um die strukturellen Abhängigkeiten zwischen Ein- und Ausgangsgrößen im Zusammenwirken mit anderen Einflussgrößen zu analysieren und Prozesse einzustellen. Nach W. Geiger & Kotte (2008) werden drei Bereiche der statistischen Versuchsmethodik unterschieden: die klassische Versuchsmethodik basierend auf Auswahl- und Regressionsplänen, die Ansätze nach Shainin und die Ansätze nach Taguchi. Bei allen Ansätzen wird zwischen Steuer- und Störgrößen unterschieden. Störgrößen sind Größen, die auf den Prozess einwirken und entweder gar nicht oder nur mit hohem Aufwand zu kontrollieren sind. Während die Steuergrößen festgelegt, ihre Einstellung optimiert und ihre Werte gemessen werden können, führen die Störgrößen zu Schwankungen der Ausgangsgrößen und somit zur Abweichung von der geplanten Qualität.

Bei der SVM werden die Effekte verschiedener Einflussgrößen auf die Zielgrößen über Experimente quantitativ ermittelt und ihre Signifikanz überprüft. Aus den Ergebnissen lässt sich ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Größen und deren Wechselwirkungen in Form von Regressionspolynomen ableiten (Kleppmann 2009).

Im Gegensatz zu einem vollfaktoriellen Versuchsplan, bei dem alle Kombinationen von Parametereinstellungen untersucht werden, kann der Versuchsaufwand durch den Einsatz von teilfaktoriellen Versuchsplänen maßgeblich reduziert werden. Das Ziel der SVM besteht also darin, die Information über das zugrunde liegende System bzw. den zugrunde liegenden Prozess unter Minimierung des Versuchsaufwandes zu maximieren.

Statistische Prozesslenkung Während Qualitätsregelkreise ebenenintern und ebenenübergreifed eingesetzt werden, dient die statistische Prozesslenkung, *Statistical Process Control* (SPC), der maschinennahen Regelung von Qualitätsmerkmalen unter Anwendung statistischer Methoden (vgl. Zäh, Lindemann et al. (2011)). Auf Basis eines optimierten Prozesses führen Beobachtungen dazu, eventuell Eingriffe zu unternehmen. Die Prozessabweichungen werden fortlaufend mittels sog. Qualitätsregelkarten überprüft, die Warn- und Eingriffsgrenzen für die Abweichungen und Merkmale beinhalten (Wildemann 1996) (vgl. Abbildung 2.9). Die Stichprobenhäufigkeit und der Umfang sind entsprechend dem Prozess zu wählen. Im Vergleich zur statistischen Versuchsmethodik kann die SPC nicht zur Prozessoptimierung verwendet werden. Dagegen eignet sie sich für eine Fehlerfrüherkennung im Fertigungsprozess, wenn nachfolgende Voraussetzungen erfüllt sind (Leischnig 2009):

- Die zu überwachenden Merkmalswerte der Maschine können reproduzierbar und zuverlässig bestimmt werden.
- Die Werte indizieren zweifelsfrei und konsistent das Merkmal.
- Die Anzahl der Einzelwerte pro Periode erlaubt die Rekonstruktion der abzubildenden Charakteristik.

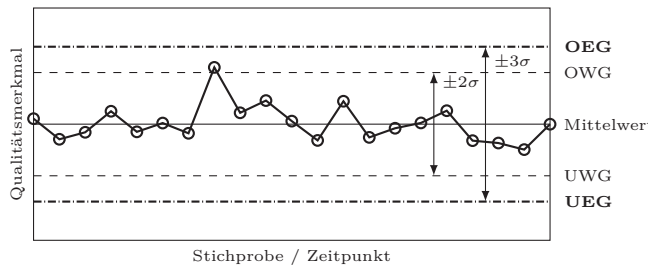


Abbildung 2.9: $\bar{X}$-Qualitätsregelkarte mit Mittelwerten einer Stichprobe sowie unterer und oberer Warn-/Eingriffsgrenze in Anlehnung an A. Schulze & E. Dietrich (2008).

Zustandsüberwachung Die Zustandsüberwachung verfolgt das Ziel, Fehler frühzeitig zu erkennen und Folgeschäden zu vermeiden. Der Zustand einer Betrachtungseinheit, hier die Fertigungsanlage, wird in ihren Parametern quantifiziert bzw. qualifiziert (Sturm & Förster 1990). Darüber hinaus wird die Zustandsüberwachung genutzt, um Maßnahmen gezielt einzuleiten. Wenn die Vorhersage einer Störung vor ihrem Eintritt möglich ist, entfallen ungeplante, störungsbedingte Ausfälle vollständig (Leischnig 2009). Der Einsatz von Prognosealgorithmen ermöglicht die Vorhersage eines Über- oder Unterschreitens von Warn- und Eingriffsgrenzen, die im Rahmen der SPC festgelegt wurden. Hierbei kommen Methoden der Trendanalyse und Extrapolation zum Einsatz. Der Zustand kann entweder unmittelbar überwacht oder über komplexe

Merkmale, die eine zusätzliche Interpretation der Eingangsdaten erfordern, ermittelt werden.

Methoden der Prozessoptimierung Die Prozessoptimierung befasst sich mit der kontinuierlichen Verbesserung der Effizienz einzelner Prozessschritte oder der gesamten Prozesskette. Aufgrund der Vielzahl an variablen Größen müssen vor einer Optimierung die wichtigsten Größen ermittelt werden, z. B. durch eine Prozessmodellierung oder mithilfe der SVM. Das grundsätzliche Ziel ist eine verbesserte Lösung hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität.

Die Ansätze zur Prozessoptimierung lassen sich in mathematische und empirische Methoden unterteilen. Als Grundlage für die mathematische Optimierung dienen Modelle und Nebenbedingungen, die die betrachtete Thematik vereinfacht abbilden. Sowohl für lineare als auch für nicht-lineare Problemstellungen existieren Lösungsmethoden (Eisen 2009). Die empirischen Ansätze zur Prozessoptimierung sind im Wesentlichen durch die SVM gegeben. Sie basieren auf dem Informationsgewinn durch Durchführung von Experimenten und können hinsichtlich Effektivität, Zeit, Kosten, Komplexität und Einsatzbereich unterschieden werden (Kleppmann 2009).

2.4.3 Qualitätssicherung in der additiven Fertigung

Für die additive Fertigung existieren sowohl allgemeine, prozesskettenübergreifende Ansätze für das Qualitätsmanagement als auch spezielle Ansätze für die Qualitätssicherung einzelner Prozessschritte. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die allgemeinen Methoden gegeben, die neben der Charakterisierung auch die Verbesserung der Qualität additiv gefertigter Komponenten zum Ziel haben. Die nach Unterabschnitt 2.2.2 direkt dem *In-Process* zuzuordnenden Ansätze werden aufgrund ihrer besonderen Relevanz für die vorliegende Arbeit im nachfolgenden Abschnitt 2.5 abgehandelt.

Normative Grundlagen Die normativen Grundlagen des Qualitätsmanagements in der additiven Fertigung sind durch die Richtlinien VDI 3405, VDI 3405-1 und VDI 3405-2 gegeben, die auf lange Sicht in die internationalen Normen ISO/DIS 17296-1 ff. überführt werden (Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2014). Die VDI-Richtlinie 3405 definiert allgemeine Qualitätsmerkmale für additiv hergestellter Komponenten hinsichtlich diverser Anforderungskriterien und unterscheidet die Bauteilarten *Prototyp*, *Anwendung* und *Endprodukt*. Zur Überwachung der Qualität während des Prozesses (*In-Process*) schlägt die Richtlinie eine Protokollierung und statistische Auswertung relevanter Daten vor, ohne einen konkreten Umfang zu definieren. Für die Beurteilung und Dokumentation des Prozesses wird der regelmäßige Aufbau von Prüfkörpern empfohlen, die anwendungsspezifisch auszulegen sind.

Die Richtlinie VDI 3405-2 konkretisiert viele der Anforderungen aus der Richtlinie VDI 3405 hinsichtlich Prüfverfahren, Oberflächengüte und Toleranzen. Es werden Empfehlungen zur Prüfung des Ausgangswerkstoffes, zur Bestimmung der Bauteildichte, zur Messung statischer und dynamischer Festigkeitswerte sowie zur Analyse von metallografischen Schliffbildern gegeben. Die Qualitätssicherung beschränkt sich jedoch ausschließlich auf die dem Prozess nachgelagerten Methoden. Als wesentliche Verfahren für die Ermittlung von Qualitätsgrößen additiv hergestellter Bauteile werden durch die Richtlinie u. a. der Zugversuch, der Biegeversuch, der Umlaufbiegeversuch und der Kerbschlagbiegeversuch vorgeschlagen. Demgegenüber eignen sich als zerstörungsfreie Methoden u. a. die ebenfalls nachgelagerte Eindringprüfung, die Durchstrahlprüfung und die Ultraschallprüfung. Hinsichtlich der Maßhaltigkeit können für additiv hergestellte Bauteile die Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 angewandt werden.

Obwohl die Richtlinie VDI 3405-1 ihren Ursprung in der additiven Fertigung von Kunststoffbauteilen hat, wird hier die Qualitätssicherung in Form einer Prozessüberwachung gefordert, die auch auf die Fertigung metallischer Bauteile übertragbar ist. Die Richtlinie unterscheidet drei Eingriffstiefen: Die Kategorie *„Überwachungsintervall und Anlagenzertifizierung“* hat den geringsten Aufwand und erfordert die regelmäßige Durchführung von Überwachungen z. B. im Intervall der geplanten Wartungen. Unter der Kategorie *„Überwachung pro Bauprozess“* wird die Überprüfung von Prozessparametern/-bedingungen am Anfang oder Ende eines jeden Bauprozesses verstanden. Den höchsten Aufwand erfordert die Kategorie *“Kontinuierliche Überwachung für jede Schicht“*: Demnach erlaubt erst die Überwachung jeder Schichtentstehung einen direkten Rückschluss auf die Qualität der Bauteile (VDI 3405-1). Auf die in der Richtlinie gegebenen Empfehlungen für die zu überwachenden Kenngrößen bzw. Prozessparameter und -bedingungen wird in Kapitel 6 eingegangen, da sie teilweise für die schichtweise Überwachung im Metallbereich relevant sind.

QM-Systeme und Methoden Im Stand der Technik sind über die normativen Grundlagen hinaus weitere Ansätze zur Qualitätssicherung in der additiven Fertigung, teilweise auf Basis von nicht quantifizierten Empfehlungen, gegeben. In Eisen (2009) wird ein Qualitätsmanagementkonzept erarbeitet, das Vorschläge in Form von Maßnahmen und Regelgrenzen für die Teilbereiche *Pre-*, *In-* und *Post-Process* einer additiven Prozesskette gibt. Mit einer stückzahlabhängigen Prüfplanung wird die Anwendbarkeit für die Einzel-, die Kleinserien- und die Serienfertigung ermöglicht. Als Basis dient ein Strahlschmelzprozess, der mit möglichst geringem Aufwand, der sog. „5-Plattenstrategie“[9], zuvor optimiert wurde. Der Fokus wird in der Entwicklung stabiler Prozessparameter mit den Teilzielen einer hohen Bauteildichte, einer präzisen Abbildungsgenauigkeit

[9] Die Optimierung erfolgt anhand von 5 vordefinierten Bauaufträgen, die jeweils einen Bauträger (Grundplatte) erfordern.

und einer guten Oberflächenqualität gesehen. Zur Überwachung der Qualität während des Prozesses (*In-Process*) wird aus Sicht des Anlagenherstellers die Prüfung der aufgetragenen Einzelschichten durch Fotoaufnahmen einer detaillierten Überwachung des Schmelzbades vorgezogen.

Im Gegensatz dazu schlagen Schmid & Levy (2012) ein QM-System auf Grundlage einer Einteilung nach *Anlage*, *Material*, *Produktion*, *Teil*, *Los* und *Nacharbeit* vor. Der wesentliche Mehrwert ist in der Definition von sog. „Q-activities“ (qualitätssichernde Maßnahmen) zu sehen, für die eine Frequenz der Durchführung und die Verantwortlichkeit, abhängig von obiger Einteilung, festgelegt werden.

Ein ergänzender Lösungsansatz für die allgemeingültige Qualitätsbewertung von additiven Fertigungsverfahren ist in der Einführung eines Kennzahlensystems auf Basis von Prüfkörpergeometrien zu sehen (Reinhardt & Witt 2012). Die Qualitätsmerkmale werden hier nach „Geometrische Forderungen“, „Gestalterische Forderungen“, „Form-, Lage- und Maßhaltigkeit“, „Schrift“, „Oberflächengüte“ und „Anmutung“ unterschieden. Obwohl sämtliche Merkmale des Prüfkörpers erst nach dem Aufbauprozess bestimmt werden können und nur ein indirekter Rückschluss auf die zu erwartende Gestalttreue von Serienbauteilen gegeben ist, eignet sich dieser Ansatz für eine Langzeitdokumentation des Prozesses.

Qualitätssteigerung Ansätze zur Prozessoptimierung und Qualitätssteigerung in der additiven Fertigung lassen sich in zahlreichen Veröffentlichungen finden. Skrynecki (2010) stellt einen kundenorientierten Ansatz vor, der noch vor dem *Pre-Process* im Bereich der Produktentwicklung anzusiedeln ist. Der Ansatz dient als Grundlage einer kundenorientierten Analyse und Optimierung des Strahlschmelzprozesses. In Eschey (2013) wird dagegen ein Verfahren entwickelt, das die anlagenspezifische, positionsabhängige Schwindung von Kunststoffbauteilen durch eine Vordeformation der Bauteile kompensiert. Mithilfe von Probegeometrien wird die Schwindung in einem Bauraum quantitativ erfasst und durch eine Freiformdeformation der Bauteilgeometrie für nachfolgende Bauaufträge berücksichtigt. Weitere Methoden zur direkten Optimierung des zugrunde liegenden Prozesses sind bei Meindl (2005), Meiners (1999), Over (2003), Sehrt (2010) und van Elsen (2007) auf Basis von Dimensionsanalysen, statistischer Versuchsplanung und genetischen Algorithmen zu finden.

2.4.4 Grundlagen der Prozessüberwachung

Für die Qualitätssicherung von Fertigungsprozessen lassen sich die angewandten Methoden hinsichtlich ihrer zeitlichen Einordnung bezüglich des Prozesses und hinsichtlich der verwendeten Hilfsmittel und Sensoriken unterscheiden.

In Offline-Verfahren werden Messdaten, die Auskunft über die Qualität des Werkstücks geben können, vor und/oder nach dem Fertigungsprozess ermittelt. Bei Online-Verfahren dagegen findet die Ermittlung qualitätsrelevanter Größen während des Fertigungsprozesses (*In-Process*), entweder zu bestimmten Zeitpunkten oder kontinuierlich, statt. Sie bieten die Grundlage dafür, aktiv in einen Prozess einzugreifen, Prozessparameter zu regeln und in gewissen Grenzen die Werkstückqualität zu kontrollieren. Unter der Prozessüberwachung werden in diesem Zusammenhang alle prozessnahen Maßnahmen verstanden.

Signale, die mittels Sensoriken aufgenommen wurden, wie beispielsweise Bilder, Messkurven oder Spektren, müssen durch geeignete Systeme verarbeitet und ausgewertet werden, um sie nutzbar zu machen. Nach Leischnig (2009) besteht die Aufgabe der Datenerfassung und -verarbeitung in der Generierung kontextbezogener Informationen. Durch sie werden Daten in konkret nutzbare Aussagen überführt und der Aufbau von applizierbarem Wissen unterstützt. Die Vorgehensweise bei der Prozessüberwachung besteht demnach aus den Schritten der sensorischen Erfassung, der Datenverarbeitung zur Informationsgewinnung, der anschließenden Bewertung und der Ausgabe (vgl. Abbildung 2.10). Das Ziel der Verarbeitung ist es, die Informationsdichte bzw. die Kenntnis über den aktuellen Prozesszustand durch geeignete Analyse- und Verarbeitungsmethoden zu erhöhen und beschreibende Kennzahlen bzw. Qualitätsindikatoren abzuleiten. Nach Sonntag & Bergmann (1997) ist für die Extraktion wichtiger Merkmale und für die Auflösung der Komplexität die Diagnosekompetenz, die Systemkenntnis und das Erfahrungswissen des Betrachters bestimmend.



Abbildung 2.10: Vorgehensweise bei der Prozessüberwachung

Für die Auswertestrategien von Sensordaten bestehen nach Kogel-Hollacher (2008) nahezu keine Beschränkungen. Dies führt dazu, dass die Verfahren zur Signalverarbeitung und Fehlererkennung mehrheitlich applikationsspezifisch entwickelt werden. Von ihrer grundlegenden Struktur sind sie sich jedoch ähnlich. Nach Wiesemann (2004) basieren sie auf der Annahme, dass konstante Qualität nur erreicht werden kann, wenn für jeden Bearbeitungsschritt wiederholbare, konstante Bedingungen in der Wechselwirkungszone vorherrschen. Dies führt in vielen Anwendungen dazu, dass die aus dem Prozess abgeleiteten Qualitätsindikatoren bzw. Signalwerte mit Referenzkurven verglichen werden, um eine Bewertung herbeizuführen. Die Referenzkurven wiederum entsprechen einem „Fingerabdruck“ des Prozesses, der spezifisch für das Überwachungssystem und die Applikation ermittelt werden muss und die geforderten Quali-

tätsmerkmale des Produktes erfüllt (Kogel-Hollacher 2008; Wiesemann 2004).

Sensorik Den Ausgangspunkt für eine Prozessüberwachung stellt die verwendete Sensorik dar. Neben sensorspezifischen Leistungsmerkmalen ist für eine In-Process-Überwachung die Frequenz ausschlaggebend, mit der Prozessdaten aufgenommen und ausgewertet werden müssen, um eine detaillierte Qualitätssicherung bzw. eine Regelung sinnvoll zu ermöglichen. Für das SLM sind Prozessgeschwindigkeiten (Scangeschwindigkeit des Laserstrahls) im Bereich von einigen Metern pro Sekunde üblich. Wird eine Überwachung des Schmelzbades mit typischen Abmessungen im Zehntelmillimeterbereich angestrebt, erfordert dies eine Datenaufnahme- bzw. Verarbeitungsrate im kHz-Bereich. Liegt das Interesse dagegen lediglich auf dem Prozessergebnis einer Schicht, ist mit deutlich geringeren Raten, die sich aus der Schichtzeit ableiten, zu rechnen. Unabhängig davon ist die maximale Frequenz, mit der Daten sinnvoll aufgenommen und ausgegeben werden können, immer durch die sensorspezifische Signalanstiegszeit limitiert.

Verarbeitung und Extraktion Die Gewinnung von Informationen über den vorliegenden Prozesszustand erfolgt im Rahmen der Datenverarbeitung durch Extraktion von Kennzahlen. Sie stellen verdichtete Maßgrößen quantitativ erfassbarer Sachverhalte dar und dienen dazu, als Indikatoren den Zustand eines komplexen Systems zu bemessen (E. Dietrich et al. 2007; Leischnig 2009). Um Indikatoren schließlich als Qualitätsindikatoren verwenden zu können, müssen sie einen funktionalen Zusammenhang mit den Qualitätsmerkmalen der Bauteile bzw. des Prozesses aufweisen (vgl. Unterabschnitt 2.5.1). Darüber hinaus sind nach Wiesemann (2004) folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Vollständigkeit: Eindeutige funktionale Abhängigkeit einer begrenzten Anzahl an Qualitätsindikatoren von allen relevanten Qualitätsmerkmalen.
- Online-Bewertung: Für jeden Qualitätsindikator muss eine Bewertungsmethode online (d. h. während des Prozesses) verfügbar sein.
- Intrinsische Abhängigkeit: Qualitätsindikatoren dürfen nicht von intrinsischen Prozessparametern abhängig sein, die ihrerseits nicht qualitätsrelevant sind.
- Rauschverhalten: Der Rauschanteil des verarbeiteten Sensorsignals muss signifikant geringer als die Signalvariation sein, die bei relevanten Prozessunregelmäßigkeiten entsteht.

Hinsichtlich der Qualitätssicherung bzw. des Qualitätsmanagements kommt den Qualitätsindikatoren eine weitere Bedeutung zu. Sie können als Kennzahlen[10]

[10] Der Begriff Kennzahl wird im weiteren Verlauf als relative Größe verstanden, die einen Kennwert bzw. Indikator in das Verhältnis zu einem vorgegebenen Referenzwert setzt.

verwendet werden, die nach E. Dietrich et al. (2007) die Qualitätssituation darstellen, Qualitätsaktivitäten lenken, Prozessschwachstellen aufdecken, Potenzialfelder aufzeigen und als Entscheidungsgrundlage für Qualitätsverbesserungsmaßnahmen dienen.

Für die Prozessüberwachung von Laserfertigungsprozessen kommen zunehmend kamerabasierte Systeme zum Einsatz (vgl. Becker (2013), Dudeck (2013), Kogel-Hollacher (2008) und Müller-Borhanian (2009)). Die industrielle Bildverarbeitung eröffnet dabei zahlreiche Möglichkeiten, um Merkmale[11] zu extrahieren bzw. qualitätsrelevante Indikatoren abzuleiten. Zu den bekannten Bildverarbeitungsalgorithmen zählen u. a. die Schwellwertbildung, die Kantendetektion, morphologische Operationen, die Momentbildung zur Ableitung von Lage- und Formparametern und die Objekterkennung. An dieser Stelle wird auf eine detaillierte Beschreibung dieser Methoden verzichtet und stattdessen auf Standardwerke verwiesen (z. B. Demant et al. (2002)).

Jedes Merkmal generiert aus einem oder mehreren Kamerabildern letztlich einen Signalwert bzw. ein Signal, das analog zu eindimensionalen Sensoriken (vgl. Unterabschnitt 2.5.1) analysiert und bewertet werden kann. Um die anfallenden Datenmengen in möglichst kurzer Zeit zu bewältigen, sind schnelle Softwaresysteme oder angepasste Hardwarelösungen notwendig. Für Laseranwendungen werden sog. FPGA[12] eingesetzt, die die Rohdaten von Kamerasystemen verarbeiten und Merkmale im kHz-Bereich extrahieren (Craeghs et al. 2010; Stache et al. 2008). Alternativen, z. B. für Anwendungen in der Echtzeit-Regelung, sind durch angepasste Halbleiterbausteine gegeben, auf denen die Bildaufnahme und -verarbeitung parallel erfolgt (vgl. Abt et al. (2008)).

Analyse, Bewertung und Entscheidung Eine Analyse und Bewertung der gewonnenen Signalkurven bzw. Qualitätsindikatoren ist im letzten Schritt der Prozessüberwachung notwendig, um eine Entscheidung über den vorliegenden Zustand herbeizuführen. Die Entscheidung besteht im Wesentlichen in einer Einteilung in Klassen (z. B. i.O. / n.i.O; gut / schlecht), Fehlerbilder (z. B. Abriss, erhöhte Porosität) oder quantitative Qualitätsmerkmale. Die Wahl der Grenzen im (mehr-)dimensionalen Entscheidungsraum begründet dann die maximale Detektionssicherheit oder die minimale Fehlalarmrate bei reduzierter Detektionssicherheit (Wiesemann 2004).

Signalverarbeitungsmethoden, die sich zur Analyse und Bewertung von Kurvencharakteristika sowie deren Klassifikation eignen, werden bei zahlreichen Autoren diskutiert. Nachfolgend soll in Anlehnung an Wiesemann (2004)

[11] Bei Merkmalen handelt es sich um eine komprimierte Form von Bildinformationen (Kombination aus Pixelauswahl und Auswertealgorithmus.). Die Merkmalsextraktion ermöglicht quantitative und qualitative Aussagen über Bildinhalte sowie die Einordnung von Objekten in Klassen.

[12] *Field-programmable Gate Array* (FPGA)

ein kurzer Überblick gegeben werden. Bei der *Zeitbereichsanalyse* werden Signalkurven abgeleitet, integriert oder gefiltert und/oder deren Signalwerte zu beliebigen Zeitpunkten ausgewertet. Nach Kogel-Hollacher (2008) kann die Zeitbereichsanalyse eines Sensorsignals gegenüber prozesseigenen Störungen (Bearbeitungssystem und Detektionssystem) sowie Störungen aus der Umgebung empfindlich reagieren, auch wenn die Störungen selbst keine Relevanz für die Bearbeitungsqualität aufweisen.

In der *Frequenzbereichsanalyse* wird das Leistungsspektrum eines Signals im Frequenzraum betrachtet und mit Referenzverteilungen verglichen. Nach Wiesemann (2004) kann durch diese Methoden in einigen Applikationen das Signal-Rausch-Verhältnis erhöht und die Charakteristik der Qualitätsindikatoren verbessert werden.

Die Analyse anhand *statistischer Verfahren* erfolgt durch die Ableitung von statistischen Parametern (Erwartungswerte, Streuung, Symmetrie etc.), die die zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ereignisse beschreiben. Da die Methoden zeitaufwendig sind und mehrere Einzelversuche benötigen, um statistisch abgesicherte Aussagen zu treffen, werden sie nach Kogel-Hollacher (2008) v. a. in der Nachverarbeitungsphase eingesetzt.

Für die finale Bewertung und Klassifikation des Prozessergebnisses sind verschiedene Methoden bekannt. Darunter fallen die Hauptkomponentenanalyse, statistische Methoden, neuronale Netzwerke, die Fuzzy-Logik oder musterbasierte Verfahren. In Letzteren wird die Signalsequenz mit Referenzmustern verglichen und deren Abweichung anhand von Ähnlichkeitsmaßen quantifiziert. Daraus leiten sich die vielfach etablierten Hüllkurven- und Toleranzbandverfahren ab, bei denen die Prozessqualität anhand der Lage der Signalkurve bewertet wird (vgl. Huber (2014) und Müller-Borhanian (2009)). Bei mehrdimensionalen und komplexen Systemen ist der Einlern- bzw. Adaptionsaufwand hoch, sodass hier bevorzugt selbstlernende und selbstoptimierende Systeme zum Einsatz kommen (vgl. Dudeck (2013)). Für die intelligente Prozesskontrolle kann darüber hinaus eine Kombination aus Fuzzy-Logik und Wahrscheinlichkeitsmatrizen angewandt werden (vgl. L. Li (1989) und Steen & Mazumder (2010)).

2.5 In-Process-Überwachung

Für Laserfertigungsprozesse sind zahlreiche Methoden der Online-Überwachung und -kontrolle bekannt und deren Umsetzungen als kommerzielle Systeme erhältlich (S. Dietrich 2009; Steen & Mazumder 2010). Während die Grundlagen der In-Process-Überwachung beim Laserstrahlfügen, -schneiden und -bohren schon früh geschaffen wurden, existieren für die noch jungen pulverbettbasierten, additiven Fertigungsverfahren nur wenige Ansätze für die Qualitätsüberwachung bzw. Prozessregelung. Nachfolgend soll ein Überblick

über allgemeine Qualitätssicherungsansätze und Sensoriken in der Lasermaterialbearbeitung gegeben werden. Im Anschluss erfolgt eine Fokussierung auf das Laserstrahlschmelzen.

2.5.1 Prozessüberwachung in Laserfertigungsprozessen

Die verfügbaren Systeme lassen sich je nach Detektionsmechanismus in ein-, zwei- oder dreidimensionale Sensoriken unterteilen. Eindimensionale Sensoriken basieren in den meisten Fällen auf Fotodioden, die Prozessemissionen aus einem Bereich der Prozesszone aufnehmen und ein über diesen Bereich gemitteltes Signal ausgeben (Norman et al. 2008). Zweidimensionale (kamerabasierte) Systeme bieten dagegen den Vorteil einer (direkten) Ortsauflösung und damit die Grundlage für eine Bildauswertung der Prozesszone. Bei dreidimensionalen Sensoriken werden Prozessemissionen winkelabhängig aufgenommen, um beispielsweise den Abstand des Bearbeitungswerkzeugs zum Werkstück zu regeln (S. Dietrich 2009). Prinzipiell tragen alle Prozessemissionen ein Potenzial, den aktuellen Prozesszustand zu beschreiben, der entscheidend für die resultierende Qualität ist (Wiesemann 2004). Die Identifikation geeigneter Prozessemissionen zur Erkennung von Fehlerbildern ist eine zentrale Fragestellung, die nur anwendungsspezifisch beantwortet werden kann. Unabhängig von der gewählten Sensorik muss eine In-Process-Überwachung bei der Lasermaterialbearbeitung auf signifikanten Parametern (sog. Qualitätsindikatoren) beruhen und nach Wiesemann (2004) kontaktlos arbeiten.

Die typischen Qualitätsmerkmale bei Laserfertigungsprozessen umfassen u. a. die Form- und Maßhaltigkeit, die Oberflächenbeschaffenheit sowie Gefügemerkmale wie Porosität und Einschlüsse. Darüber hinaus sind im Speziellen beim Laserstrahlschweißen die relevanten Fehlerbilder normativ erfasst (vgl. DIN EN ISO 13919). Hier kann es beispielsweise zu Nahtüberhöhungen oder ungenügenden Durchschweißungen kommen.

Sensoriken und Anwendungen Die Möglichkeiten der Online-Überwachung werden nach dem Zeitpunkt der Messung, den verwendeten Messmitteln und deren geometrischer Anordnung relativ zur Wechselwirkungszone unterschieden (Müller-Borhanian 2009). Diverse weitere Einteilungsmöglichkeiten und eine Übersicht etablierter Methoden, v. a. für das Laserstrahlschweißen, werden in Dudeck (2013) und Sun et al. (1999) beschrieben. Als Grundlage für eine Prozessüberwachung werden dabei mehrere Prozessphänomene betrachtet: Emission von elektromagnetischer Strahlung, Schall und gasförmigem bzw. flüssigem Material sowie Reflexion bzw. Transmission der eingebrachten Laserstrahlung.

Beim *Laserstrahlschweißen* entsteht neben dem Schmelzbad eine Dampfkapillare und ein Plasma. Es kommt zu akustischen Schwingungen und zu

richtungsabhängiger Emission von Plasma- und Wärmestrahlung, die zur Detektion diverser Fehler genutzt werden (L. Li et al. 1991). Während die akustischen Emissionen durch Dampfausstoß entstehen und mit Mikrofonen im Hz- bis kHz-Bereich erfasst werden, eignen sich zur Plasmadetektion Raumladungssensoren (L. Li et al. 1996), Spektrometer (Huber 2014; Rockstroh & Mazumder 1987) und optische Sensoren im UV/VIS-Bereich[13] (S. Dietrich 2009; Wiesemann 2004). Infrarotstrahlung (IR) wird dagegen nicht wesentlich vom Metalldampf bzw. Plasma aus der Wechselwirkungszone, sondern vom heißen Schmelzbad emittiert. Nach Müller-Borhanian (2009) sind für die Schmelzbaderkennung mit konventionellen CMOS[14]-Kameras geeignete Filter notwendig, die die transmittierten Strahlungsanteile auf den NIR-Bereich[15] beschränken und störende Emissionen des Metalldampfes ausblenden. Für IR-Detektoren stellt der Metalldampf dagegen keine Störquelle dar.

Die Analyse der Schmelzbad- und der Kapillargeometrie sowie die Charakterisierung der Spritzerbildung wird in zahlreichen Ansätzen verfolgt (Dietz et al. 1998; M. Geiger & Hohenstein 2009; Kogel-Hollacher 2008; Müller-Borhanian 2009; Schweier et al. 2013; Stache et al. 2007), da hieraus wesentliche Qualitätsmerkmale abgeleitet werden können. Die gleichzeitige Erkennung der Phänomene erfordert aufgrund des hohen Temperaturunterschiedes einen großen Dynamikbereich des Sensorsystems.

Beim *Laserstrahlschneiden/-bohren* erfolgt nach Wiesemann (2004) eine direkte In-Process-Überwachung nur in seltenen Fällen, da die Prozesse sehr weit entwickelt und optimiert sind. Für Entwicklungszwecke erwies sich jedoch das aufgenommene Signalspektrum von Dioden als geeignet, um die Oberflächenrauheit zu charakterisieren und unvollständige Schnitte zu erkennen (Olsen et al. 1992). Kamerabasierte Systeme wurden darüber hinaus verwendet, um die Schnittqualität zu bestimmen und die Schmelzbaddynamik aufzunehmen (Wiesemann 2004).

Beim *Laser-Pulver-Auftragschweißen* wird, im Gegensatz zu pulverbettbasierten Verfahren, das Pulvermaterial in einer lokalen Schutzgasatmosphäre kontinuierlich zugeführt und aufgeschmolzen. Es handelt sich, wie beim Laserhärten, um einen Oberflächenprozess, in dem die lokale Temperatur in der Prozesszone wesentlich durch die Geometrie und durch benachbarte Schweißbahnen beeinflusst wird. Dementsprechend kommen dioden- oder kamerabasierte Systeme zum Einsatz, die die Oberflächentemperaturen aufnehmen und als Sensorik für einen geschlossenen Temperaturregelkreis dienen (Aubry et al. 2008; Bi et al. 2006; Tang & Landers 2010). Zudem bestehen Möglichkeiten, den Prozess

[13] ultravioletter Wellenlängenbereich (UV), sichtbarer (engl. *visible*) Wellenlängenbereich (VIS)
[14] *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS)
[15] nahes Infrarot (NIR), vgl. Abschnitt 2.6

spektroskopisch zu analysieren und Legierungszusammensetzungen zu kontrollieren (Bartkowiak 2010; Nassar et al. 2014) sowie die Schmelzbadform zu vermessen und daraus auf vorhandene Poren und Bindefehler zu schließen (Barua et al. 2014).

Bei dem pulverbettbasierten *Lasersintern* von Kunststoffen werden im Rahmen der optischen Qualitätssicherung räumlich auflösende thermografische Verfahren eingesetzt. Sie dienen vornehmlich der Erkennung einer inhomogenen Temperaturverteilung innerhalb des vorbeheizten Bauraums (Wegner & Witt 2011), da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessqualität und die Entstehung von Schwindung und Verzug hat (Eschey et al. 2011). In Chung (2011) wird darüber hinaus ein System beschrieben, das Temperaturinformationen aus dem Prozess aufnimmt, um die Leistung der Bauraumheizung zu steuern. Abdelrahman & Starr (2014) nutzen die thermische Überwachung beim Lasersintern in einem tomografischen Ansatz, der die Erstellung von 3D-Qualitätszertifikaten ermöglichen soll. Verfahren zur Detektion von lokalen Fehlstellen und geometrischen Unebenheiten nach einem Schichtauftrag mittels Thermografie gehen aus Philippi & Mattes (2009) hervor; die Anwendung alternativer Sensoren, wie beispielsweise der Streifenlichtprojektion, wird in Hartmann et al. (2012) betrachtet.

Die In-Process-Überwachung bei Laserfertigungsprozessen stellt die Grundlage dar, um in den Prozess aktiv eingreifen zu können und um die Qualität durch geschlossene Regelkreise sicherzustellen. Diesbezüglich hat sich nach Steen & Mazumder (2010) v. a. die Kontrolle der Laserleistung und des Strahlprofils etabliert. Grundlegende Konzepte für eine universelle Regelung werden in S. Dietrich (2009) diskutiert.

Eine geringe Fehlalarmrate und hohe Signifikanz bei der Detektion von Unregelmäßigkeiten werden durch Multisensorsysteme bzw. durch multidimensionale Qualitätsindikatoren erreicht. Nach S. Dietrich (2009) kann dies z. B. durch die gleichzeitige Betrachtung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche (UV, VIS, IR) erfolgen.

2.5.2 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschmelzen

Für pulverbettbasierte Strahlschmelzverfahren sind im Gegensatz zu anderen (Laser-)Fertigungsprozessen wenige Ansätze und Methoden zur In-Process-Überwachung bekannt bzw. kommerziell umgesetzt. Eine allgemeine Einteilung unter verschiedenen Gesichtspunkten geht aus Abbildung 2.11 hervor.

Aufgrund ihrer Relevanz werden im Folgenden Methoden beschrieben, die die Prozessemissionen durch die Ablenkoptik des Lasers aufnehmen (*on-axis*), und Systeme, die unabhängig von der Bearbeitungsoptik in einem festen Winkel zur Prozessebene angeordnet sind (*off-axis*). Ein wesentlicher Unterschied

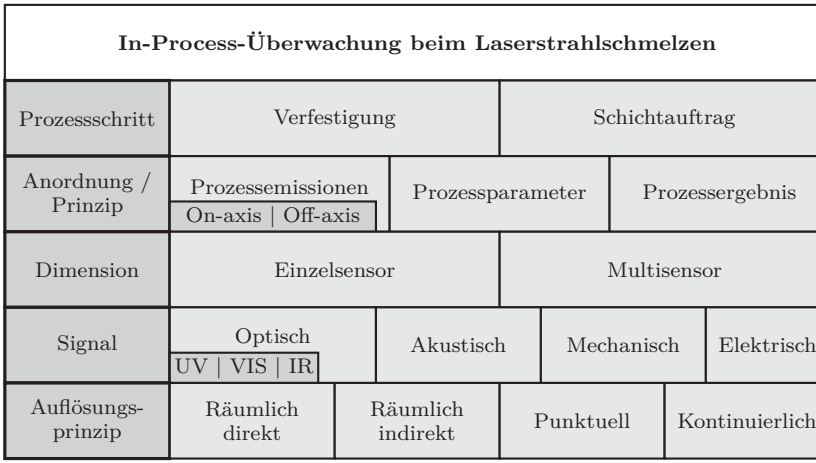


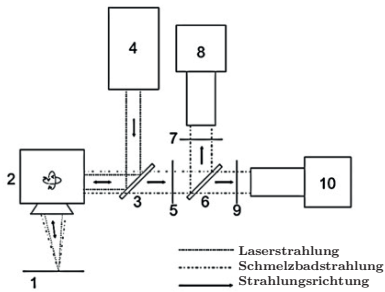
Abbildung 2.11: Einteilung der In-Process-Überwachung nach unterschiedlichen Gesichtspunkten

besteht darin, dass Off-Axis-Systeme die Prozessemissionen aus der gesamten Bearbeitungsebene aufnehmen können, während On-Axis-Systeme, abhängig von der aktuellen Spiegelstellung bzw. Fokusposition, auf den unmittelbaren Bearbeitungsbereich eingeschränkt sind.

On-Axis-Systeme Bei On-Axis-Methoden handelt es sich prinzipiell um räumlich indirekt auflösende Systeme, die mittels einer koaxialen Anordnung die Bauebene abrastern und durch Zusatzinformationen (z. B. Winkelposition der Ablenkoptik und Bearbeitungszeitpunkt) ein räumlich auflösendes, zeitlich jedoch zusammengesetztes Bild der Bearbeitungsebene erzeugen (vgl. Craeghs et al. (2012) und Thombansen et al. (2014)). Während des Prozesses wird prinzipbedingt immer die aktuelle Prozesszone (das Schmelzbad bzw. dessen lokale Umgebung) beobachtet. Die Scanner- und Fokussieroptik dient in diesem Fall sowohl zur Lasermaterialbearbeitung als auch zur Prozessüberwachung (vgl. Abbildung 2.12). Die abbildenden Eigenschaften der Optik sind jedoch für einen engen Bereich um die Wellenlänge des Bearbeitungslasers optimiert. Die Beobachtungswellenlänge für Prozessüberwachungssysteme ist daher eingeschränkt und es werden Filter und Korrekturoptiken benötigt (Chivel & Smurov 2010; Clijsters et al. 2014).

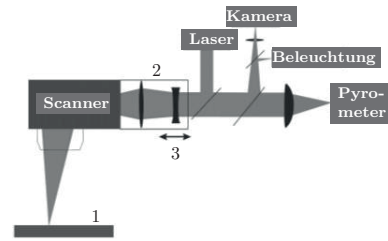
In Kruth (2007) wird der grundlegende Aufbau eines koaxialen Multisensorsystems, bestehend aus einer Photodiode und einer CMOS-Kamera, beschrieben (vgl. Abbildung 2.12a). Beide Sensoren messen im Nahinfrarotbereich zwischen 780 nm und 950 nm und eignen sich daher zur Detektion von Wärmestrahlung

aus dem Schmelzbad (vgl. Abschnitt 2.6). Die eingesetzte Photodiode integriert über einen Ortsbereich, der ca. 20 Mal größer als das eigentliche Schmelzbad ist, und erfasst damit die gemittelten Emissionen aus der lokalen Prozessumgebung. Eine parallele, ortsaufgelöste Messung durch die CMOS-Kamera ermöglicht zudem die Bestimmung der Schmelzbadcharakteristik in Form einer absoluten Fläche und eines Längen-Breiten-Verhältnisses. Zur Definition der Schmelzbadbegrenzung erfolgt ein experimenteller Abgleich der Grauwerte mit der entsprechenden Schmelzisothermen (Kruth et al. 2008).



1: Bearbeitungsebene
2: Scanner mit f/θ-Optik
3: Halbdurchlässiger Spiegel
4: Ausgang Laserquelle
5,7,9: Opisches Filter
6: Strahlteiler
8: Kamera mit Fokussieroptik
10:Fotodiode mit Fokussieroptik

(a) Kombination aus Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera ($\Delta x \approx 10\,\mu m$, $\Delta t \approx 100\,\mu s$) und Photodiode ($\Delta t \approx 100\,\mu s$), λ = 780 nm–950 nm nach Kruth & Mercelis (2009)



1: Bearbeitungsebene
2: Pre-Focus-System
3: Bewegliche Negativlinse auf Solenoid

(b) Kombination aus Kamera, Beleuchtung und Pyrometer in einem *Pre-Focus*-System (Pyrometer: λ=1,5 µm–2,2 µm , Δt =10 µs) nach Thombansen et al. (2014)

Abbildung 2.12: On-Axis-Anordnungen für die Prozessüberwachung beim SLM

Im Gegensatz zur ortsaufgelösten Messung durch die CMOS-Kamera reagiert das Diodensignal träge auf Änderungen der lokalen Wärmeleitungsbedingungen (Craeghs, Clijsters, Yasa, Bechmann et al. 2011), eignet sich aber neben den anderen Indikatoren auch als Eingangsgröße für eine geschlossene Regelschleife (Craeghs et al. 2010; Kruth 2007). Die Herausforderung bei dieser Anordnung besteht in der hohen Aufnahmefrequenz von ca. 10 kHz, die notwendig ist, um das Schmelzbad kontinuierlich zu erfassen (Berumen et al. 2010).

Durch das System können nicht nur Prozessfehler in Form von *Balling* und stark erhöhten Porositäten erkannt werden, sondern auch geometriebedingte Überhitzungen z. B. an Spitzen, Rändern und Überhängen aktiv reduziert werden (Craeghs, Clijsters, Yasa & Kruth 2011; Kruth et al. 2008). Diese

haben nach Craeghs et al. (2012) einen direkten Einfluss auf die Oberflächenqualität und die Dichte in den betroffenen Bereichen.

In Buls et al. (2014) wird gezeigt, dass sich die Schmelzbadcharakteristik schon innerhalb eines einzelnen Scanvektors signifikant ändert und zu Porenbildung an den überhitzten Wende- bzw. Anfangsstellen führt. Durch einen geeignet ausgelegten PID-Regler[16] und durch die Klassifikation einzelner Scanvektoren nach lokalen Wärmeleitbedingungen kann das Schmelzbad jedoch homogenisiert werden (Buls et al. 2014; Clijsters et al. 2014). Kommerzielle Implementierungen dieses und anderer Systeme, die in Zukunft als Basis für eine Echtzeitkontrolle des Prozesses dienen sollen, befinden sich derzeit in Entwicklung (Bechmann et al. 2012; Grünberger & Domröse 2014).

Ein verwandter Ansatz zur On-Axis-Überwachung des SLM-Prozesses, ebenfalls im Nahinfrarotbereich, wird in Doubenskaia et al. (2010), Pavlov et al. (2010) und Smurov (2007) diskutiert. Bei der Sensorik handelt es sich um ein eigenentwickeltes Zwei-Farben-Pyrometer (Integrationsbereich $\Delta x \approx 50\,\mu m$, $\Delta t \approx 50\,\mu s$, λ=900 nm–1200 nm), mit dem die Messung von Oberflächentemperaturen, weitgehend unabhängig vom Materialemissionsgrad, in der Prozesszone ermöglicht werden soll. Mit diesem grundlegenden Aufbau wird in Chivel & Smurov (2007, 2010) die ortsaufgelöste Abbildung der Prozesszone durch ein *on-axis* angeordnetes, hochverstärktes CCD-Kamerasystem[17] (Bildfeld ca. 30 × 30 mm), ebenfalls bei zwei Wellenlängen, gezeigt. Ansätze zur Prozesskontrolle ergeben sich durch die Lageerkennung einzelner Pulverkörner und die anschließende adaptive Belichtungssteuerung zur Steigerung der Absorption im Pulverbett (Chivel et al. 2007). Das System wurde hinsichtlich der Auflösung in Chivel & Smurov (2011) weiterentwickelt und zu Prozessentwicklungszwecken verwendet. Es reagiert sensitiv auf die Änderung von Prozessparametern und ermöglicht die Erkennung von Wärmestauungen bei der Verfestigung von verhältnismäßig hohen Pulverschichtdicken, die ihrerseits zu Schmelzbadinstabilitäten führen (Chivel 2013). Eine Anwendung im Bereich der kontinuierlichen Prozessüberwachung ist nicht bekannt.

Ergänzend zu den beschriebenen Ansätzen wird in Lott et al. (2011) die Auslegung eines optischen Systems diskutiert, das unter Verwendung eines zusätzlichen, koaxial angeordneten Beleuchtungslasers das Schmelzbad ortsaufgelöst erfasst. Die Zusatzbeleuchtung ermöglicht eine signifikante Reduktion der Integrationszeit des Kamerasystems und in der Folge die Beobachtung sehr schneller Prozessabläufe. Durch die Verwendung einer f/Θ-Planfeldoptik werden jedoch chromatische Aberrationen induziert, die den Wellenlängenbereich für die Erfassung thermischer Strahlung stark einschränken. In Thombansen & Diatlov (2013) wird ein *Pre-Focusing*-System vorgestellt, das auf Basis einer schnell bewegten Linse arbeitet und die Notwendigkeit für eine f/Θ-Optik

[16] *Proportional-integral-derivative* (PID)
[17] *Charge-coupled Device* (CCD)

entfallen lässt. Damit kann der Prozess u. a. mit einem Pyrometer beobachtet werden, um erhöhte Schichtdicken und Prozessparameterabweichungen zu erkennen (vgl. Abbildung 2.12b).

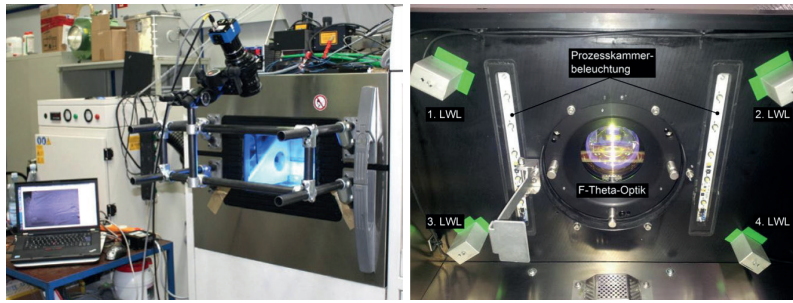
Eine vollständig andere Methode zur Prozessüberwachung wird von Neef et al. (2014) aufgezeigt. Durch die koaxiale Integration eines Kurzkohärenz-Interferometers wird die Topologie der verfestigten Schichten hochauflösend ($\Delta x \approx 10\,\mu m$) erfasst, um auf geometrische Prozessfehler (z. B. Deformationen) schließen zu können. Weitere Anwendungsmöglichkeiten bestehen in der Erkennung von geometrischen Unregelmäßigkeiten beim Schichtauftrag und der Nivellierung der Bauplattform. Da das System sequenziell die Bearbeitungsebene mit der gleichen Ablenkoptik abrastert, sind Prozesspausen erforderlich.

Off-Axis-Systeme Off-Axis-Systeme zur Prozessüberwachung sind in vielen Fällen kamerabasiert und können die Bearbeitungsebene direkt[18] auflösen. Eine *Ergebnisüberwachung* der verfestigten Schichten bzw. des Schichtauftrags wird in Kleszczynski et al. (2012) diskutiert. Mit einem hochauflösenden CCD-Kamerasystem werden unterschiedliche Energieeinträge anhand der resultierenden Oberflächenstruktur erkannt und zudem Beschichtungsfehler an überhängenden Bereichen aufgelöst (Kleszczynski et al. 2014) (vgl. Abbildung 2.13a). Durch die Verwendung eines Tilt-Shift-Objektivs für die Minimierung der perspektivischen Verzerrungen und einer LED[19]-basierten Zusatzbeleuchtung wird eine Ortsauflösung von bis zu $\Delta x = 25\,\mu m$ erreicht (Zur Jacobsmühlen et al. 2013). Als Qualitätsindikatoren werden in diesem Ansatz die Anzahl und Größe der Oberflächenunregelmäßigkeiten, jeweils vor und nach der Verfestigung, ausgewertet.

Darüber hinaus bestehen weitere Ansätze zur Überprüfung der Schichtauftragsqualität mit Kameras im sichtbaren Spektralbereich (Craeghs, Clijsters, Yasa & Kruth 2011; Grünberger et al. 2013), die teilweise bereits kommerziell umgesetzt sind (Berumen & Bechmann 2012; SLM Solutions GmbH 2012; Weilhammer 2014). Hierfür kommen spezielle Beleuchtungssysteme und Bildverarbeitungsalgorithmen zum Einsatz, die die Robustheit der Fehlererkennung steigern.

Off-Axis-Anordnungen können nicht nur zur schichtweisen Ergebnisüberwachung, sondern auch zur Überwachung des eigentlichen Verfestigungsprozesses genutzt werden. In Bayle & Doubenskaia (2008) werden hierzu grundlegende Ergebnisse diskutiert, die anhand einer punktuellen Messung mit einer IR-Kamera (λ =3 µm–5 µm) und einem Pyrometer (λ =1 µm–1,5 µm) gewonnen wurden. Prinzipiell lassen sich dadurch Wärmestauungen bei sehr hohen Schichtdicken identifizieren und die Temperaturentwicklung sowie die

[18] direkt bedeutet in diesem Zusammenhang innerhalb eines Messzyklus;
[19] Leuchtdiode, engl. *Light-emitting Diode* (LED)



(a) Hochauflösendes Kamerasystem (Kleszczynski et al. 2012)

(b) Lichtwellenleiter im Bauraum (Grünberger et al. 2013)

Abbildung 2.13: Off-Axis-Anordnungen für die Prozessüberwachung beim SLM

Schmelzbadaustriebe bei der Verfestigung einzelner Scanvektoren betrachten. Im Gegensatz zu diesem Laborsystem wird in Grünberger et al. (2013) die großflächige Überwachung der gesamten Bearbeitungsebene durch vier an der Bauraumdecke angeordnete Lichtwellenleiter diskutiert (vgl. Abbildung 2.13b). Der Vergleich mit einer On-Axis-Anordnung zeigt, dass im Off-Axis-Fall eine deutlich höhere Signaldynamik zu erwarten ist.

Bereits industriell eingesetzt wird die sog. optische Tomografie (Zenzinger et al. 2014). Hierbei wird der Prozess mit einer Off-Axis-CCD- bzw.-CMOS-Kamera beobachtet und ein Einzelbild pro Schicht durch Integration der optischen Signale aus dem VIS/NIR-Bereich gewonnen. Bei einer Auflösung von $\Delta x \approx 100\,\mu\text{m}$ können Auffälligkeiten identifiziert werden, die auf Poren und Bindefehler hindeuten.

Off-Axis-Systeme, die wie in dieser Arbeit auf IR-Kameras basieren, sind v. a. aus dem verwandten Verfahren des EBM bekannt (Ljungblad 2012; Schwerdtfeger et al. 2012). Die grundlegende Herausforderung beim EBM besteht jedoch in der prinzipbedingten Einschränkung der Zugänglichkeit und der Entstehung von Metalldämpfen, die die optischen Komponenten verschmutzen. Aus diesem Grund sind Blenden erforderlich, die eine Beobachtung der Bearbeitungsebene in vielen Fällen nur vor oder nach dem Energieeintrag zulassen (Mireles et al. 2013; Ridwan et al. 2014; Rodriguez et al. 2012). Eine in-situ-Beobachtung der Temperaturverteilung in der Prozessebene kann durch feststehende bzw. kontinuierlich bewegte IR-transparente Einwegfenster realisiert werden (Dinwiddie et al. 2013; Price et al. 2012, 2013).

In Moylan et al. (2014) wird der Einsatz einer Hyperspektral-IR-Kamera (80×80 Pixeldetektor) beim SLM untersucht. Damit können Strahlungsintensitäten pixelweise bei mehreren getrennten Wellenlängen gemessen werden.

Dieser Umstand ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung der Temperatur und des Emissionsgrades. Die Daten können beispielsweise für die Kalibrierung einer konventionellen IR-Kamera für die Prozessüberwachung bei höheren Auflösungen dienen.

Condition Monitoring und andere Ansätze Beim *Condition Monitoring* werden relevante Maschinenparameter kontinuierlich oder zu diskreten Zeitpunkten protokolliert. Stand der Technik im Bereich der pulverbettbasierten, additiven Fertigung ist hier die Überwachung und Kontrolle der Temperatur der Substratplatte, der aufgetragenen Pulvermenge pro Schicht (Ljungblad 2012), des Restsauerstoffgehalts in der Baukammer (Concept Laser GmbH 2014) oder der Laserleistung (EOS GmbH 2012). Es handelt sich dabei um integrale Messungen mit einer maßgeblichen Verzögerungszeit, deren Messergebnisse nicht den einzelnen Bauteilen oder den Bauteilbereichen zugeschrieben werden können. Sie sind daher von geringer Relevanz bei der Detektion lokaler Fehler.

Eine Ausnahme stellt der in Reinarz & Witt (2012) vorgestellte Einsatz eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors dar. Der Sensor ist auf dem Schichtauftragssystem montiert und ermöglicht die Erkennung von herausstehenden Bauteilkanten während des Pulverauftrags. Diese gefährden die Prozessstabilität, da es zu einem mechanischen Kontakt mit der Beschichterklinge kommt (Kleszczynski et al. 2014).

Darüber hinaus wird in Rieder et al. (2014) die prinzipielle Eignung einer ultraschallbasierten In-Process-Überwachung diskutiert. Es zeigt sich, dass dieses Verfahren abhängig von der konkreten Bauteilgeometrie ist und sich die Messbedingungen mit zunehmender Bauhöhe maßgeblich ändern.

2.5.3 Zwischenfazit

Die Betrachtungen zum Stand der Technik im Bereich der Prozessüberwachung haben aufgezeigt, dass zwar vielfältige Sensoriken und Methoden verfügbar sind, diese jedoch sehr applikationsspezifisch angewandt werden. Beim SLM bietet die lokalisierte Beobachtung durch On-Axis-Systeme einen hohen Detaillierungsgrad und stellt die Grundlage für eine echtzeitnahe Prozessregelung dar. Nach Neef et al. (2014) sind diese jedoch in der Erkennungsfähigkeit von bereichsübergreifenden Fehlern, wie beispielsweise Ablösungen und Deformationen, stark eingeschränkt, da ihnen nur die lokale Prozesszone zugänglich ist. Off-Axis-Systeme weisen dagegen eine meist geringere Zeit- und Ortsauflösung auf, erfassen aber die gesamte Bearbeitungsebene und ermöglichen dadurch eine geometriebasierte Analyse. Aufgrund diverser Randbedingungen hinsichtlich Optik und Sensorik sind die Systeme in beiden Fällen auf den sichtbaren Spektralbereich und den Nahinfrarotbereich beschränkt. Sie eignen sich daher vornehmlich für die Beobachtung von hohen Prozesstemperaturen (vgl.

Abschnitt 2.6) oder für die visuelle Prüfung des Prozessergebnisses. Im Folgenden werden die Grundlagen der berührungslosen Infrarot-Thermographie diskutiert, die eine thermische Betrachtung des Prozesses über die gesamte Aufheiz- und Abkühlphase ermöglicht und im Fokus dieser Arbeit steht.

2.6 Grundlagen der berührungslosen Infrarot-Thermografie

Mithilfe der berührungslosen Infrarot-Thermografie können Oberflächentemperaturen anhand der von einem Körper ausgesandten Wärmestrahlung ermittelt werden. Durch ihren Einsatz ist in vielen industriellen Anwendungen eine prozesswärmebasierte Überwachung möglich. Mit Blick auf die in der vorliegenden Arbeit diskutierte Umsetzung der schichtweisen Überwachung des SLM-Prozesses werden im Folgenden die Grundlagen der Thermografie erörtert.

2.6.1 Strahlungsemission

Nach dem *Planck'schen Strahlungsgesetz* emittiert jeder Körper oberhalb des absoluten Temperaturnullpunktes Wärmestrahlung. Sie wird anhand des Strahlungsflusses Φ quantifiziert, der die Strahlungsenergie pro Zeit beschreibt. Bezogen auf die ausstrahlende Fläche wird der Strahlungsfluss im Modell des idealen, vollständig absorbierenden Schwarzen Strahlers durch die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{BB}(\lambda, T)$ charakterisiert:

$$M_{BB}(\lambda, T)\,\mathrm{d}\lambda\,\mathrm{d}A = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{h_p c}{\lambda k_B T}} - 1\right)}\,\mathrm{d}\lambda\,\mathrm{d}A \tag{2.5}$$

h_p: Planck'sches Wirkungsquantum, c: Lichtgeschwindigkeit, k_B: Boltzmann-Konstante

Aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz (Gleichung 2.5) lassen sich zwei für die berührungslose Temperaturmessung wesentliche Gesetzmäßigkeiten ableiten. Das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* ergibt sich durch Integration über alle Wellenlängen und beschreibt die gesamte Ausstrahlung eines Körpers pro Fläche in Abhängigkeit seiner Temperatur:

$$M_{BB}(T) = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_B(\lambda, T)\,\mathrm{d}\lambda = \sigma_B T^4 \tag{2.6}$$

σ_B: Stefan-Boltzmann Konstante

Das Maximum der ausgestrahlten Leistung variiert mit der Temperatur des Körpers und wird durch das *Wien'sche Verschiebungsgesetz* beschrieben (vgl. Abbildung 2.14):

$$\lambda_{max} T = 2897{,}8\,\mu\mathrm{m\,K} \tag{2.7}$$

Bei hohen Temperaturen führen die nach Gleichung 2.7 zunehmenden Strahlungsanteile im sichtbaren Wellenlängenbereich zu einem glühenden Erscheinungsbild des betrachteten Körpers.

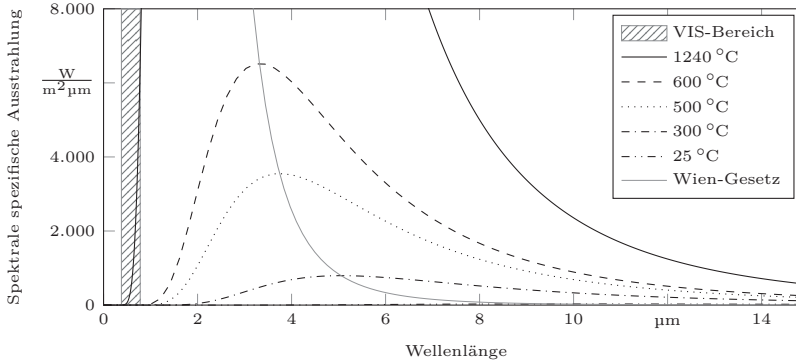


Abbildung 2.14: Strahlungsgesetz und Wien'sches Verschiebungsgesetz (1240 °C entspricht der Solidustemperatur des Werkstoffs Iconel 718)

Aufgrund der begrenzten Absorptionsfähigkeit realer Körper eignet sich das Modell des Schwarzen Strahlers nur für die Betrachtung grundlegender Zusammenhänge (Minkina & Dudzik 2009). Für eine exakte Beschreibung der Emissionseigenschaften von realen Körpern, charakterisiert anhand eines Emissionsgrades, sind vielfältige Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Diese umfassen die Richtungs- und Wellenlängenabhängigkeit, die Temperaturabhängigkeit sowie die Abhängigkeit von den Oberflächen- und Materialeigenschaften. Raue Oberflächen weisen beispielsweise aufgrund der Mehrfachreflexionen an den mikroskopischen Vertiefungen der Oberfläche bessere Emissionseigenschaften auf (Glückert 1992). Ebenso führt beispielsweise bei Kupfer die Oxidbelegung der Oberflächen zu einer deutlichen Steigerung des Emissionsgrades (Schuster 2004).

Die spektrale Strahldichte $L(T, \lambda, \theta)$ stellt im Zusammenhang mit den Emissionseigenschaften eine fundamentale radiometrische Größe dar. Sie ist gegeben als die Strahlungsleistung $d\Phi$, die pro Wellenlängenintervall $d\lambda$ und Flächenelement dA in einen Raumwinkel[20] $d\Omega$ unter dem Polarwinkel θ ausgestrahlt oder empfangen wird. Eine Abhängigkeit vom Azimutwinkel ϕ ist nur in seltenen Fällen gegeben und wird nachfolgend vernachlässigt (Polifke & Kopitz 2009). Das Verhältnis der spektralen Strahldichte eines realen Körpers zu der eines Schwarzen Strahlers ist als gerichteter spektraler Emissionsgrad $\epsilon(T, \lambda, \theta)$

[20] $d\Omega = dA_n/r^2 = sin(\phi)d\phi d\theta$. A_n ist das Flächenelement, das senkrecht von einem aus einer Punktquelle ausgehenden Strahl durchdrungen wird (vgl. Schuster (2004)).

definiert. Er verknüpft die Strahlungseigenschaften des realen Körpers mit denen des idealen Schwarzen Strahlers:

$$\epsilon(T, \lambda, \theta) = \frac{L(T, \lambda, \theta)}{L_B(T, \lambda)} \tag{2.8}$$

L_B: Strahldichte eines Schwarzen Strahlers

Sind die Abhängigkeiten des Emissionsgrades bekannt, kann die emittierte Strahlung von realen Körpern durch gewichtete Integration bestimmt werden. Sind sie dagegen unbekannt, wird in praktischen Anwendungen ein wellenlängenunabhängiges Emissionsverhalten angenommen. Im Modell des Grauen Strahlers führt das auf die vereinfachte Definition des Emissionsgrades nach Gleichung 2.9 (vgl. Abbildung 2.15):

$$M(T) = \epsilon(T) \cdot M_{BB}(T) \tag{2.9}$$

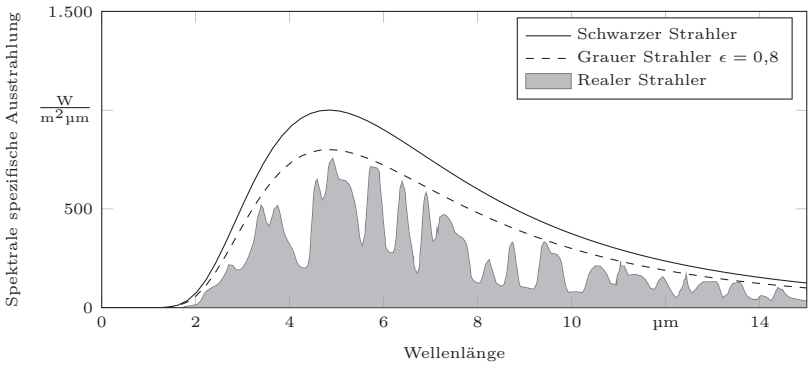


Abbildung 2.15: Vergleich der spezifischen Ausstrahlung von Grauen, Schwarzen und realen Strahlern (schematische Darstellung)

Empirisch wird der Emissionsgrad aus der Strahlungsmessung eines Körpers bei bekannter Temperatur ermittelt.

Richtungsabhängigkeit Eine weitere praxisrelevante Näherung ist die Betrachtung von diffusen Strahlern. Sie besitzen eine konstante Strahldichte L und emittieren isotrop in alle Raumrichtungen (winkelunabhängiger Emissionsgrad)[21]. Es kommt jedoch zu einer rein geometrisch bedingten Änderung der effektiven Emitterfläche, wenn diese unter einem Winkel θ betrachtet wird. Dies äußert sich bei diffusen Strahlern in der $cos(\theta)$-Abhängigkeit der

[21] Für reale Körper wird das Gesetz nur näherungsweise erfüllt, da sie, wie im Fall von poliertem Metall, winkelabhängig emittieren.

Strahlstärke I, gegeben als die emittierte Strahlungsleistung $\mathrm{d}\Phi$ bezogen auf einen Raumwinkel $\mathrm{d}\Omega$ (*Lambert'sches Gesetz*):

$$I(\theta) = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\Omega} = L\,\mathrm{d}A\,cos(\theta) = I_{\perp}cos(\theta) \tag{2.10}$$

$I_{\perp}$: Strahlungsintensität unter $\theta = 0$

Im Infrarotspektrum weisen die Emissionsgrade vieler Metalle eine geringe Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Temperatur auf. Nach Polifke & Kopitz (2009) können sie in brauchbarer Näherung als diffuse Strahler beschrieben werden, da bei der Integration des gerichteten Emissionsgrades über den Halbraum die Winkelabhängigkeit mit $cos(\theta)$ gewichtet wird und bei großen Winkeln keinen wesentlichen Beitrag mehr liefert. Das wesentliche Problem bei der thermografischen Messung metallischer Oberflächen ist hingegen der geringe Absolutwert des Emissionsgrades: blanke Metalle weisen hohe Reflexionsgrade auf und die reflektierte Stör- und Hintergrundstrahlung erschweren die Bestimmung der Oberflächentemperatur (Glückert 1992).

2.6.2 Strahlungstransport

Die Temperatur einer Oberfläche wird bei strahlungsbasierten Messprinzipien aus dem übertragenen Strahlungsfluss zwischen Sender und Empfänger bestimmt. Für den Strahlungstransport sind die geometrischen Abhängigkeiten durch das photometrische Grundgesetz (Gleichung 2.11) gegeben. Es beschreibt die spezifische Strahlungsleistung Φ, die von einer Fläche dA_i (Messobjekt) mit der (spektralen) Strahldichte L_i unter dem Ausstrahlwinkel θ_i auf eine Fläche dA_j (Empfänger) unter dem Einstrahlwinkel θ_j im Abstand r_{ij} eingestrahlt wird (vgl. Abbildung 2.16).

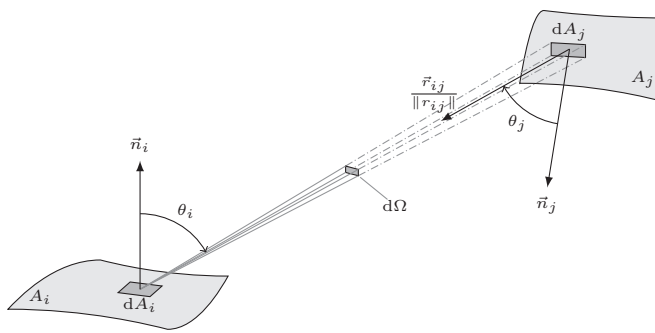


Abbildung 2.16: Geometrische Anordnung zur Bestimmung der übertragenen Strahlungsleistung

$$d^2\Phi_{i\to j} = L_i \frac{cos(\theta_i)cos(\theta_j)dA_i dA_j}{r_{ij}^2} \tag{2.11}$$

r_{ij}: Abstand der Flächenelemente

Unter der Annahme einer konstanten Strahldichte L_i (diffuser Strahler) folgt aus dem photometrischen Grundgesetz:

$$\Phi_{i\to j} = A_i\, F_{ij}\, \epsilon\, M_B(T_i) \tag{2.12}$$

Hierbei wird der Sichtfaktor F_{ij} eingeführt, der sich vollständig aus der geometrischen Anordnung der Flächen und deren Größen berechnen lässt. Er trägt der Tatsache Rechnung, dass nur ein gewisser Teil der jeweiligen Fläche von der jeweils anderen Fläche „gesehen“ werden kann. Der Sichtfaktor entspricht dem Strahlungsanteil, der von A_j empfangen wird:

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi\, A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{cos(\theta_i)cos(\theta_j)}{r_{ij}^2} dA_j dA_i \tag{2.13}$$

Dämpfung Bei der Ausbreitung der Strahlung von der Senderfläche zu der Empfängerfläche kommt es zu einer Dämpfung des Strahlungsflusses Φ. Die Ursachen hierfür liegen in dem Energieverlust durch *Absorption* und *Streuung* an den Atomen und Molekülen des Transportmediums (Schuster 2004). Dieser Zusammenhang wird durch das *Bourger-Beer'sche Gesetz* unter der Einführung eines wellenlängen- und materialabhängigen Dämpfungsfaktors κ_λ beschrieben:

$$\tau = e^{-\kappa_\lambda s} \tag{2.14}$$

τ: Transmissionsgrad, s: zurückgelegte Entfernung im Medium

Ist die Wellenlänge der betrachteten Strahlung groß im Vergleich zu dem Durchmesser der Streuteilchen (Gasatome und Moleküle), kann von einer elastischen Rayleigh-Streuung ausgegangen werden. Der wellenlängenabhängige Dämpfungsfaktor skaliert dann mit $\propto 1/\lambda^4$. Im Infrarotbereich kann der Streueffekt deshalb vernachlässigt werden (Herwig & Moschallski 2006).

Die *Absorption* an Gasen findet in engen Wellenlängenbereichen statt und ist abhängig von der jeweiligen Gassorte. Dem Energieaustausch liegt in diesem Fall die Anregung elektrischer Ladungen in Atomen und Molekülen durch die einfallende Strahlung zugrunde. Die Energiedifferenz der unterschiedlichen Quantenzustände bzw. der unterschiedlichen Molekülschwingungszustände definiert die Absorptionsbanden. Abbildung 2.17 zeigt den Transmissionsgrad der Erdatmosphäre für unterschiedliche Distanzen zwischen Sender und Empfänger. Für den betrachteten Wellenlängenbereich ist die Strahlungsabsorption

in der Erdatmosphäre im Wesentlichen durch Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Ozon gegeben (Brinkmann 1998; Minkina & Dudzik 2009).

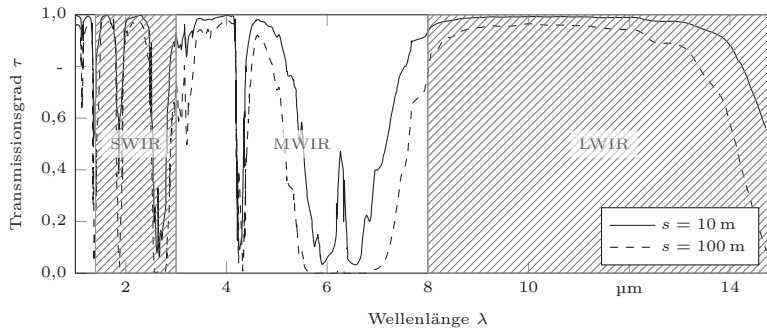


Abbildung 2.17: Transmission des IR-Spektrums in der Atmosphäre für unterschiedliche Weglängen s in Anlehnung an Budzier et al. (2011)

Die Bereiche maximaler Transmission führen auf die klassische Unterteilung des IR-Spektrums in sog. atmosphärische Fenster. Eine Übersicht der gebräuchlichen Bezeichnungen und Einteilungen ist in Tabelle 2.4 gegeben.

Tabelle 2.4: Unterteilung des Infrarotspektrums nach DIN 5031-7, ISO 20473

Benennung	Kurzzeichen	gebräuchlich Bezeichnung	Wellenlängenbereich in µm
nahes Infrarot	NIR, IR-A	NIR	0,78 ... 1,4
	NIR, IR-B	SWIR	1,4 ... 3,0
mittleres Infrarot	MIR, IR-C	MWIR	3 ... 8
	MIR, IR-C	LWIR	8 ... 15
	MIR, IR-C	FIR	15 ... 50
fernes Infrarot	FIR, IR-C	FIR	50 ... 1000

2.6.3 Thermografische Messung

Die für die thermografische Messung maximal zur Verfügung stehende Strahlungsleistung ist durch das Integral der Planck-Verteilung über alle Wellenlängen gegeben. Für die Strahlungsdetektion durch Messgeräte ist jedoch nur ein eingeschränkter Bereich des gesamten Spektrums praxisrelevant. Abbildung 2.18 zeigt die gesamte Strahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers in Abhängigkeit seiner Temperatur für ausgewählte Wellenlängenbereiche.

Sie wird durch Integration der Planck-Verteilung gewonnen und ermöglicht durch ihren streng monotonen Verlauf den Rückschluss auf die vorherrschende

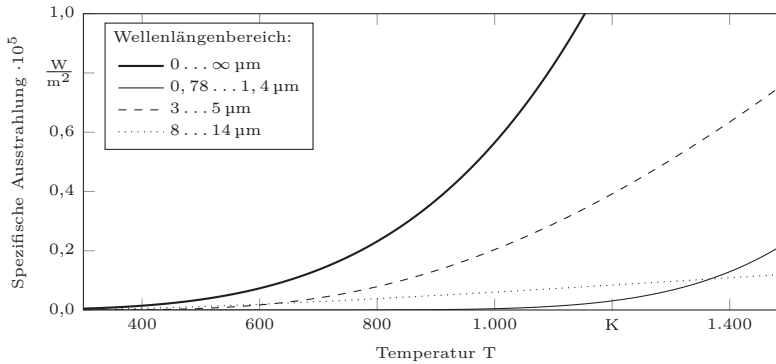


Abbildung 2.18: Spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers für unterschiedliche Wellenlängenbereiche

Temperatur. Unterhalb von ca. 350 °C eignen sich demnach vor allem die langwelligen Spektralbereiche (8 µm–15 µm), während für höhere Temperaturen die kurzwelligen Spektralbereiche zum Einsatz kommen.

Strahlungsanteile Trifft Strahlung auf eine beliebige Oberfläche, so teilt sich der Strahlungsfluss Φ in drei Anteile auf, einen Reflexionsanteil Φ_ρ, einen absorbierten Anteil Φ_α und einen transmittierten Anteil Φ_τ. Durch Definition der Koeffizienten $\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}$, $\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi}$ und $\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi}$ leitet sich das Kirchhoff'sche Gesetz ab:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau \rightarrow \rho + \alpha + \tau = 1 \tag{2.15}$$

Während für einen idealen Schwarzen Körper stets $\rho = \tau = 0$ gilt und sämtliche Strahlung absorbiert wird, besitzen reale Körper nur ein begrenztes Absorptionsvermögen und die auftreffende Strahlung wird teilweise absorbiert, teilweise reflektiert und teilweise transmittiert. Im thermischen Gleichgewicht muss die absorbierte Leistung jedoch gleich der emittierten Leistung sein und es gilt $\alpha = \epsilon$.

Messmodell Die von einer Objektszene ausgehende und auf einem Detektor einfallende Strahlung Φ_{Obj} setzt sich nach diesen Überlegungen aus mehreren Strahlungsflüssen Φ zusammen. Neben der Eigenstrahlung des Objektes Φ_ϵ bei der Temperatur T_O müssen die am Objekt reflektierte Umgebungsstrahlung Φ_ρ bei der Temperatur T_U, die durch das Objekt transmittierte Hintergrundstrahlung Φ_τ bei der Temperatur T_H und die von der Messstrecke selbst emittierte Strahlung Φ_{Atm} bei der Temperatur T_A berücksichtigt werden (InfraTec GmbH 2004) (vgl. Abbildung 2.19).

Hinzu kommen noch parasitäre Strahlungsanteile des Messgerätes, die in der Eigenstrahlung der Optik Φ_{Opt} und des Sensorgehäuses Φ_{Geh} begründet sind. Diese werden üblicherweise durch die Temperaturstabilisierung des Messgerätes kompensiert und daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

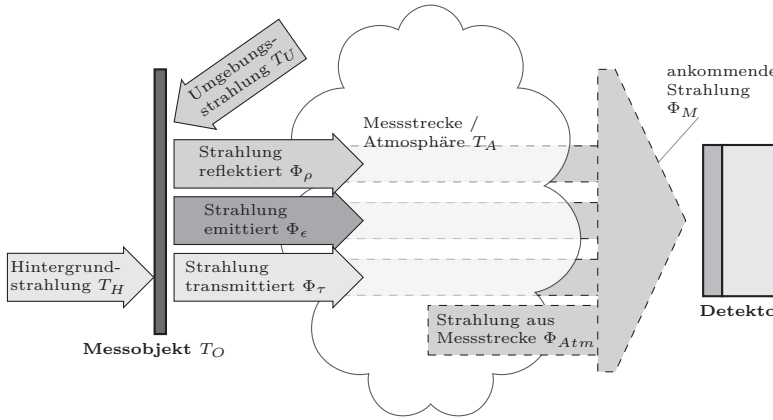


Abbildung 2.19: Messanordnung und Modell der thermografischen Messung

Für die von der Objektszene emittierten Strahlungsanteile folgt aus Abbildung 2.19, Gleichung 2.9 und Gleichung 2.15:

$$\begin{aligned}\Phi_{Obj} &= \Phi_\epsilon + \Phi_\tau + \Phi_\rho \\ &= \epsilon \cdot \Phi_B(T_O) + \tau \cdot \Phi_B(T_H) + \rho \cdot \Phi_B(T_U) \\ &\underset{\tau \to 0}{=} \epsilon \Phi_B(T_O) + (1-\epsilon)\Phi_B(T_U)\end{aligned} \tag{2.16}$$

$\Phi_B(T)$: Strahlungsfluss eines Schwarzkörpers bei Temperatur T

Unter Berücksichtigung der Abschwächung der austretenden Strahlungsleistung durch das Transportmedium (Transmissionskoeffizient τ_{Atm}) und der von dem Transportmedium selbst emittierten Strahlungsleistung $\Phi_{Atm} = \epsilon_{Atm}\Phi_B(T_A)$ ergibt sich das grundlegende strahlungsphysikalische Modell der am Messgerät ankommenden Strahlungsleistung Φ_M:

$$\begin{aligned}\Phi_M &= \tau_{Atm} \cdot \Phi_{Obj} + \Phi_{Atm} \\ &= \tau_{Atm} \cdot \Phi_{Obj} + (1-\tau_{Atm}) \cdot \Phi_B(T_A) \\ &= \tau_{Atm} \left(\epsilon \cdot \Phi_B(T_O) + (1-\epsilon) \cdot \Phi_B(T_U)\right) + (1-\tau_{Atm}) \cdot \Phi_B(T_A)\end{aligned} \tag{2.17}$$

Die zu bestimmende Temperatur des Objektes T_O ist folglich:

$$T_O = \Phi_B^{-1}\left(\frac{\frac{\Phi_M-(1-\tau_{Atm})\Phi_B(T_A)}{\tau_{Atm}}-(1-\epsilon)\Phi_B(T_U)}{\epsilon}\right) \underset{\tau_{Atm}=1}{\approx} \Phi_B^{-1}\left(\frac{\Phi_M-(1-\epsilon)\Phi_B(T_U)}{\epsilon}\right) \tag{2.18}$$

Die spezifischen Eigenschaften des Messgerätes (Transmission, Wellenlängenbereich, Verstärkungselektronik) werden in der Umkehrfunktion Φ_B^{-1} und der Detektorkennlinie Φ_M berücksichtigt. Dazu wird bei der Kalibrierung jedem Digitalwert eine Temperatur zugeordnet, da nur diese direkt zugänglich ist. Aus Gleichung 2.18 ist ersichtlich, dass für eine Temperaturmessung folgende Eingangsgrößen bekannt sein müssen:

- Transmission der Messstrecke τ_{Atm},
- Emissionsgrad des Messobjekts ϵ,
- Temperatur der Messstrecke T_A,
- Temperatur, die der Umgebungsstrahlung zugeordnet werden kann T_U.

Abbildung Die am Messgerät ankommende Strahlung wird durch die Detektoroptik gesammelt und auf eine Sensorfläche abgebildet. Im Infrarotbereich eignen sich für diese Anwendung Materialien wie Saphir, Calciumfluorid, Silizium, Zinksufit, Zinkarsenid und Germanium (Sackewitz 2011). Durch spezielle Antireflexbeschichtungen wird die Transmission τ_{opt} von Infrarotlinsensystemen gesteigert. Analog zur spektralen Ausstrahlung M auf der Senderseite beschreibt die Bestrahlungsstärke E die Leistung pro Fläche auf der Empfängerseite. Sie kann für die Sensorfläche eines Detektors nach Schuster (2004) in guter Näherung mit Gleichung 2.19 angegeben werden. Aus der Bestrahlungsstärke E lässt sich schließlich auf die Strahldichte L der Quelle und damit auf die Temperatur T der Quelle schließen:

$$E = \frac{\tau_{opt}\cdot M}{4k^2\left(1-\frac{\beta_a}{\beta_p}\right)} \tag{2.19}$$

β_a: Abbildungsmaßstab, β_p: Pupillenmaßstab der Optik (Durchmesserverhältnis Austrittspupille zu Eintrittspupille), k: Blendenzahl der Optik (Verhältnis Brennweite zu Eintrittspupillendurchmesser)

Ortsauflösung Die erreichbare örtliche Auflösung Δx eines Abbildungssystems ist durch die Beugung begrenzt. Die Grenze skaliert mit $\Delta x \propto \lambda f/D_E$ und erreicht für herkömmliche Objektive (z. B. f=50 mm, D_E=50 mm) bei einer Wellenlänge von λ=10 µm (LWIR) $\Delta x \approx 12$ µm. Um eine beugungsbegrenzte örtliche Auflösung zu realisieren, werden demnach kleine Blendenzahlen f/D_E benötigt. Diese reduzieren aber wiederum die erreichbare Tiefenschärfe, sodass

im Infrarotbereich eine möglichst senkrechte Betrachtung der Objektszene favorisiert werden sollte (Sackewitz 2011).

Für eine örtlich aufgelöste Strahlungsdetektion werden Empfängermatrizen, bestehend aus einzeln auslesbaren Sensorelementen, sog. *Focal Plane Arrays* (FPA) eingesetzt. Neben der Optik ist die erreichbare geometrische Auflösung dann auch durch die Pixelgröße und die Pixelabstände auf der Empfängermatrix bestimmt. In diesem Zusammenhang werden mehrere charakteristische Größen unterschieden. Das *Field of View* (FOV) beschreibt das von dem gesamten FPA erfasste Objektfeld, das *Instantaneous Field of View* (IFOV) den von einem einzelnen Pixel des FPA erkannten Bereich der Objektszene.

2.6.4 Detektoren

Die Messung der ankommenden Strahlungsleistung erfolgt mithilfe eines Detektors. Abhängig von dem Wellenlängenbereich und den technischen Anforderungen lassen sich im Wesentlichen zwei verschiedene Sensortypen unterscheiden: Quantendetektoren und thermische Sensoren. Das Grundprinzip besteht in beiden Fällen in der Umwandlung eines ankommenden Strahlungsflusses in ein messbares elektrisches Signal. Die charakteristischen Größen umfassen die Rauschleistung, die Detektivität und die minimal auflösbare Temperaturdifferenz.

Die Empfindlichkeit R_D eines Detektors ist definiert über das Verhältnis des gemessenen elektrischen Signals (meist eine Spannung U_s) zu dem einfallenden Strahlungsfluss Φ. Da die übertragenen Signale von Rauschanteilen des Hintergrunds, der Empfängerelemente und der elektronischen Schaltung überlagert werden, lässt sich eine äquivalente Rauschleistung NEP[22]quantifizieren. Als Kenngröße eines Detektors gibt sie denjenigen Strahlungsfluss an, der eine elektrische Spannung U erzeugt, die, unter der Voraussetzung von weißem Rauschen, gleich der Rauschspannung U_n ist:

$$\mathrm{NEP} = \Phi_{\mathrm{NEP}} = \frac{U_n}{R_D} \tag{2.20}$$

Die NEP ist neben der Betriebstemperatur und der Größe der Empfängerfläche A_D von der Messbandbreite Δf, der Wellenlänge λ und der Modulationsfrequenz f_M der einfallenden Strahlung abhängig. Durch die spezifische Detektivität D^* wird die NEP auf eine Einheitsempfängerfläche und Einheitsbandbreite bezogen (Gaussorgues 1994) und stellt eine weitgehend unabhängige Empfängerkenngröße dar:

[22] *Noise-equivalent Power* (NEP)

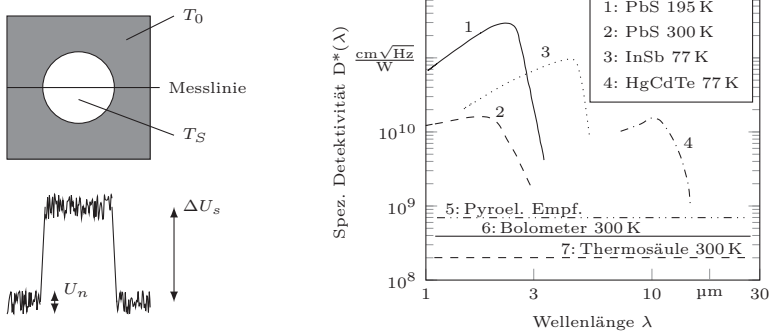
$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \Delta f}}{\mathrm{NEP}} \tag{2.21}$$

Abbildung 2.20b zeigt einen Überblick über die Detektivitäten unterschiedlicher Sensortypen.

Die kleinste auflösbare Temperaturdifferenz $\Delta T_{\min}$ (*Noise-equivalent Temperature Difference* (NETD)) beschreibt den Temperaturunterschied, der aufgrund einer noch unterscheidbaren Differenz in der Bestrahlungsstärke bei einem Signal-Rausch-Verhältnis[23] von SNR = 1 gemessen werden kann. Experimentell wird sie aus der Betrachtung eines Schwarzen Strahlers bei der Temperatur T_S vor einem Hintergrund bekannter Temperatur T_0 bestimmt (vgl. Abbildung 2.20a) (Minkina & Dudzik 2009):

$$\mathrm{NETD} := \Delta T_{\min} = (T_S - T_0) \frac{U_n}{\Delta U_s} \tag{2.22}$$

Für eine analytische Bestimmung der NETD werden optogeometrische Faktoren, die Ausstrahlungseigenschaften des Messobjekts, die Absorption der Sensorelemente und die Detektivität berücksichtigt (Budzier et al. 2011).



(a) Auflösbare Temperaturdifferenz in Anlehnung an Minkina & Dudzik (2009)

(b) Spezifische Detektivität in Anlehnung an Schuster (2004)

Abbildung 2.20: Auflösbare Temperaturdifferenz NETD[24] und spezifische Detektivität einiger Sensortypen

Quantendetektoren Quantendetektoren basieren auf der Absorption von einzelnen Photonen und der anschließenden Freisetzung von Ladungsträgern in

[23] *Signal-to-noise Ratio* (SNR)

einem Halbleiterelement (innerer Photoeffekt). Für die Detektion niederenergetischer Infrarotstrahlung müssen Quantenübergänge mit geringer Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband genutzt werden. Dieser Sachverhalt beschränkt die maximale Wellenlänge, für die ein Halbleiterdetektor empfindlich ist (Grenzwellenlänge λ_c) und äußert sich in einem abrupten Abfall der spezifischen Detektivität. Zudem erreichen Quantenempfänger nur in einem kleinen Spektralbereich annähernd ihren Maximalwert (Schuster 2004). Nach Rogalski (2003) kann die Detektivität durch Gleichung 2.23 beschrieben werden:

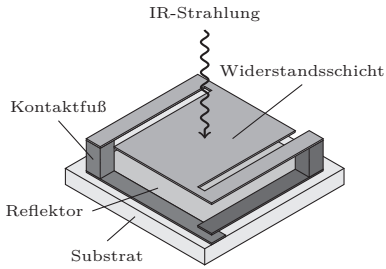
$$D^*_{Ph} = \frac{\lambda}{h_p c} \cdot \frac{\eta}{\sqrt{2(G_R + R_R)\, d_D}} \tag{2.23}$$

η: Quanteneffizienz, G_R: Generationsrate der Ladungsträger, R_R: Rekombinationsrate der Ladungsträger, d_D: Detektordicke

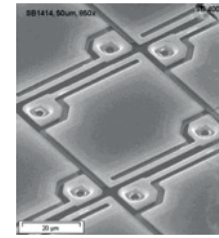
Um die thermisch bedingten Generations- und Rekombinationsraten der Ladungsträger auf einem geringen Niveau zu halten und eine hohe spezifische Detektivität zu erreichen, müssen Quantendetektoren bei tiefen Temperaturen betrieben werden (ca. 77 K). Hierdurch wird die thermische Anregung durch Eigenstrahlung unterdrückt und ein hohes SNR erreicht. Die Absorption in dem Halbleitermaterial erfolgt praktisch instantan, sodass keine zeitlichen Verzögerungen zwischen einer Änderung der Bestrahlungsstärke und der Änderung der erzeugten Ladungsträgerdichte auftreten. Die Auslesefrequenz eines solchen Detektors ist demnach nur durch die gewählte Integrationszeit (SNR), die Ausleseelektronik und das anfallende Datenvolumen begrenzt.

Thermische Empfänger Thermische Empfänger basieren auf der temperaturabhängigen Änderung physikalischer Größen durch die Absorption von Wärmestrahlung. Da die ankommende Strahlungsleistung im Vergleich zu Quantenempfängern im Wesentlichen nicht wellenlängenabhängig absorbiert wird, zeigen sie nur eine geringe Änderung der Detektivität über den Spektralbereich (Schuster 2004)(vgl. Abbildung 2.20b). Die Absorption der Wärmestrahlung bewirkt eine Temperaturänderung ΔT des Sensorelements und damit ihrerseits eine Änderung der elektrischen Größen des Elements. In diesem Zusammenhang werden Bolometer (Widerstandsmessung), Pyrometer (Landungsmessung) und thermoelektrische Detektoren (Spannungsmessung) unterschieden.

Die Änderung der Eigenschaften erfolgt im Gegensatz zu Quantendetektoren nicht instantan und wird durch eine thermische Zeitkonstante τ_{th} charakterisiert. Sie begrenzt die Samplingrate, mit der ein thermisches Signal sinnvollerweise aufgenommen werden kann. Die thermische Zeitkonstante ist durch das Verhältnis aus thermischer Masse C_{th} und thermischer Leitfähigkeit G_{th} eines Detektorelements gegeben ($\tau_{th} = {}^{C_{th}}/_{G_{th}}$) und beträgt für gebräuchliche a-Si-Detektormaterialien ca. 7 ms (Budzier et al. 2013). Sie ist damit um Größenordnungen höher als bei Quantenempfängern (Rogalski 2003).



(a) Schematische Darstellung eines Bolometerpixels



(b) Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Empfängermatrix (Lohrmann et al. 2013)

Abbildung 2.21: Einzelnes Bolometerpixel und dessen Anordnung in einer Empfängermatrix (FPA)

Abbildung 2.21 zeigt die schematische Darstellung eines Bolometer-Detektorelements. Es besteht im Wesentlichen aus einer strahlungsabsorbierenden, rechteckigen Fläche, die über zwei thermisch isolierende Kontakte mit der Ausleseelektronik verbunden ist. Für eine niedrige Zeitkonstante sind hohe thermische Leitwerte notwendig, die ihrerseits jedoch die Temperaturauflösung NETD negativ beeinflussen (Budzier & Gerlach 2011).

Ein fundamentales Limit der spezifischen Detektivität thermischer Sensoren ist nach Rogalski (2003) durch das Rauschen aufgrund von Temperaturfluktuation gegeben. Im stationären Fall (d. h. für sehr kleine Anregungsfrequenzen) beträgt die Detektivität:

$$D^*_{Th} = \sqrt{\frac{\epsilon^2 \, A_D}{4 \, k_B \, T_d^2 \, G_{th}}} \tag{2.24}$$

A_D: Detektorfläche, T_d: Temperatur des Detektors

Für die zeitlich variierende Bestrahlung des thermischen Detektors ist die resultierende Temperaturänderung eines Detektorelements nach Gleichung 2.25 in Abhängigkeit der Anregefrequenzen zu berücksichtigen (Kruse 2001). Dieser Sachverhalt ist bei der Temperaturbestimmung von schnell ablaufenden Vorgängen von Bedeutung. Es gilt:

$$\Delta T = \frac{\alpha \Phi_0}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2}} \tag{2.25}$$

ω: Anregungsfrequenz

2.7 Schlussfolgerungen aus den Betrachtungen zum Stand der Wissenschaft und Technik

Aus den Betrachtungen zum Stand der Wissenschaft und Technik ist erkenntlich, dass es sich beim Laserstrahlschmelzen um einen zunehmend etablierten Prozess mit erheblichen Potenzialen handelt. Die vorherrschende Komplexität in den Dimensionen Anlagentechnik, Verfestigungsstrategie, Ausgangswerkstoff und Bauteilgeometrie führt jedoch zu einer maßgeblichen Streuung und zu einer geringen Vergleichbarkeit der erzeugten Bauteile. Es besteht demnach weiterer Bedarf nach einer Weiterentwicklung der Prozessoptimierung und der Qualitätssicherung. Die frühzeitige Erkennung von Prozessfehlern und möglichen Prozessabbrüchen spielt dabei eine ebenso wichtige Rolle, wie die Reduktion des nachgelagerten Prüfaufwandes.

Die bisherigen Ansätze beschränken sich oftmals auf Einzelaspekte und die erlangten Erkenntnisse sind anlagen- und materialabhängig. In dem nachfolgenden Teil soll ein Beitrag zum Prozessverständnis geleistet werden, indem sowohl Einzelaspekte als auch Wechselwirkungen betrachtet werden.

Hinsichtlich der Qualität ist ersichtlich, dass der In-Process-Überwachung auf Einzelspur- und Schichtebene eine zentrale Rolle zukommt und erst dadurch eine lückenlose Qualitätssicherung möglich wird. Der Stand der Technik zeigt, dass die verfügbaren Methoden zur In-Process-Überwachung entweder den Schichtauftrag, das Schichtergebnis nach der Verfestigung oder die Verfestigung selbst fokussieren. Dabei kommen größtenteils optische Sensoren im sichtbaren Bereich bzw. im Nahinfrarotbereich zum Einsatz. Im Gegensatz dazu wird in der Thermografie die Möglichkeit gesehen, beide Prozessschritte (Verfestigung und Schichtauftrag) zu überwachen und einen wesentlichen Beitrag für eine Qualitätsbewertung anhand der thermischen Historie zu leisten. Da in einem optischen oder thermografischen Ansatz jedoch immer nur die aktuelle Schicht bewertet werden kann, muss die prozessinhärente Beeinflussung bereits verfestigter Schichten bei der Ergebnisauswertung kritisch hinterfragt werden.

Für die Auswahl der Sensorik müssen neben den diskutierten Aspekten (Temperaturbereich, Orts- und Zeitauflösung) auch wirtschaftliche Randbedingungen in Betracht gezogen werden. Während Quantenempfänger im Vergleich zu thermischen Detektoren sehr performant sind, fällt der Investitionsaufwand bei Letzteren deutlich geringer aus. Unabhängig von der eingesetzten Sensorik verdeutlichen die Grundlagen, dass für den Aufbau einer Qualitätssicherung Prozesswissen erforderlich ist. Dieses soll im Rahmen der nachfolgenden Kapitel erarbeitet werden, um als Basis für die In-Process-Überwachung dienen zu können.

3 Vorgehensweise

3.1 Überblick

Nachfolgend wird das allgemeine Vorgehen zur Umsetzung der aus Abschnitt 1.3 abgeleiteten Zielsetzung, unter den in Kapitel 2 diskutierten Randbedingungen, vorgestellt. Es besteht aus mehreren Einzelschritten, die in den anschließenden Kapiteln ausgearbeitet werden.

3.2 Thermografische In-Process-Überwachung

Prinzipbedingt ermöglicht der additive Aufbau von Objekten eine Ergebniskontrolle bzw. -überwachung in allen drei Dimensionen mit einer Auflösung, die nur durch die Schrittweite (z. B. die Schichtdicke) und durch die eingesetzte Sensorik begrenzt ist. Beim SLM lässt sich die eingebrachte Prozesswärme nutzen, um Informationen über den Prozesszustand bzw. die Materialeigenschaften zu gewinnen. Auf dieser Grundlage wird im Folgenden das Vorgehen zur Umsetzung einer auf Wärmestrahlung basierenden In-Process-Überwachung für das SLM beschrieben. Die Messdaten werden dabei in einem schichtweisen Ansatz vor, während und nach dem Energieeintrag aufgenommen.

Charakteristische Merkmale des Wärmehaushaltes sollen extrahiert, ausgewertet und mit den Qualitätsmerkmalen der erzeugten Bauteile bzw. der in Kapitel 4 untersuchten Prozesseigenschaften verknüpft werden. Da diese Fragestellungen sehr anwendungsspezifisch sind, können sie im Rahmen dieser Arbeit nicht vollumfänglich beantwortet werden. Es gilt daher, ein prinzipielles Vorgehen abzuleiten, welches anhand von ausgewählten Aspekten validiert wird. Erste Ansätze, auf welche Prozessparameter und -bedingungen in einer kontinuierlichen Überwachung der Schwerpunkt gelegt werden soll, gehen aus der Richtlinie VDI 3405-1 hervor. Sie umfassen die Schichtauftragsqualität, die zentralen Verfestigungsparameter (Laserleistung , Scangeschwindigkeit und Hatch-Abstand) sowie das resultierende Schmelzbild.

Bei thermografischen Untersuchungen werden Veränderungen in der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität oder der Materialdichte genutzt, um Unregelmäßigkeiten und Fehler von ihrer Umgebung zu separieren (Sackewitz 2011). Der Wärmestrom in oberflächennahen Defektzonen unterscheidet sich gegenüber dem im homogenen Material und führt zu einer charakteristischen, zeitabhängigen Temperaturverteilung auf der Oberfläche. Die Nachweisfähigkeit ist neben technischen Grenzen auch durch eine Zeitkonstante gegeben, mit der die Homogenisierung des Wärmeflusses stattfindet. Auf der anderen Seite bietet die Thermografie im stationären Fall die Möglichkeit, Fehlstellen und Unregelmäßigkeiten aufgrund ihrer lokal unterschiedlichen Emissionseigenschaften zu erkennen. Beide Fälle sind für eine Überwachung von Relevanz.

3.3 Vorgehen

Das Vorgehen in dieser Arbeit ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zu Beginn wird im Rahmen einer Prozessanalyse (vgl. Kapitel 4) Prozesswissen aufgebaut, das in Kombination mit dem diskutierten Stand der Technik (vgl. Kapitel 2) als Wissensbasis für die Überwachung dient. Diese Wissensbasis stellt den Zusammenhang zwischen Einflussgrößen (E) und Zielgrößen bzw. Fehlerbildern (Q) her: $E \leftrightarrow Q$

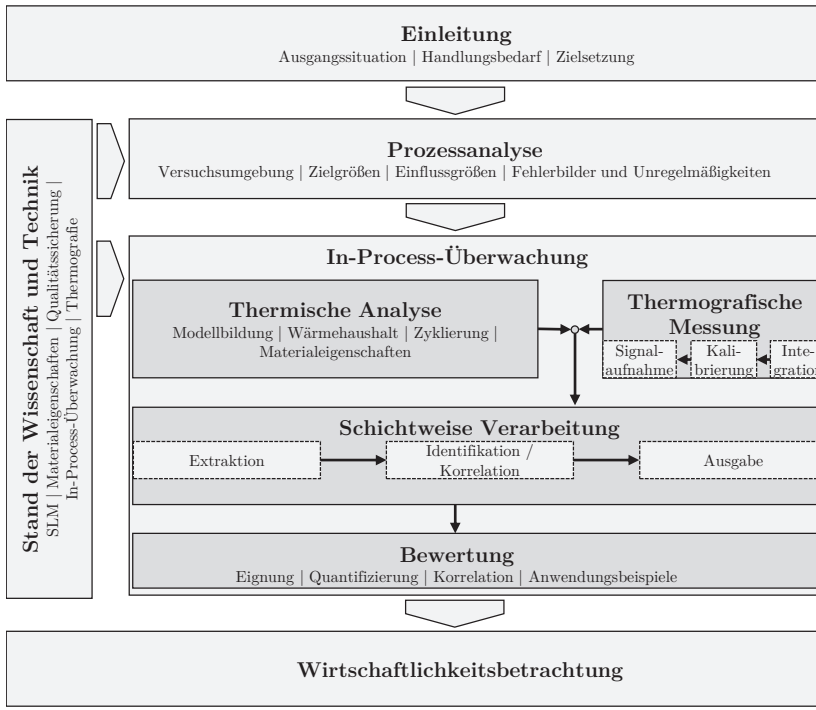


Abbildung 3.1: Vorgehen im Rahmen der vorliegenden Arbeit

Im Anschluss erfolgt die Beschreibung des Aufbaus eines In-Process-Überwachungssystems, das auf der thermografischen Messung und der Analyse des thermischen Verhaltens beim SLM fußt. Durch die Verknüpfung mit einem vereinfachten Prozessmodell werden die thermophysikalischen Materialeigenschaften und die Verfestigungsstrategie in die Analyse mit einbezogen (vgl. Kapitel 5). Die eigentliche Temperaturbestimmung wird unter Berücksichtigung der Prozessumgebung und der verwendeten Sensorik im Anhang diskutiert (vgl. Anhang A.2).

In einem schichtweisen Ansatz (vgl. Kapitel 6) erfolgt anschließend die Extraktion von Merkmalen und Kennzahlen, die hinsichtlich ihrer Eignung als Qualitätsindikatoren überprüft werden müssen. Für diesen Schritt wird der Zusammenhang zwischen Merkmalen / Indikatoren (M) und Einflussgrößen (E) sowie der resultierenden Bauteilqualität / den Zielgrößen (Q) hergestellt: $E \leftrightarrow M \leftrightarrow Q$
Schließlich folgt eine Bewertung und Priorisierung der Merkmale / Indikatoren hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit für die schichtweise In-Process-Überwachung. Die Arbeit endet mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, basierend auf der verwendeten Anlagen- und Systemtechnik (vgl. Kapitel 7).

Das hier betrachtete Konzept zur In-Process-Überwachung beruht auf einer *off-axis* zu der Laseroptik angeordneten Thermografiekamera, mit der eine ortsaufgelöste und quasi zeitgleiche[1] Auswertung des thermischen Haushaltes einer Schicht ermöglicht wird. Der Ansatz bezieht sich dabei auf beide Prozessschritte, den Schichtauftrag und die Verfestigung. Die Relevanz für die resultierende Bauteilqualität ist dadurch gegeben, dass bei Letztgenannter hohe örtliche und zeitliche Temperaturgradienten[2] vorherrschen, die die mikrostrukturellen und mechanischen Eigenschaften des Bauteils bestimmen. Bei Erstgenanntem dagegen besteht die Gefahr von Prozessfehlern und Prozessabbrüchen.

Aus ökonomischen und praktischen Gründen wird nachfolgend der Einsatz eines thermischen Sensors für die Überwachung betrachtet, dessen zeitliche Auflösung im Hz-Bereich liegt. Schnell ablaufende Temperaturänderungen, wie sie beispielsweise bei der Ausbildung und Abkühlung des Schmelzbades vorkommen, sind damit nur eingeschränkt messbar[3]. Aus diesem Grund wird die Temperaturentwicklung bzw. das Abkühlverhalten nach dem Aufschmelzen im festen Zustand fokussiert, das auf einer Zeitskala von Millisekunden bis Sekunden stattfindet. Im Fernfeld ist der Ansatz damit weitgehend unabhängig von der Prozessgeschwindigkeit bzw. dem Schmelzbad, da das Abkühlverhalten auf Umgebungstemperatur hauptsächlich durch die geometrischen Randbedingungen und die Materialeigenschaften bedingt ist[4]. Es wird jedoch ein breiter Temperaturbereich überstrichen, der für thermische Sensoren, aufgrund ihrer wellenlängenunabhängigen Empfindlichkeit, gut zugänglich ist.

[1] bedingt durch die endliche Bildwiederholrate des Kamerasystems, vgl. Anhang A.2.3
[2] $10^4\,\mathrm{K\,mm^{-1}}$ (Branner 2011), $10^6\,\mathrm{K\,s^{-1}}$ (Over 2003)
[3] Für die detaillierte Analyse des Schmelzbades ist nach Kapitel 2 eine Zeitauflösung im kHz-Bereich notwendig.
[4] Zu berücksichtigen ist jedoch, dass das zyklische Wiederaufschmelzen bzw. Wiederaufheizen bereits verfestigter Bereiche den effektiven Wärmeeinflussbereich vergrößert bzw. die effektive Abkühlzeit erhöht.

4 Analyse des Laserstrahlschmelzprozesses

4.1 Überblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Prozessanalyse mit dem Fokus durchgeführt, Wissen für die Prozessüberwachung aufzubauen. Als Basis dient die in Abschnitt 4.2 herausgearbeitete verallgemeinerte Betrachtung des Fertigungssystems und der wirkenden Einflussgrößen. In Abschnitt 4.3 werden dann Methoden der statistischen Versuchsplanung beschrieben und die Versuchsdurchführung erläutert. Für eine ausgewählte Anlagen- und Materialkombination werden damit die Auswirkungen selektierter Prozesseinflussgrößen analysiert. Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.4 die Strukturierung des Wissens, indem vorhandene Defizite und auftretende Unregelmäßigkeiten kategorisiert werden.

Das vorliegende Kapitel beschränkt sich auf den Prozess des additiven Aufbaus. Dem Prozess vor- und nachgelagerte Schritte, ebenso wie der Pulverwerkstoff als Ausgangsmaterial, werden von der Betrachtung ausgenommen. Das Ziel der Analyse ist es, signifikante Einflussgrößen zu charakterisieren. Als statistisch signifikant gelten dabei Parameter, deren Effekte größer als die Zufallsstreuung der Ergebnisse sind (Kleppmann 2009).

Die in der Literatur vorherrschende Herangehensweise zur Prozessanalyse und zum Aufbau von Prozessverständnis kann in zwei Gruppen eingeteilt werden. In der ersten werden einzelne bzw. wenige sog. Einzelspuren betrachtet, die auf ebenen Grundplatten oder auf bereits verfestigten Schichten aus dem gleichen Grundmaterial aufgebaut werden (Averyanova et al. 2012; Gusarov et al. 2007; Yadroitsev et al. 2012). Die untersuchten Zielgrößen sind aufgrund des beschränkten Betrachtungsraumes nicht direkt mit der Bauteilqualität aus dem Realprozess in Verbindung zu setzen. Die zweite Gruppe basiert auf dem Aufbau von geometrischen Primitiven und realen Geometrien, um dem kombinierten Einfluss der Verfestigung durch einzelne Scanvektoren, durch die Verbindung einzelner Schichten und durch den Schichtauftrag Rechnung zu tragen (Liao & Shie 2007; Meier & Haberland 2008). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine kombinierte Vorgehensweise verfolgt, bei der sowohl singuläre als auch kombinierte Untersuchungen zum Tragen kamen.

4.2 Prozess- und Systemgrundlagen

4.2.1 Allgemeine Systemeinteilung

Laserstrahlschmelzanlagen können bezüglich der Hardware in drei Subsysteme eingeteilt werden, die sowohl direkten als auch wechselseitigen Einfluss auf den Prozess ausüben (vgl. Abbildung 4.1).

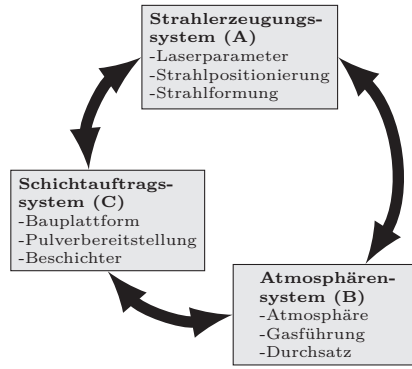


Abbildung 4.1: Allgemeine Einteilung einer SLM-Anlage in Subsysteme

- **System zur Strahlerzeugung und -führung (A)** Das Strahlerzeugungssystem umfasst die Laserquelle und die optischen Komponenten zur Positionierung und Formung des Strahlprofils in der Bearbeitungsebene. Die Positionierung erfolgt durch ein Ablenksystem bestehend aus zwei elektromagnetisch angetriebenen Spiegeln (Galvanometer-Scanner). Eine Planfeldoptik fokussiert den aufgeweiteten Strahl positionsunabhängig in der Bearbeitungsebene. Die resultierende Intensitätsverteilung ist das Ergebnis aus dem Zusammenwirken aller optischen Komponenten und der Atmosphäre im Strahlengang. Sie kann sich bedingt durch thermische Effekte und Verschmutzungen ändern (Fulcher & Leigh 2013; Kühnle et al. 2012) und hat direkten Einfluss auf die Schmelzbadausprägung (Okunkova et al. 2014).
- **Atmosphärensystem (B)** Das System zur Bereitstellung der Schutzgasatmosphäre wird durch die erzeugte Atmosphäre selbst, die Gasführung und den Durchsatz charakterisiert. Das resultierende Schutzgas-Strömungsfeld dient dazu, die Prozesszone zu inertisieren und Prozessnebenprodukte in Form von Schweißrauch (Schmauch), Kondensaten (kondensierter Metalldampf) und Spritzern abzutransportieren. Ein mangelhafter Abtransport, z. B. durch inhomogene Strömungsfelder, führt zu positionsabhängigen Bauteileigenschaften und erhöhter Porosität (Ferrar et al. 2012). Zudem geht mit dem Strömungsfeld ein konvektiver Wärmetransport einher, der die Prozesstemperaturen, die Aufheiz- und die Abkühlraten beeinflusst (Dadbakhsh et al. 2012; Meiners 1999). Die Reinheit des Schutzgases und die Einhaltung einer festgelegten maximalen Restsauerstoffkonzentration werden durch mehrere Filterstufen und den Zufluss von Frischgas sichergestellt.
- **Schichtauftragssystem (C)** Das Schichtauftragssystem umfasst alle Komponenten zur Applizierung und Konditionierung neuer Pulverschich-

ten, darunter: Rakelmechanismus (Beschichter), Bauplattform, Pulvervorrat und Vorheizung. Die Fließeigenschaften des Metallpulvers sind entscheidend für einen gleichmäßigen Schichtauftrag. Es bestehen Abhängigkeiten von der Kornfraktionierung und -morphologie sowie dem Feuchte- und Fremdstoffgehalt (vgl. Ott (2012)).

Die Subsysteme einer Strahlschmelzanlage können nur bedingt unabhängig voneinander betrachtet werden, da es folgende beispielhafte Wechselbeziehungen gibt:

- (A $\leftrightarrow$ B) Der Auftragsmechanismus definiert die Ebene der aufgetragenen Pulverschicht, die nicht notwendigerweise mit der Fokusebene des Laserstrahlsystems, z. B. aufgrund mechanischer Krafteinwirkung, zusammenfallen muss[1].
- (B $\leftrightarrow$ C) Durch das Atmosphärensystem können Teile einer Pulverschicht abgetragen werden und zu einer lokal variierenden Pulverschichtdicke führen. Die Bewegung von Pulverpartikeln durch den Auftragsmechanismus setzt Feinstaub frei, der sich im Atmosphärensystem ablagern kann und den Durchsatz bzw. die Reinheit beeinflusst.
- (A $\leftrightarrow$ C) Durch Absorption und Streuung der Laserstrahlung an Fremdpartikeln in der Atmosphäre kommt es zu einer Strahlaufweitung und einem Leistungsverlust in der Prozesszone. In der Atmosphäre entstehen lokale Temperatur- und Druckunterschiede, die ihrerseits das Strömungsfeld beeinflussen.

4.2.2 Prozesssteuerung und Einflussgrößen

Die Prozesssteuerung bzw. -führung ist durch eine Vielzahl an Einflussgrößen charakterisiert, wobei dem Anlagennutzer i. d. R. nur wenige davon zugänglich sind. Sie beinhalten die Belichtungsstrategie, den Schichtauftrag und die Prozessatmosphäre. Einen Überblick über die zentralen Einflussgrößen zeigt Abbildung 4.2 (vgl. Unterabschnitt 2.2.2). Neben diesen Größen kommen geometriebasierte Verfestigungsparameter hinzu, die überhängende und filigrane Bauteilbereiche, Kanten sowie Konturen berücksichtigen. Das Ziel besteht in der Gewährleistung der Baubarkeit und der Optimierung der Oberflächenqualität (vgl. Unterabschnitt 4.3.4).

Einflussgrößen werden nach Kapitel 2 in Steuer- und Störgrößen eingeteilt. Für den additiven Fertigungsprozess werden zusätzlich geometriebedingte Größen unterschieden (vgl. Abbildung 4.3):

- Die Steuergrößen üben einen systematischen Einfluss auf den Prozess aus und sind durch die Parameter der einzelnen Subsysteme und die zugrunde liegende Prozesssteuerung gegeben. Zu ihrer Analyse werden

[1] Die Wechselwirkung findet über die Bauteile im Prozess statt.

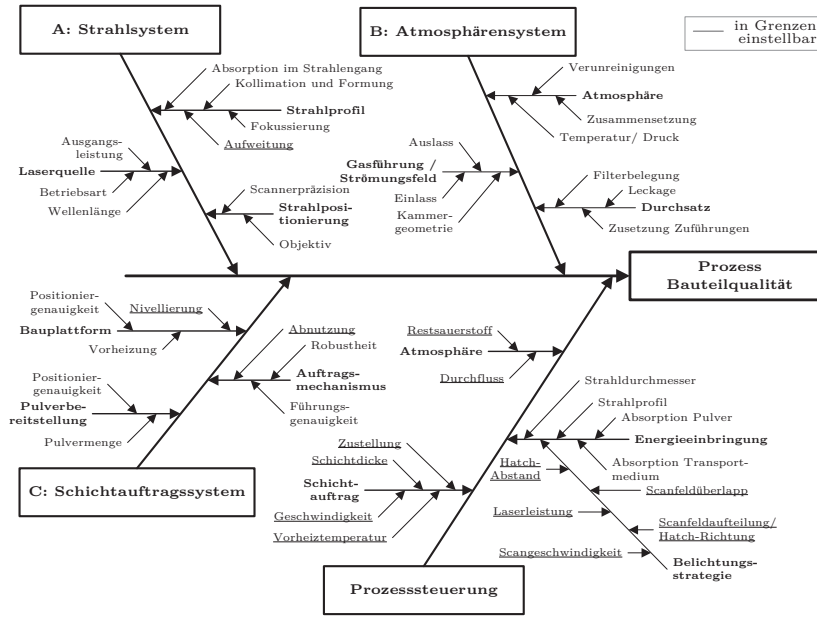


Abbildung 4.2: Subsysteme, Einfluss- und Steuergrößen im SLM-Prozess

geometrische Primitive betrachtet, die durch ihre Form einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Stabilität des Prozesses haben. Die Primitive dienen der Untersuchung von geometrieunabhängigen Materialeigenschaften (Basisqualität) und sind im vorliegenden Fall durch Würfel und Zylinder gegeben. Ihre Querschnittsfläche variiert nicht oder nur geringfügig über die Bauhöhe.

- Störgrößen äußern sich in zufälligen Schwankungen und Driften der Zielgrößen. Sie sind im Wesentlichen durch die Funktionsgenauigkeit der betrachteten Subsysteme und durch Umwelteinflüsse auf die Fertigungsanlage bzw. die verwendeten Ausgangswerkstoffe gegeben.
- Geometriebedingte Einflüsse rühren von einer Abhängigkeit der Prozessstabilität und -qualität von der zu fertigenden Bauteilgeometrie her. Sie werden anhand von nicht-primitiven Geometrieelementen (z. B. Bohrung, Steg, Schräge) untersucht (vgl. Clijsters et al. (2012), Hoeren & Witt (2012) und Kushnarenko (2009)). Die Erkenntnisse können nur bedingt auf beliebige Geometrien übertragen werden, da sie keine Allgemeingültigkeit besitzen.

In diesem Zusammenhang werden die Begriffe Prozessrobustheit, Prozessstabilität, Prozessstreuung und Reproduzierbarkeit vielfach gleichbedeutend

verwendet (vgl. Küsters et al. (2011) und Rehme & Emmelmann (2005)). Sie beschreiben die Fähigkeit des Systems, „Veränderungen ohne Anpassung der anfänglichen Struktur standzuhalten“ (Wieland & Marcus Wallenburg 2012). Ein robuster Prozess ist nicht sensitiv gegenüber unkontrollierbaren Größen (Störgrößen) und liefert gleichbleibende (reproduzierbare) und vorhersagbare Ergebnisse (vgl. Borkowski & Lucas (1997)). Nachfolgend werden die Einflussgrößen charakterisiert und die Robustheit bzw. Reproduzierbarkeit anhand der Prozessstreuung abgeschätzt.

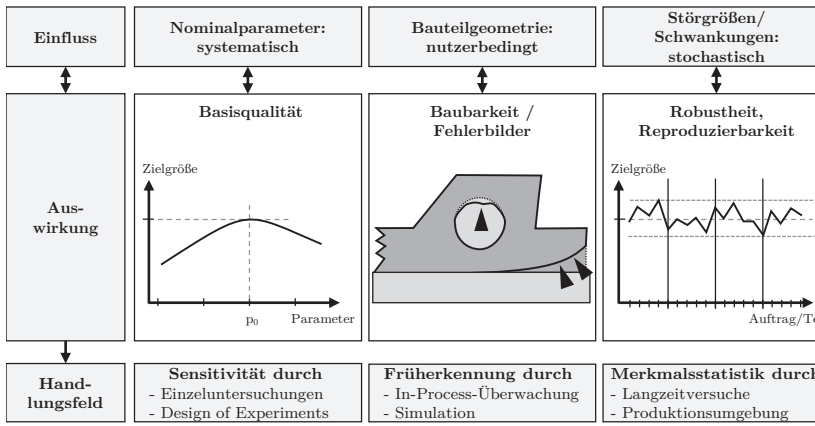


Abbildung 4.3: Einteilung von Prozesseinflussgrößen und daraus abgeleitete Handlungsfelder

4.3 Analyse von Einflussgrößen

4.3.1 Versuchsumgebung

Ergänzend zu den allgemeinen Eigenschaften bzw. Merkmalen einer Strahlschmelzanlage nach Unterabschnitt 2.2.1 wird nachfolgend die Versuchsanlage charakterisiert, die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stand. Es handelte sich dabei um eine industrielle Anlage vom Typ *EOSINT M270* der Firma *EOS GmbH*. Die Anlage ist mit einem 200-W-Ytterbium-Faserlaser (Wellenlänge 1079,9 nm) ausgestattet und wird im cw-Modus[2] betrieben. Zur Strahlformung und -positionierung werden entlang der Strahlführung folgende Komponenten eingesetzt (vgl. Abbildung 4.4): Transportfaser, Kollimator, Aufweite-Optik, Galvanometer-Scanner, Planfeldoptik (f/Θ-Linse) und Schutzglas. Das resultierende Intensitätsprofil des Laserstrahls ist gaußförmig mit einem Strahlqualitätsfaktor von $M^2 < 1{,}02$ (vgl. Anhang A.1.5).

[2] engl. *Continuous wave*, Dauerstrich

In der Versuchsanlage kommt zur Aufrechterhaltung der Prozessatmosphäre eine Umwälzanlage mit 2-stufigem Filtersystem zum Einsatz. Die Eintrittsöffnung für das Schutzgas ist koaxial zur optischen Achse angeordnet, während das verbrauchte Gas lateral abgesaugt wird. Das sich ergebende Strömungsfeld über der Bauebene ist demnach weder laminar noch symmetrisch (vgl. Ferrar et al. (2012)). Die Schichtapplizierung erfolgt durch einen Rakelmechanismus, der aufgrund seiner Bewegung eine Vorzugsrichtung beim Pulverauftrag induziert.

Für alle Untersuchungen wurde der herstellereigene Pulverwerkstoff „EOS NickelAlloy IN718“ verwendet, der in seinen chemischen Eigenschaften dem Werkstoff 2.4668 entspricht (vgl. Abschnitt 2.3) und eine vorwiegend sphärische Form der Pulverpartikel aufweist. Der mittlere Korndurchmesser liegt in der Größenordnung von 30 µm bis 50 µm und kann sich durch mehrfaches Sieben und Aufbereiten geringfügig verschieben (vgl. Sears (2012) und Strondl et al. (2015)).

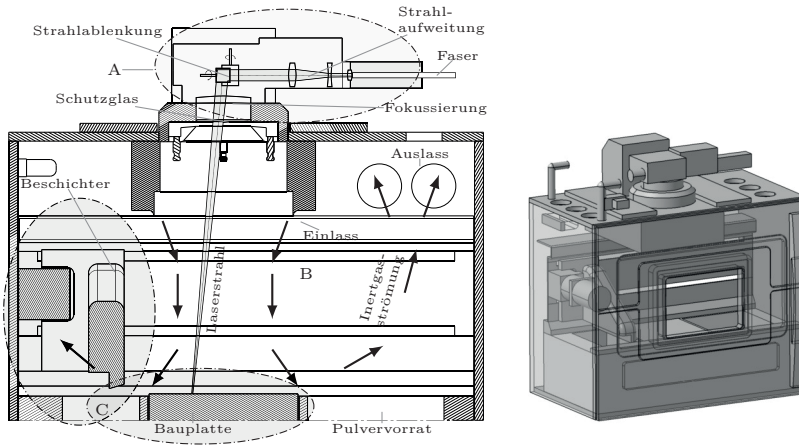


Abbildung 4.4: Versuchsanlage vom Typ EOS M270, Schnittansicht (links) und 3D-Ansicht (rechts) der Baukammer

4.3.2 Versuchsplanung und Zielgrößen

Vorgehen Zur Prozessanalyse und Qualitätssteigerung kommen im Bereich der additiven Fertigung u. a. Methoden der Dimensionsanalyse (Cardaropoli et al. 2012; van Elsen 2007), der statistischen Versuchsplanung[3] und der

[3] *Design of Experiments* (DoE). Diese Methoden werden allgemein für die Optimierung von Prozessen eingesetzt, vgl. Montgomery (1997)

Varianzanalyse[4] zur Anwendung (vgl. Averyanova et al. (2012), Delgado et al. (2012) und Liao & Shie (2007)).

Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise erweitert diese Ansätze durch Berücksichtigung einer nicht-primitiven Bauteilgeometrie. In einer Langzeitstudie wurden geometriebedingte Einflüsse charakterisiert und die Prozessstreuung abgeschätzt. Das Vorgehen besteht in der Ermittlung von Haupteinflussgrößen durch Vorversuche, der Bestimmung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie der Ergänzung durch singuläre Untersuchungen (vgl. Abbildung 4.5)

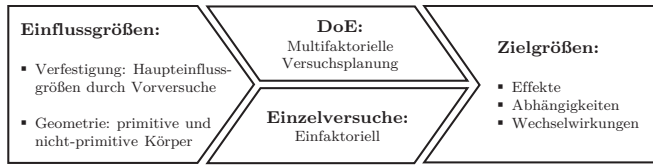


Abbildung 4.5: Vorgehen bei der Prozessanalyse

Zielgrößen Als Zielgrößen bei additiven Fertigungsverfahren werden in der Literatur zahlreiche Qualitätsmerkmale genannt und untersucht (vgl. Unterabschnitt 2.4.3). Der Porosität kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. Sie verschlechtert die mechanischen Eigenschaften und senkt die Lebensdauer der Bauteile (Ilschner & Singer 2010), sodass es sie zu minimieren gilt (Spierings et al. 2011). Die Richtlinie VDI 3405-2 fasst die Qualitätseigenschaften additiv gefertigter, metallischer Bauteile zusammen. Diese sind: Dichte, Festigkeit, Härte, Oberflächengüte, Maßhaltigkeit, Eigenspannungsverhalten, Rissfreiheit und Gefügehomogenität. Die in der vorliegenden Analyse betrachteten Zielgrößen und Messverfahren sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Haupteinflussgrößen Komplexe Systeme unterliegen mehreren Einflussgrößen (k Faktoren), die untereinander in Wechselwirkungen stehen, d. h. die Auswirkung der Variation eines Faktors hängt von der Einstellung der anderen Größen ab. Um eine vollständige Aussage über Auswirkungen und Wechselwirkungen zu geben, müssen die Faktoren vollfaktoriell untersucht werden. Dazu werden alle Kombinationen von Faktoreinstellungen (= n Faktorstufen) betrachtet. Dies bedingt einen Aufwand von n^k Versuchen, der für viele Anwendungen nicht praktikabel ist. Mit der statistischen Versuchsplanung (DoE) kann der Versuchsumfang erheblich reduziert werden, indem mehrere Faktoren gleichzeitig verändert werden und die Ergebnisse eines Versuchs für die Effektbestimmung mehrerer Faktoren genutzt werden (Kleppmann 2009). Hierfür findet eine Beschränkung auf Haupteinflussgrößen statt, höherdimensionale

[4] *Analysis of Variance* (ANOVA)

Tabelle 4.1: Untersuchte Zielgrößen im Rahmen der Prozessanalyse

Merkmal	Messgrößen	Verfahren
Dichte	Fehlerflächenanteil[a], Bauteildichte	Schliffbildanalyse, Tauchanalyse
Festigkeit	Zugfestigkeit $R_{\max}$, Streckgrenze R_{p02}, E-Modul E_{zug}, Bruchdehnung A_{zug}	statischer Zugversuch DIN EN ISO 6892-1
Härte	Vickers-Härte HV5	Härtprüfung DIN EN ISO 6507-1
Oberflächengüte	Rauheit R_a	Tastschnittverfahren, JIS 2001, λ-*Cut-off*: 2,5 mm, Messlänge: 12,5 mm
Maßhaltigkeit	charakteristische Längenmaße (vgl. Anhang A.1.2)	Streifenlichtprojektion
Gefügehomogenität	Fehleranzahl nach Kategorie: rund[b], kompakt[c], flach[d], klein[e], sonstige	Schliffbildanalyse, Bildverarbeitung

[a] Der Fehlerflächenanteil (FFA) berücksichtigt alle durch Schwellwertbildung ermittelten Fehlerflächen im Schliffbild (Poren, Risse, Bindefehler und Einschlüsse).
[b] rund: z. B. Gasporosität
[c] nicht-sphärische Fehler: lokal stark begrenzt, z. B. Einschlüsse
[d] flach: z. B. Bindefehler zwischen Schichten
[e] kleine Fehler: längstes geometrisches Maß $< 5\,\mu m$

Faktorwechselwirkungen werden vernachlässigt und die Faktorstufen werden nach statistischen Gesichtspunkten optimiert.

Zur Auswahl der dominanten Haupteinflussgrößen für die Versuchsplanung kommt der Variablenvergleich nach Shainin zum Einsatz (vgl. Kleppmann (2009)). Die Zielgröße Dichte wird dabei in einem zweistufigen Experiment untersucht, bei dem den Einflussgrößen jeweils eine „gute“ und eine „schlechte“ Einstellung zugeordnet wird. Als Basis dient der Standardparametersatz des Herstellers („Gut“-Einstellung) und eine auf Vorversuchen basierende „Schlecht“-Einstellung (vgl. Anhang A.1.1). Pro Versuch wird jeweils ein Faktor zwischen der „Gut“/„Schlecht“-Einstellung umgestellt, die restlichen Faktoren bleiben unverändert. Kommt es zu einer signifikanten Änderung der Dichte, so handelt es sich um einen dominanten Faktor (vgl. Abbildung 4.6).

Die so identifizierten Haupteinflussgrößen (Hatch-Abstand, Schichtdicke, Scangeschwindigkeit, Laserleistung und Belichtungsstrategie) dienen im Folgenden neben der Bauteilorientierung[5] als Grundlage für die Versuchsplanung.

[5] Nach Kapitel 2 sind v. a. die Festigkeitseigenschaften beim SLM richtungsabhängig. Durch Dichteuntersuchungen kann diese Richtungsabhängigkeit nicht aufgezeigt werden.

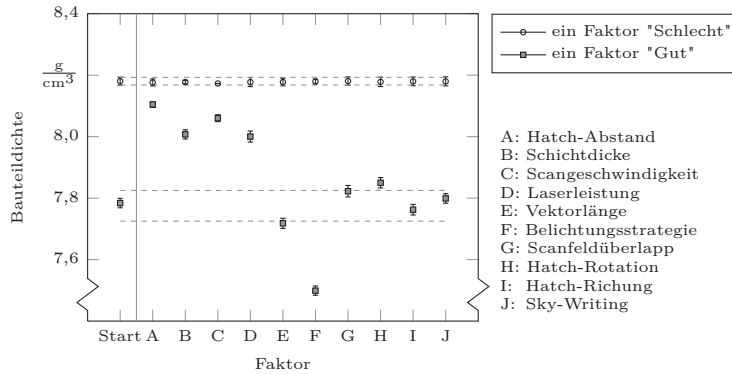


Abbildung 4.6: Variablenvergleich für ausgewählte Faktoren. Die Fehlerbalken zeigen die Messstreuung von $6\,\sigma$ an. Für den Initialsatz sind alle Faktoren entweder auf dem „Gut"-Level oder alle auf dem „Schlecht"- Level eingestellt (vgl. Anhang A.1.1). Versuchskörper: Iconel 718-Quader, geschliffen, Kantenlänge 14 mm; Dichtebestimmung: Tauchanalyse, Unsicherheit Massenbestimmung: 1×10^{-5} g.

Versuchsplan Die Versuchsplanung umfasst insgesamt fünf Faktoren, deren Abhängigkeiten und Wechselwirkungen auf die Zielgrößen bestimmt wurden. Es kam ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan auf Basis eines teilfaktoriellen Versuchsplans der Ordnung 2^{5-1} zum Einsatz (vgl. Anhang A.1.3). Die Auflösung[6] des gewählten Plans beträgt V, sodass alle Wechselwirkungen zwischen zwei Parametern identifiziert werden konnten. Höhere Wechselwirkungen wurden dagegen vernachlässigt. Durch zusätzliche Sternpunkte im Versuchsraum können quadratische Modelle zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen abgeleitet werden. Sie ermöglichen später eine genauere Bestimmung des multikriteriellen Optimums. Der Abstand der Sternpunkte von dem durch den teilfaktoriellen Basisplan aufgespannten Versuchsraum wird unter der Bedingung gewählt, dass der resultierende Versuchsplan orthogonal wird und die Korrelationen der Eingangsparameter ein Minimum erreichen. Dieses Vorgehen führt zu engen Vertrauensbereichen für die zu bestimmenden Parametereffekte (vgl. Kleppmann (2009)).

Abbildung 4.7 zeigt die Anordnung der Versuchskörper. Sie befanden sich in der Mitte des Baufeldes, um maschinenspezifische, positionsabhängige Einflüsse[7] auf einem geringen Niveau zu halten. Die Laserleistung wurde für die Versuchsplanung auf dem für diesen Anlagentyp empfohlenen Maximum von

[6] Die Auflösung eines Versuchsplans beschreibt das Ausmaß, in dem Faktoren und Wechselwirkungen vermengt sind.

[7] Diese sind in der Bauplattformheizung, dem Schutzgasströmungsfeld und der Abbildungsoptik begründet.

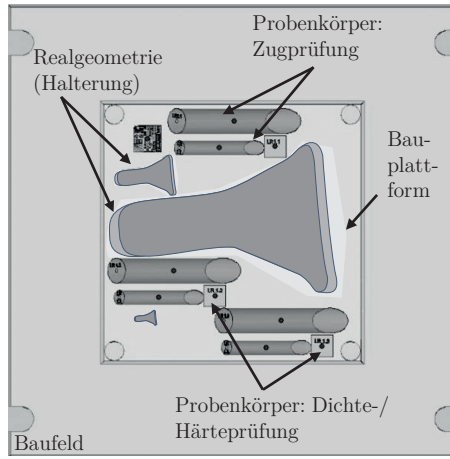


Abbildung 4.7: Anordnung und Versuchskörper für die Prozessanalyse. Die Versuchsplanung umfasst 30 Einzelversuche (Bauaufträge); gesamter Versuchszeitraum: 8 Monate. Aufbau auf verkleinerter Bauplattform $150 \times 150 \times 15\,\mathrm{mm}$;

195 W belassen, da eine Reduktion der Laserleistung für praktische Anwendungsfälle aus Produktivitätsaspekten nicht in Frage kommt. Ihr Einfluss auf die grundlegende Schmelzbadformung wurde stattdessen in Einzelversuchen ermittelt (vgl. Unterabschnitt 4.3.3).

In dem Versuchsplan wurden die Eigenschaften des Pulverausgangswerkstoffes nicht explizit als Faktoren berücksichtigt. Unterschiedliche Chargen, deren Mischungen sowie wiederholte Sieb- und Aufbereitungsvorgänge gehen daher implizit als Störgrößen ein und äußern sich in der resultierenden Gesamtstreuung (vgl. Unterabschnitt 4.3.5).

Nach dem Aufbau wurden die Probenkörper zweistufig wärmebehandelt. Zuerst erfolgte ein Spannungsarmglühen auf der Substratplatte nach AMS5662 bei 700 °C, um die Eigenspannungen bzw. Verformungen, die beim Trennen von Bauträger und Bauteil freiwerden, weitestgehend zu minimieren. Nach der Abtrennung wurden die Versuchskörper bei 760 °C ausgelagert, um das für die Anwendung notwendige Gefüge einzustellen.

4.3.3 Systematische Einflüsse auf das Prozessergebnis

4.3.3.1 Mechanische Eigenschaften

Abbildung 4.8 zeigt die Streckgrenze und den E-Modul für die untersuchten Parameter, sortiert nach Schichtdicke und Aufbaurichtung. Für die geringste

untersuchte Schichtdicke von 20 µm ist eine signifikante[8] Abhängigkeit der Dehngrenze und des E-Moduls von der Aufbaurichtung zu erkennen. Für höhere Schichtdicken nimmt diese Abhängigkeit ab. Aus Abbildung 4.9 sind die Effekte und Wechselwirkungen der einzelnen Parameter ersichtlich.

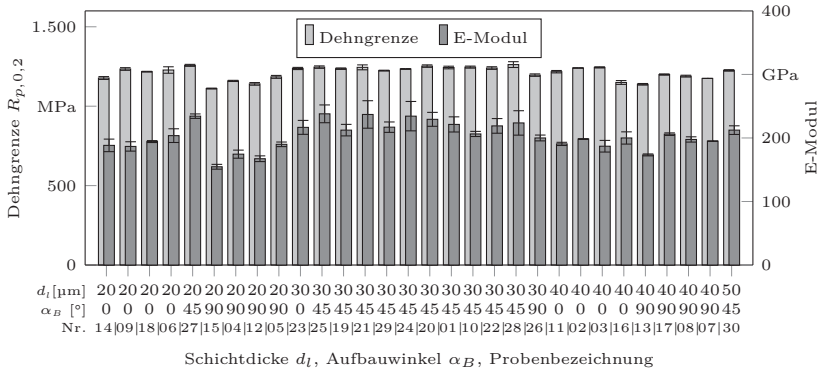


Abbildung 4.8: Dehngrenze und E-Modul nach Wärmebehandlung für unterschiedliche Schichtdicken und Aufbauwinkel, die Fehlerangabe entspricht $\pm 1\sigma$; Versuchsnummer gemäß Anhang A.1.3.

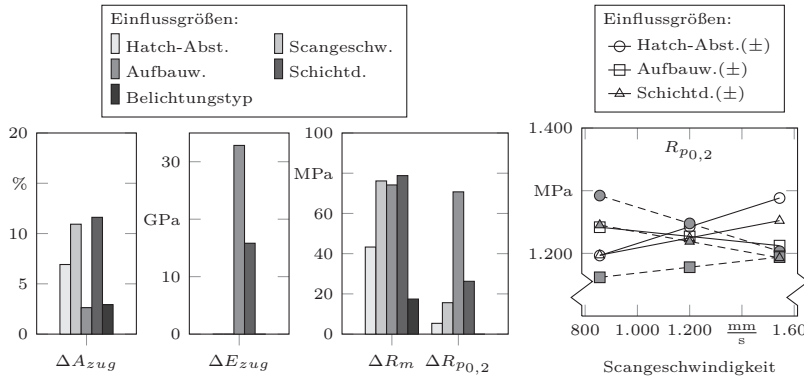
Aus den experimentellen Ergebnissen wurden schrittweise quadratische Regressionsmodelle abgeleitet. Unter Betrachtung der Effekte und Streuungen, die die einzelnen Parameter verursachen, wurden nicht signifikante Parameter und Wechselwirkungen durch Varianzanalyse aus den Regressionsmodellen entfernt (vgl. Anhang A.1.4).

Die Aufbaurichtung kann als signifikanter Effekt auf die mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur, hier in Form von Zugfestigkeit, Streckgrenze und E-Modul, identifiziert werden (vgl. Abbildung 4.9). Trotz Wärmebehandlung ist eine Richtungsabhängigkeit gegeben, die in dem betrachteten Versuchsraum eine Änderung der Zugfestigkeit und Dehngrenze in der Größenordnung von 70 MPa bewirkt. Die Scangeschwindigkeit und die Schichtdicke wirken sich dagegen vornehmlich auf die Duktilität, hier in Form der Bruchdehnung, aus. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Zielgrößen sind für den Elastizitätsmodul nur die Effekte der Schichtdicke und der Aufbaurichtung signifikant. Die gewählte Belichtungsstrategie hat mit Ausnahme der Zugfestigkeit keine dominante Auswirkung auf die untersuchten mechanischen Eigenschaften.

Als signifikante Zwei-Faktor-Wechselwirkungen konnten hauptsächlich die Wechselwirkungen mit der Scangeschwindigkeit identifiziert werden (vgl. Streckgrenze $R_{p0,2}$ in Abbildung 4.9b). Für den Elastizitätsmodul dagegen ist vor-

[8] Der Effekt eines Faktors ist größer als die Breite seines Vertrauensbereichs.

nehmlich die Wechselwirkung zwischen Aufbaurichtung und Schichtdicke relevant.



(a) Parametereffekte an dem Zentralpunkt: $d_l = 30\,\mu m$, $v = 1200\,mm/s$, $a_h = 90\,\mu m$

(b) Wechselwirkungen für obere (+, gestrichelt) und untere (−) Einstellungen

Abbildung 4.9: Effekte und Wechselwirkungen für mechanische Eigenschaften

4.3.3.2 Mikrostrukturelle Eigenschaften

Die Mikrostruktur bzw. das Gefüge wird nach Schatt (1996) durch die Art, Form, Größe, Verteilung und Orientierung der Gefügebestandteile charakterisiert. Nach den Ausführungen in Unterabschnitt 4.3.2 wird der Fokus in diesem Abschnitt auf die Gefügedichte, die geometrische Form der Unregelmäßigkeiten (vgl. Tabelle 4.1) und die Härte gelegt.

Abbildung 4.10 zeigt die in dem Versuchsraum ermittelten FFA, unterteilt nach den Einflussgrößen Schichtdicke und Belichtungsstrategie. Anhand der Effekte und Wechselwirkungen (vgl. Abbildung 4.11) lässt sich ein signifikanter Einfluss der Scangeschwindigkeit, des Hatch-Abstandes und der Schichtdicke erkennen. Jeder dieser Parameter verursacht in dem Versuchsraum eine Veränderung des FFA in der Größenordnung von 0,25 % bis 0,35 %. Die Ursache ist auf den resultierenden Gesamtenergieeintrag nach Gleichung 4.1 zurückzuführen:

$$E_{vol} = \frac{P}{v_s a_h d_l} \tag{4.1}$$

Hohe Schichtdicken, Hatch-Abstände und Scangeschwindigkeiten reduzieren demnach den nominellen Energieeintrag. Dies wiederum reduziert das aufgeschmolzene Materialvolumen darunterliegender Schichten bzw. benachbarter

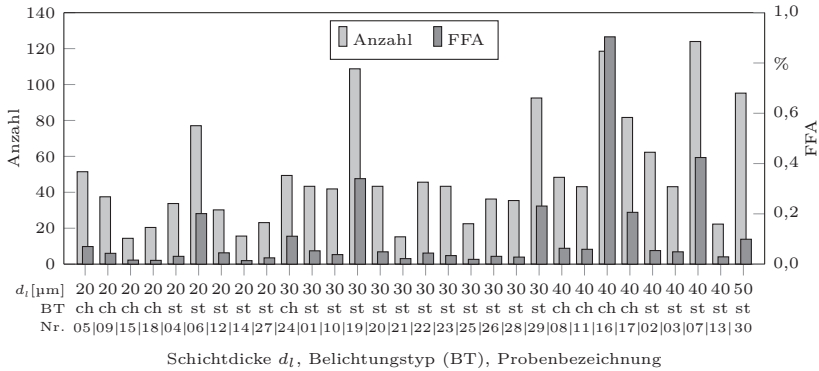
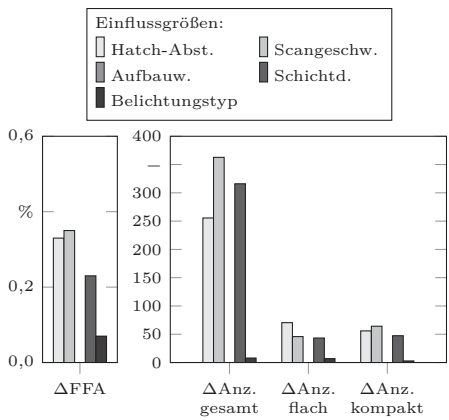
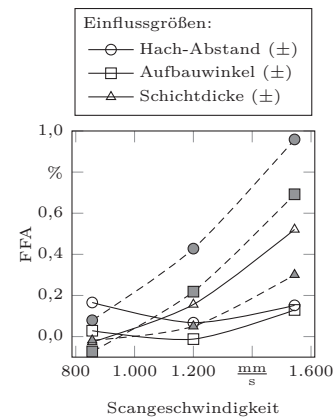


Abbildung 4.10: FFA und Fehleranzahl/mm^2 für untersuchte Parameter, (st): Streifenbelichtung, (ch): Schachbrettbelichtung

Schweißbahnen und führt zu einer schlechteren Anbindung bzw. zur Entstehung von Fehlstellen. Die größten FFA ($> 0{,}35\,\%$) wurden bei erhöhten Hatch-Abständen ($a \geq 100\,\mu\text{m}$) gemessen.



(a) Parametereffekte an dem Zentralpunkt ($d_l = 30\,\mu\text{m}$, $v = 1200\,\text{mm/s}$, $a_h = 90\,\mu\text{m}$)



(b) Wechselwirkungen für obere (+, gestrichelt) und untere (−) Einstellungen

Abbildung 4.11: Effekte und Wechselwirkungen für Fehlerflächen; geringfügig negative Werte ergeben sich aus der quadratischen Approximation

Aus der Effektanalyse in Abbildung 4.11 sind die signifikanten Einflussgrößen auf die unterschiedlichen Fehlertypen ersichtlich. Gemittelt über den gesam-

ten Versuchsraum dominieren zahlenmäßig die Fehler kleiner 5 µm. Aufgrund ihrer Größe wird ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften als gering eingeschätzt, ein lokal vermehrtes Auftreten deutet jedoch auf Prozessunregelmäßigkeiten an dieser Stelle hin.

Runde Fehler werden hauptsächlich von der Schichtdicke, flache Fehler von dem Hatch-Abstand und kompakte bzw. kleine Fehler von der Scangeschwindigkeit beeinflusst. Eine Richtungsabhängigkeit des FFA kann nur durch geometriebedingte Randeffekte verursacht werden und wurde in der Studie nicht festgestellt. Die Wechselwirkungen der Prozessparameter gehen aus Abbildung 4.11b hervor. Für steigende Scangeschwindigkeiten ist demnach immer mit einem Anstieg des FFA zu rechnen. Nach Abschnitt 2.3 wirkt sich die Porosität bzw. der FFA auf die mechanischen Kenngrößen aus. Für die untersuchten Probekörper wird dies anhand der berechneten Korrelationen bestätigt (vgl. Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Zusammenhang zwischen FFA und weiteren Zielgrößen anhand des Pearson-Korrelationskoeffizienten

Korrelationen	Zugfestigkeit	Dehngrenze	E-Modul	Bruchdehnung	Härte
FFA	−0,6	−0,3	0,0	−0,7	−0,9

Zudem lässt sich feststellen, dass der Belichtungstyp einen Einfluss auf die Unregelmäßigkeiten im Gefüge hat. Die Schachbrettbelichtung (vgl. Unterabschnitt 2.2.4) verursacht einen Anstieg des FFA in der Größenordnung von 0,07 % (Absolutwert), der Effekt fällt aber im Verhältnis zu den anderen Parametern gering aus. Der wesentliche Unterschied zwischen der Streifen- und der Schachbrettbelichtung ist in dem Temperaturzyklus zu sehen. Bei der Schachbrettbelichtung schließen die Scanfelder mehrheitlich an bereits abgekühlten Bereichen an, während bei der Streifenbelichtung eine Streifenseite immer an der „heißen“ Seite des vorherigen Streifens (Scanfeldes) liegt. Zudem variiert die Belichtungszeit eines Streifens bei der Streifenbelichtung mit der Bauteilgeometrie, während sie bei der Schachbrettbelichtung konstant bleibt. Diese Unterschiede können einen variierenden Fehlerflächenanteil begründen.

Die Härte variiert in dem Versuchsraum nur geringfügig (vgl. Abbildung 4.12) und liegt nach Wärmebehandlung im Durchschnitt bei 450 (HV5). Signifikante Abhängigkeiten sind durch den Hatch-Abstand, die Scangeschwindigkeit und die Schichtdicke gegeben. Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen (vgl. Abbildung 4.13) lässt sich für nahezu alle Paramtereinstellungen ein Abfall der Härte mit zunehmendem Hatch-Abstand feststellen, der in der reduzierten Anbindung benachbarter Schweißspuren begründet liegt.

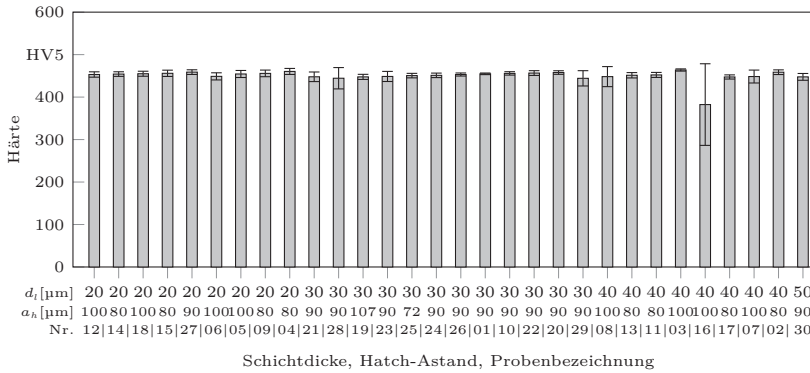
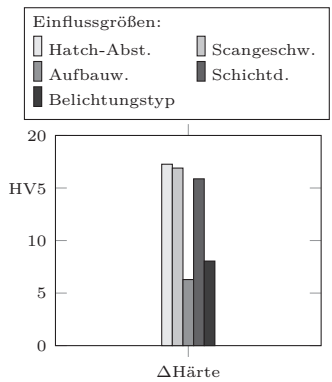
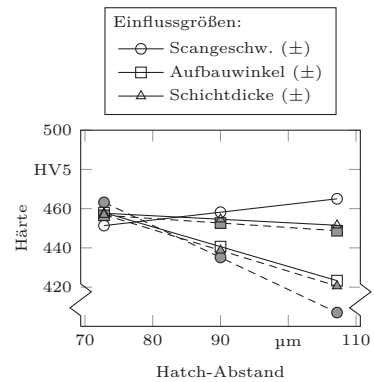


Abbildung 4.12: Härte nach Wärmebehandlung, Fehlerangabe entspricht $\pm 1\sigma$ bei jeweils 5 Messpunkten; Versuchsnummer gemäß Anhang A.1.3.



(a) Parametereffekte an dem Zentralpunkt: $d_l = 30\,\mu m$, $v = 1200\,mm/s$, $a_h = 90\,\mu m$



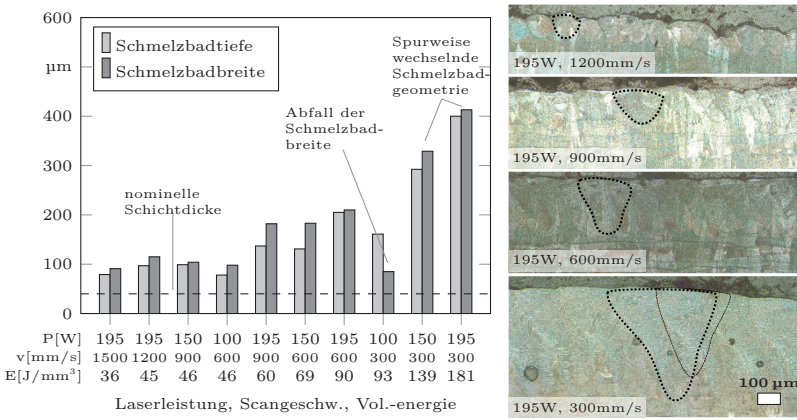
(b) Wechselwirkungen für obere (gestrichelt) und untere Einstellungen

Abbildung 4.13: Effekte und Wechselwirkungen für die Härte; Abhängigkeiten von dem Aufbauwinkel sind zufällig bedingt und liegen unterhalb der Standardabweichung

Schmelzspurformung Zur detaillierten Untersuchung der Schmelzspurformung und Porenentstehung wird nachfolgend die Schmelzbadgeometrie betrachtet. Die geometrischen Abmessungen wurden anhand von geätzten Parallelschliffen[9] analysiert. Die Scanrichtung war in den oberen Schichten der Proben so eingestellt, dass einzelne Schmelzbahnen vollständig sichtbar wur-

[9]Schliffebene parallel zur Aufbaurichtung

den[10] (vgl. Abbildung 4.14).



(a) Schmelzbadbreite und -tiefe. Mittelwert über 30 Spuren, Standardabweichung ≈ 15 µm

(b) Beispielhafte Schliffbild-aufnahmen mit Schmelzbadmarkierung

Abbildung 4.14: Schmelzbadgeometrie für unterschiedliche Energieeinträge

Nach Abbildung 4.14 übersteigt die reale Schmelzbadtiefe die nominelle Schichtdicke um ein Vielfaches. Dies führt zu einem wiederholten Umschmelzen bereits verfestigter Schichten und zu einer schmelzmetallurgischen Verbindung dieser Schichten. Die Schmelzbadabmessungen (Tiefe und Breite) steigen mit zunehmendem Energieeintrag an. Für Energieeinträge ab $E_{vol} \approx 100\,{}^{J}/_{mm^3}$ sind vermehrt Poren im unteren Bereich des ursprünglichen Schmelzbades zu erkennen. Nach Gong et al. (2014) können diese mit einem Übergang vom Wärmeleitungsschweißen in das Tiefschweißen in Verbindung gebracht werden. Eine Diffusion von Gasen an die Schmelzbadoberfläche kann durch die veränderte Schmelzbaddynamik nicht mehr stattfinden und es kommt zur Ausbildung von Gasporen.

Darüber hinaus kommt es zu einer Beeinflussung von benachbarten Schmelzspuren. Hohe Energieeinträge führen dazu, dass unverfestigtes Pulver aus dem benachbarten Bereich in das Schmelzbad hineingezogen wird. Der dadurch entstehende Pulvermangel bei nachfolgenden Schmelzspuren führt zu wechselnden Schmelzbadabmessungen und resultiert in einer periodischen Oberflächentopologie, die von großen Abständen zwischen Minimum und Maximum geprägt ist.

[10] Zu diesem Zweck wurde in 10 aufeinanderfolgenden Schichten die Scanrichtung konstant belassen. In der zu untersuchenden 11. Schicht wurde die Scan-Richtung um 90° gedreht, sodass das Schmelzbad nicht von den darunterliegenden Schmelzspuren überlagert wurde.

Diese und weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Gefügedichte maßgeblich von dem Energieeintrag und der damit verbundenen Schmelzbaddynamik abhängig ist. Die Wechselwirkung zwischen den energiebestimmenden Größen nach Gleichung 4.1 und weiteren belichtungsspezifischen Parametern führten dazu, dass hohe Streuungen der Bauteildichte bei unterschiedlichen Konfigurationen auftreten (vgl. Abbildung 4.15).

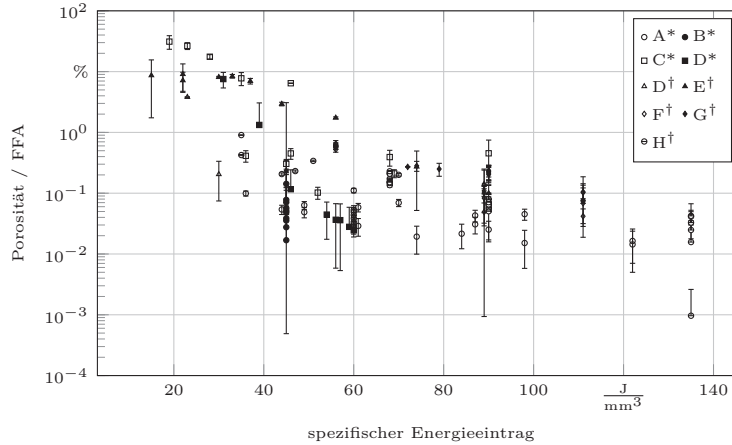


Abbildung 4.15: Porosität/FFA in Abhängigkeit des Energieeintrages aus unterschiedlichen Versuchsreihen (A-H), variierte Parameter: Laserleistung, Schichtdicke, Hatch-Abstand, Scangeschwindigkeit, Belichtungstyp und Scanfeldgröße. Würfelproben, Oberfläche sandgestrahlt bzw. geschliffen, Tauchanalyse nach Archimedes(†) und Schliffbildanalyse(*);

4.3.4 Geometriebedingte Einflüsse auf das Prozessergebnis

Durch die Geometrie der zu fertigenden Bauteile und die gewählte Bauteilorientierung kommt es zu Einflüssen auf den SLM-Prozess, die sich ihrerseits auf die Maßhaltigkeit und die Prozessstabilität auswirken können (vgl. Seidel et al. (2013), Danjou (2010), Hoeren & Witt (2012), Yasa et al. (2009)):

- Der thermisch bedingte, geometrieabhängige **Bauteilverzug**
- Die Beeinflussung des thermischen Haushalts und der mechanischen Anbindung durch **Stützstrukturen**
- Die Auslegung **filigraner Strukturen**, die durch den Kontakt mit dem Beschichtungsmechanismus zerstört werden können und einen homogenen Pulverauftrag gefährden

- Die gewählte **Bauteilorientierung**, die sich auf die Oberflächenbeschaffenheit auswirkt (Treppenstufeneffekt[11], lokal variable Wärmeleitungsbedingungen an Pulver-Feststoff-Grenzen z. B. überhängende Bauteilbereiche)
- Die im Prozess entstehenden **Kantenüberhöhungen** an Bauteilenaußenseiten, die einen orientierungsabhängigen, mechanischen Kontakt mit dem Beschichtungsmechanismus verursachen

4.3.4.1 Maßhaltigkeit

In welchem Maße sich neben den Prozessparametern die geometriebedingten Einflüsse auf die Maßhaltigkeit auswirken, wurde anhand eines Realbauteils im Rahmen der oben beschriebenen Versuchsplanung untersucht. Es handelt sich dabei um eine Haltergeometrie für einen Aktuator in dem Hochdruckverdichter eines Triebwerks. Zur Analyse wurde u. a. der Orientierungswinkel des Bauteils relativ zu der Aufbaurichtung variiert. Die Stützstrukturauslegung erfolgte nach Maßgabe eines Grenzwinkels, unterhalb dessen die relevanten Bauteilflächen unterstützt werden. Als Qualitätskriterien werden charakteristische Längen- und Winkelmaße der Bauteilgeometrie herangezogen (vgl. Anhang A.1.2). Abbildung 4.16 zeigt die in dem Versuchsraum ermittelten Abweichungen in Abhängigkeit der Orientierung und der Schichtdicke.

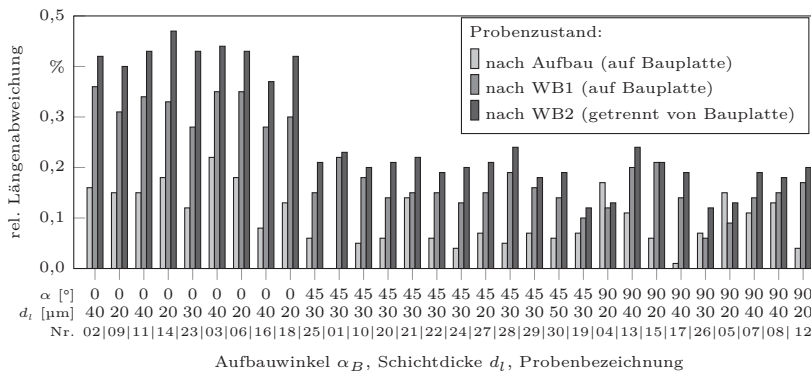


Abbildung 4.16: Geometrische Veränderung in unterschiedlichen Nachbehandlungszuständen, quantifiziert anhand der relativen Längenabweichung von charakteristischen Abmessungen (vgl. Anhang A.1.2).

Die nachfolgenden Schritte (Wärmebehandlung und Abtrennung von der Bauplatte) führten zu einer zunehmenden Abweichung zwischen Soll- und

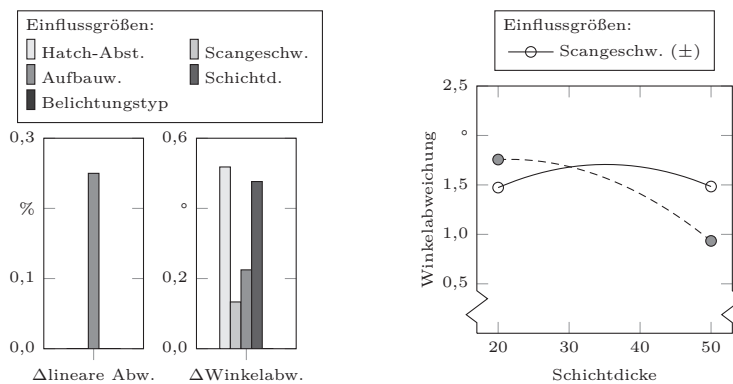
[11] Durch die endliche Schichtdicke entsteht für nicht parallel zur Bauebene oder zur Baurichtung liegende Flächen ein Stufeneffekt.

Ist-Geometrie für den Großteil der untersuchten Parameterkombinationen. Während nach dem eigentlichen Aufbau der geringste Verzug gemessen wurde, stieg dieser durch das anschließende Spannungsarmglühen signifikant an. In beiden Zuständen besitzt die Bauteilgeometrie eine feste Verbindung zu der Bauplatte. Die Spannungen, die durch den ersten Wärmebehandlungsschritt (WB1) gelöst wurden, führten zu einem Verzug, der nicht vollständig durch die Bauplatte aufgenommen werden konnte. Nach der Trennung von der Substratplatte und anschließendem Auslagern (WB2) ist eine weitere Erhöhung der Maßabweichungen erkennbar, da in dem vorherigen Schritt nicht alle Eigenspannungen entfernt werden konnten (vgl. Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Geometrische Abweichungen für Nachbehandlungsschritte (Grundzustand nach Aufbau (GZ), spannungsarmgeglüht (WB1), ausgelagert und von Bauplatte getrennt (WB2), jeweils gemittelt über den Aufbauwinkel bzw. den Zustand WB2

mittlere	**Zustand**			**Aufbauwinkel**		
Abweichung	GZ	WB1	WB2	0°	45°	90°
linear (Δl_{rel})	0,08 %	0,17 %	0,26 %	0,43 %	0,21 %	0,12 %
angular ($\Delta\alpha$)	−0,22°	−1,00°	−1,66°	−1,72°	−1,73°	−1,52°

Abbildung 4.17 zeigt die ermittelten Effekte im Versuchsraum. Lineare Abweichungen sind im Wesentlichen durch die Orientierung das Bauteils bedingt, während die winkelbezogenen Abweichungen auch von dem Hatch-Abstand und der Schichtdicke abhängen.



(a) Effekte für lineare und winkelbezogene Maßabweichungen

(b) Wechselwirkungen (andere vernachlässigbar)

Abbildung 4.17: Effekte und Wechselwirkungen für Maßabweichungen

Die geringste geometrische Abweichung zu der Soll-Geometrie wird für die 45°- und 90°-Orientierung des Versuchsbauteils erreicht. Dies kann damit begründet werden, dass das absolute Eigenspannungsniveau mit dem Temperaturgradienten zwischen den Schichten und der Querschnittsfläche skaliert (vgl. Danjou (2010) und Meiners (1999)). Bei der 0°-Orientierung ist sowohl die Querschnittsfläche am größten als auch der Temperaturunterschied wegen der notwendigen Belichtungszeit am höchsten.

Im Rahmen der vorliegenden Versuchsplanung hatte die Belichtungsstrategie keinen signifikanten Einfluss auf den resultierenden Verzug nach den Nachbehandlungsschritten. Zur Minimierung von geometrischen Abweichungen ist somit ein möglichst geringer Energieeintrag in Form von hohen Schichtdicken und hohen Scangeschwindigkeiten zu favorisieren.

4.3.4.2 Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität wird durch den Pulverwerkstoff selbst und lokal angepasste, geometrieabhängige Verfestigungsparameter beeinflusst. Hierbei wird zwischen Kontur- und Innenbereichen sowie den dem Pulverbett zugewandten Flächen (*downskin*) und den dem Pulverbett abgewandten Flächen (*upskin*) unterschieden (vgl. Abbildung 4.18).

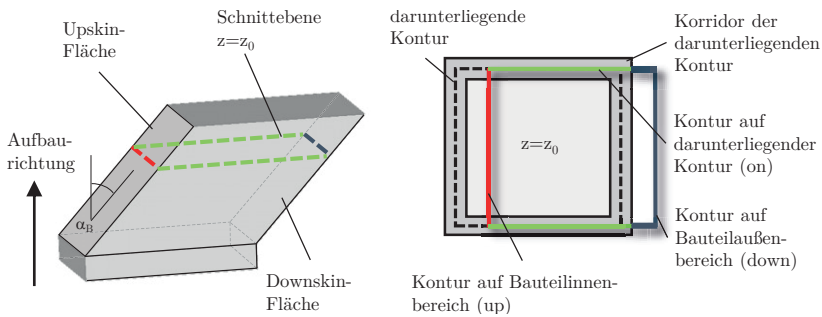


Abbildung 4.18: Parameter für die Verfestigung des Bauteilrandbereichs. Die Belichtung erfolgte durch mehrere Vor-/Nachkonturen. Es werden drei Bereiche der darunterliegenden Bauteilschichten unterschieden: Bauteilinnenbereich (*upskin*), Bauteilkonturbereich (*on*) und Bauteilaußenbereich (*downskin*).

Die Verfestigung des Bauteilrandbereiches ohne gesonderte Konturbelichtung (vor und/oder nach der Flächenbelichtung) führte zu den größten gemessenen Rauheiten. Abbildung 4.19 zeigt, dass diese mit einer einzelnen Nachkontur deutlich reduziert werden können und eine verbesserte Oberflächengüte, auch im Vergleich zu der Standardbelichtung (zwei Konturen), ermöglicht wird.

Darüber hinaus kommt dem Flächenwinkel α_B, und somit der Bauteilorientierung, eine bedeutende Rolle zu. Für steigende Flächenwinkel sind sowohl für Upskin- als auch Downskin-Flächen höhere Rauheiten zu erwarten. Dies kann mit dem zunehmend verminderten Wärmefluss erklärt werden, der eine Anschmelzung von umliegenden Pulverpartikeln begünstigt. Zudem kommt der Treppenstufeneffekt bei größeren Winkeln verstärkt zum Tragen.

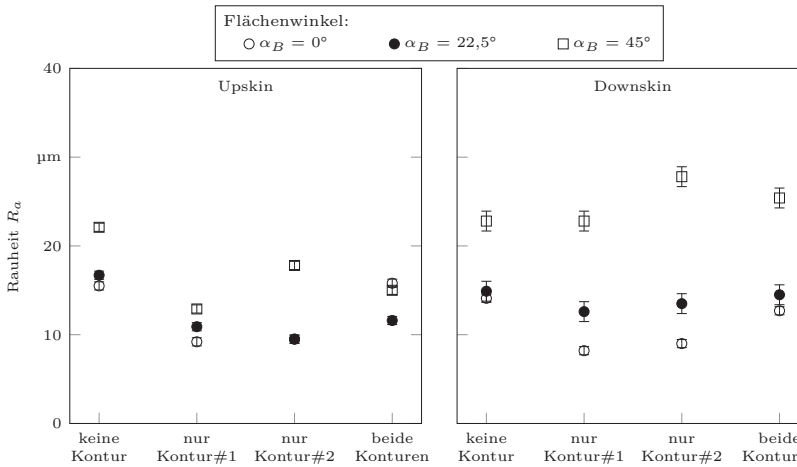


Abbildung 4.19: Oberflächenrauheit für unterschiedliche Flächenwinkel und Konturbelichtungseinstellungen; Messung: Mitutoyo SurfTest SJ-400, Konturparameter: $E_{\#1,\#2} = 0{,}1$ J/mm, Strahlverschiebung 12 µm bzw. 0 µm.

Eine weitergehende Analyse der Oberflächengüte ist in Krauss et al. (2013) zu finden. Die spezifischen Energieeinträge beider Nachkonturen zeigen dabei, ebenso wie die Strahlverschiebungen dieser Konturen, einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit. Zwischen den Parametern Aufbauwinkel und Energieeintrag existieren darüber hinaus wechselseitige Abhängigkeiten. Durch den veränderten Energieeintrag im Randbereich und die geometrieabhängige Wärmeableitung kam es zudem zu einem erhöhten FFA in den Randzonen, der sich bis zu einer Tiefe von 200 µm erstreckt.

4.3.4.3 Baubarkeit filigraner Strukturen

Im Rahmen der geometrischen Einflüsse auf den Prozess sind filigrane Strukturen zu betrachten. Der schichtweise Aufbau dieser Elemente ist durch die Problematik der endlichen Pulverkorngröße, der maximalen Laserstrahlfokussierung, der Wärmeableitung und der Schichtapplizierung gekennzeichnet.

Filigrane Strukturen zeichnen sich durch ein hohes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis mit reduziertem Wärmeleitungsquerschnitt aus. Dies führt zu längeren Abkühlzeiten und veränderten Schmelzbadausprägungen, die wiederum die Entstehung von erhöhten Kanten begünstigen (vgl. Yasa et al. (2009)). Im weiteren Verlauf des Bauprozesses kann es somit zu einem mechanischen Kontakt zwischen dem Bauteil und dem Beschichtungsmechanismus kommen, der zu einem unregelmäßigen Pulverauftrag und zu einem Verbiegen der Strukturen führt (vgl. Hoeren & Witt (2012)).

Zur Untersuchung des Sachverhaltes wurden dünne Wände in unterschiedlichen Höhen und Orientierungen relativ zu der Beschichtungsrichtung aufgebaut. Anhand der Oberflächeneigenschaften kann auf die Qualität des Schichtauftrags und auf die mechanischen Wechselwirkungen geschlossen werden. Für

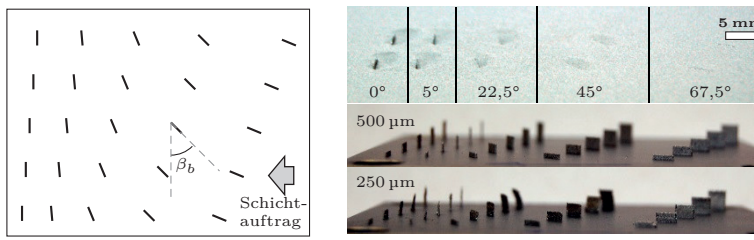


Abbildung 4.20: Links: Layout für den Aufbau von Versuchskörpern, das die gegenseitige Beeinflussung der Proben ausschließt; rechts: Aufschüttungen im Pulverbett durch Beschichterkontakt und verbogene Strukturen nach dem Prozess, Rakelmechanismus mit HSS-Beschichtungsklinge, Schichtdicke 20 µm

die untersuchte Probendicke von 250 µm sind die Hebelkräfte bis zu einer Höhe von ca. 1 mm ausreichend gering, so dass der Beschichtungsmechismus die Strukturen nicht dauerhaft verbiegt und der Pulverauftrag gewährleistet werden kann. Für zunehmende Bauhöhen steigt die Biegespannung. Es kommt zu erheblichen Rückfederungen und plastischen Verformungen der Probengeometrie in Abhängigkeit der Bauhöhe und der Orientierung bzgl. der Beschichtungsrichtung.

Die elastischen und plastischen Verformungen bei der Berührung durch den Beschichtungsmechanismus bewirken eine lokale Verdichtung des Pulverbetts (vgl. Abbildung 4.20) und einen unvollständigen Pulverauftrag auf dem Bauteil. Dies äußert sich in einer verminderten Oberflächenqualität der seitlichen Wände, da die einzelnen Schmelzspuren nicht mehr vollständig übereinander liegen. Bei kleinen Winkeln β_b relativ zu der Beschichtungsrichtung verstärkt die vergrößerte Kontaktfläche diesen Effekt und die entsprechenden Strukturen können nicht mehr hergestellt werden. Für Wanddicken von 500 µm wurden die beschriebenen Effekte nicht mehr beobachtet, sodass diese Strukturen trotz

eines akustisch wahrnehmbaren Kontaktes von Beschichter und Bauteil bis zu der untersuchten Höhe von 5 mm problemlos aufgebaut werden konnten (Krauss & Zäh 2013a) (vgl. Abbildung 4.21).

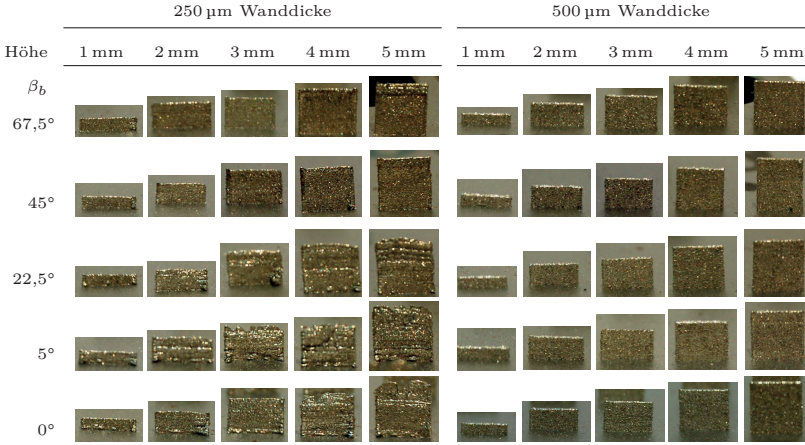


Abbildung 4.21: Seitenansicht der Versuchskörper nach Aufbau, Breite 5 mm

4.3.5 Störgrößen und zufällige Einflüsse

Der Einfluss von nicht kontrollierten Störgrößen wird nachfolgend anhand der Streuung der Versuchsergebnisse abgeschätzt. Unter der Streuung ist in diesem Zusammenhang die Variation der betrachteten Zielgrößen bei mehrmaliger Realisierung (d. h. bei mehrmaligem Aufbau von Versuchskörpern) zu verstehen. Nach Kleppmann (2009) kann davon ausgegangen werden, dass die Messwerte in guter Näherung durch die Normalverteilung beschrieben werden können, wenn die Zufallsstreuung die Summe vieler Einflüsse (Umgebung, Material etc.) ist und es sich um zweiseitig zu begrenzende Merkmale handelt. Die Streuung kann dann anhand der Standardabweichung der Normalverteilung quantifiziert werden.

Aus statistischer Sicht sind folgende Gegebenheiten relevant. Sie gehen in die Streuung der Prozessergebnisse, basierend auf der Versuchsplanung nach Unterabschnitt 4.3.2, ein:

- Zufällige Verteilung der Bauaufträge: Zeitlicher Abstand zwischen Bauaufträgen, die für die Streuungsermittelung herangezogen werden, variierte, um möglichen Hysteresen bei Maschineneinstellungen vorzubeugen.
- Laufzeit: Die Dauer der Versuchsreihe umfasste mehrere Monate, die Dauer einzelner Bauaufträge mehrere Stunden bis Tage; es ist daher von

Änderungen der atmosphärische Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Luftfeuchte, Druck) während einzelner Bauaufträge und zwischen Bauaufträgen auszugehen. Ebenso sind zeitliche Drifte der Prozess- und Anlagenparameter, Abnutzungs- und Verschleißeffekte (werden durch regelmäßig ausgeführte Wartungsarbeiten nur teilweise kompensiert) während der Versuchslaufzeit anzunehmen.

- Lokale Prozessschwankungen bei der Verfestigung und Beschichtung: Das Auftreten von Unebenheiten im Pulverbett, lokalen Änderungen der eingebrachten Strahlungsenergie durch Absorption und Verschmutzung und lokal variierender Strömung aufgrund zunehmender Filterbelegung konnte nicht ausgeschlossen werden.
- Pulver: Der Ausgangswerkstoff bestand aus mehreren, nicht aufeinanderfolgenden Chargen eines Lieferanten. Der unverfestigte Teil des Pulverwerkstoffs erfuhr mit jedem Bauprozess eine thermische Behandlung (abhängig von der Länge des Bauauftrags, der Vorheiztemperatur des Bauträgers und der thermischen Last aufgrund der Energieeinbringung). Die Aufbereitung des Pulvers umfasste die Entfernung von Überkorn (Spritzerpartikel, Agglomerationen, Kondensatrückstände) und die Beimischung von Neupulver.[12]

Die Streuung der Prozessergebnisse wurde auf Basis von fünf[13] Bauaufträgen, die nominell alle miteinander die gleichen Parametereinstellungen aufweisen und dem Zentralpunkt des Versuchsplans zuzuordnen sind, abgeschätzt.

In Abbildung 4.22 sind die Mittelwerte und Streuungen der untersuchten Zielgrößen angegeben. Die Streuwerte sind im Zusammenhang mit der Messunsicherheit der verwendeten Verfahren zu betrachten. Untersuchungen am Schliff (FFA, Fehlerform, Härte) beschränkten sich auf einen sehr kleinen Bereich der Probe und führten im Gegensatz zu Untersuchungen, die sich auf den gesamten Probenkörper bezogen (Zugversuch), zu höheren Unsicherheiten.

Für alle diskutierten Störgrößen und nicht kontrollierten Umgebungseinflüsse liegen die relativen Streuungen der mechanischen Festigkeitswerte bei Raumtemperatur unterhalb von 1 % (Zustand WB2). Dagegen ist die relative Streuung des FFA mit 23 % zwar hoch, der Absolutwert liegt jedoch unter 0,08 % (99,9 %-Vertrauensbereich).

Hinsichtlich der Maßhaltigkeit ist eine systematische Abweichung zwischen Soll- und Ist-Maß in der Größenordnung von 0,2 % (linear) zu erkennen. Die Streuungen liegen in der gleichen Größenordnung und sind neben zufälligen Einflüssen auch durch die unterschiedlichen Aufbauwinkel und die damit

[12] Hierbei kommt es zu einer Verschiebung der Korngrößenverteilung. Da die Aufbereitung des Ausgangswerkstoffs nicht unter Schutzgasatmosphäre stattfindet, ist des Weiteren von einer zunehmenden Oxidbelegung des Altpulvers auszugehen.

[13] Maßabweichung und Winkelfehler auf Basis von insgesamt sieben Bauaufträgen inkl. Variation des Aufbauwinkels.

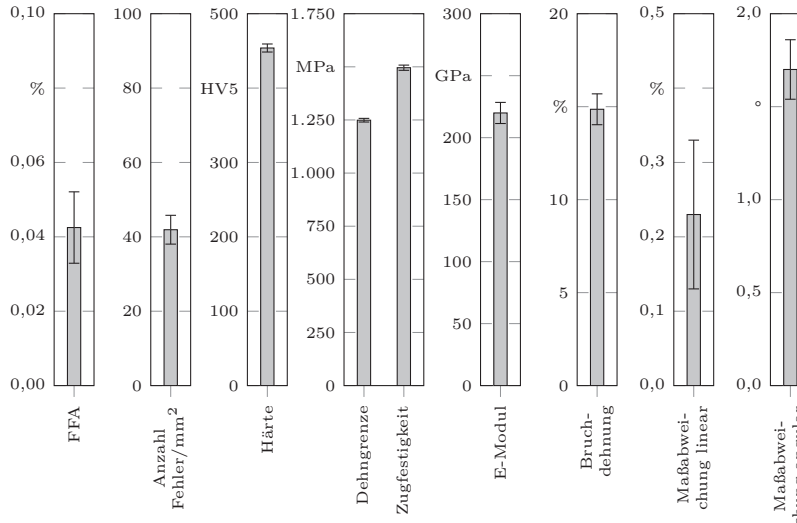


Abbildung 4.22: Mittelwerte und Prozessstreuung untersuchter Zielgrößen, Aufbauwinkel: 45°, Zustand WB2, Aufbauparameter: a_h=90 µm, P=195 W, d_l=30 µm, v=1200 mm/s, Fehlerangabe $\pm 1\sigma$

verbundene Stützstrukturauslegung, den Anbindungsquerschnitt sowie den Abstand zu der Grundplatte begründet.

4.4 Einteilung von Fehlern und Unregelmäßigkeiten

Die in diesem Kapitel diskutierten Auswirkungen von einstellbaren Prozessparametern und nicht kontrollierten Störgrößen sollen nachfolgend, zusammen mit dem verfügbaren Stand der Forschung, der Klassifizierung von Fehlerbildern und Unregelmäßigkeiten dienen. Die Fehlerbilder sind als Basis für eine Prozessoptimierung und Qualitätssteigerung (Prozessentwicklung) sowie für eine Prozessüberwachung und -steuerung im Rahmen einer Qualitätssicherung zu sehen. Für den SLM-Prozess wird eine Einteilung anhand der analysierten Einflussgrößen, Ursachen, Auswirkungen und Auftrittszeitpunkte während des Prozesses gewählt (vgl. Abbildung 4.23):

- Eine *schlechte Konsolidierung / Benetzung (VE1)* führt nach Unterabschnitt 2.2.3 zu Poren, Bindefehlern sowie *Balling* und tritt in allen drei Einflusskategorien auf. Als Ursache sind eine veränderte Energieeinbringung bzw. verschlechterte Benetzungseigenschaften z. B. durch Fremdpartikel zu nennen.

- Eine *Überhitzung (VE2)* einzelner Bauteilbereiche ist auf die Wärmeabfuhr zurückzuführen, die nach Unterabschnitt 4.3.4 hauptsächlich von der Bauteilgeometrie und der Supportauslegung abhängt. Es kann zu lokal variierenden Materialeigenschaften kommen.
- Ein *erhöhtes Spritzeraufkommen (VE3)* ist nach Unterabschnitt 2.2.3 u. a. auf sich abrupt ändernde Wärmeleitungsbedingungen zurückzuführen. Da es sich um einen Austrieb von teilweise verfestigtem Material handelt, kann es sowohl an der Ursprungsstelle als auch an der Landestelle zu variablen Aufschmelzbedingungen kommen, die ihrerseits zu Fehlstellen im Gefüge führen können.
- Die im Prozess entstehenden *Eigenspannungen (VE4)* (vgl. Unterabschnitt 2.2.4) können zu Verformungen führen. Wird dies durch die Stützstrukturauslegung vermieden, lösen sich die Eigenspannungen teilweise beim Abtrennen der Bauteile vom Bauträger und führen dann zu Verzug und Maßabweichungen.
- Das Fehlerbild der *Kantenerhöhung bzw. Elevated Edges (VE5)* umfasst die Ausprägung von erhöhten Bauteilkanten, die nach Kapitel 2 auf die Wärmeabfuhr zurückzuführen ist. Es kann zu lokal variierenden Materialeigenschaften, Maßabweichungen und Beschichtungsproblemen kommen.
- Unter *Rissen (VE6)* werden Heißrisse und Spannungsrisse zusammengefasst, die nach Unterabschnitt 2.2.4 bei Überschreitung der Festigkeitsgrenzen entstehen und auf hohe Temperaturgradienten bzw. Abkühlgeschwindigkeiten, hohe Schmelzbadtiefen (Risse et al. 2013) oder auch Pulververunreinigungen zurückzuführen sind (Kleszczynski et al. 2012).
- Bei *Pulveranhaftungen (VE7)* handelt es sich um Agglomerationen von Pulverpartikeln an verfestigten Bauteilflächen. Sie sind eine Konsequenz von stark verzögerter Wärmeleitung, die zu einer Versinterung bzw. teilweisem Aufschmelzen in der Umgebung befindlicher Pulverpartikel führt und die Oberflächenqualität beeinträchtigt (vgl. Kruth (2007)).
- Unter *Delamination (VE8)* sind alle vollständigen oder teilweisen Ablösungen von einzelnen Schichten bzw. Schichtverbünden und der Abriss aufgebauter Volumina von Stützstrukturen und Bauträgern zu verstehen. Sie sind im Wesentlichen auf frei werdende Eigenspannungen (vgl. Unterabschnitt 2.2.3) und eine ungenügende Anbindung zurückzuführen.
- *Inhomogene Schichtdicken (SA1)*: Lokal variierende Schichtdicken entstehen zum einen bei der mechanischen Wechselwirkung von Beschichtungsmechanismus und Bauteil (lokale Verdichtung und Aufschüttung, Rillen durch Beschichtersprünge), zum anderen durch Verschleiß an der Beschichterklinge bzw. der Beschichterbürste (Spuren im Pulverbett). Es kann zu signifikanten Beeinträchtigungen der Bauteilqualität kommen (vgl. Neef et al. (2014)).

- Der *Bauteil-Beschichter-Kontakt (SA2)* führt zum Abtrag von aufgeschmolzenem Material sowie Verbiegung und Verformung und beeinträchtigt die Prozessstabilität. Nach Kapitel 2 sind in diesem Zusammenhang die Randbedingungen der Wärmeleitung und die Pulverpartikelgröße von Relevanz (vgl. Hoeren & Witt (2012) und Kleszczynski et al. (2012)).
- *Pulvermangel (SA3)* führt zu einem unvollständigen Pulverauftrag in der Bauebene. Bereits verfestigte und nicht mit Pulver bedeckte Bauteilbereiche werden mehrmals umgeschmolzen und erfahren dadurch eine andere Wärmebehandlung. Es kommt darüber hinaus zu Maßabweichungen.

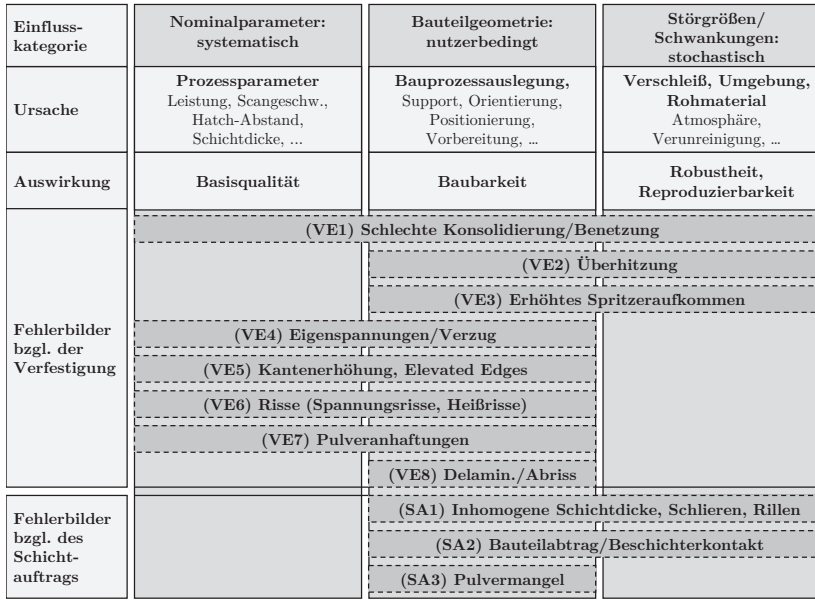


Abbildung 4.23: Einteilung von Fehlerbildern und Unregelmäßigkeiten, VE: Verfestigung, SA: Schichtauftrag

Die Fehlerbilder unterscheiden sich nach Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung der Folgen und Entdeckungswahrscheinlichkeit. Eine Priorisierung muss anwendungsspezifisch erfolgen.

4.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wurden die Einflussgrößen auf den SLM-Prozess systematisch untersucht und kategorisiert sowie das Vorgehen

hierzu bzw. das Versuchsumfeld beschrieben. Anhand der Prozessanalyse kann zusammenfassend festgehalten werden, dass der schichtweise Aufbau mittels Laserstrahlschmelzen in der genutzten Versuchsumgebung prozesssicher funktioniert. Der Einfluss von nicht kontrollierten Störgrößen wirkt sich abhängig von den betrachteten Zielgrößen teilweise nur unerheblich auf die Prozessstreuung aus. Dies gilt, solange primitive Geometrien betrachtet werden, deren Randbedingungen für die Wärmeableitung über die gesamte Bauhöhe nur unwesentlich variieren.

Sobald praxisrelevante Geometrien, hier anhand eines Halters aus dem Triebwerksbau, betrachtet werden, ergeben sich die eigentlichen Schwierigkeiten im Prozess. Variierende Querschnittsflächen und sich ändernde Wärmeleitungsbedingungen führen zu Konturüberhöhungen, Überhitzungen, Delaminationen, Anhaftungen etc., die die Qualität beeinflussen und die Prozessstabilität gefährden. Durch die Stützstrukturauslegung, die Positionierung und die Orientierung der Bauteile kann der Prozess gezielt für einzelne Bauteile optimiert werden. Wird jedoch der allgemeinen Fall betrachtet, in dem variierende Bauteilgeometrien gefertigt werden und Störgrößen auf den Prozess einwirken, sind Methoden der Prozessüberwachung notwendig. Diese schaffen die Grundlage für eine Vergleichbarkeit der Prozessergebnisse und können mögliche Prozessabbrüche und Qualitätsdefizite frühzeitig erkennen.

5 Abkühlverhalten und Materialeigenschaften

5.1 Überblick

Die thermische Prozessführung während der additiven Fertigung spielt für die Qualität der Bauteile bzw. die resultierenden Materialeigenschaften eine entscheidende Rolle (vgl. Zeng et al. (2012)). Zur Bestimmung des Temperaturverhaltens existiert als Folge dessen eine Reihe von Ansätzen, die vornehmlich darauf abzielen, Simulationsmodelle oder analytische Modelle zu verifizieren (vgl. Kolossov et al. (2004), Roberts et al. (2009), Wegner & Witt (2011), Chivel & Smurov (2010), Patil & Yadava (2007)). Die für eine thermografische In-Process-Überwachung relevanten Zusammenhänge sollen im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Durch den Aufbau von Verständnis für die thermischen Abläufe und Besonderheiten beim SLM wird eine Grundlage für die spätere Vergleichbarkeit und Fehlererkennung geschaffen. Der Fokus liegt dabei auf Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes, da nur diese bolometrisch erfasst werden können (vgl. Anhang A.2). Dieser Temperaturbereich ist relevant für die Ausbildung von Eigenspannungen, die Rekristallisation und das Kornwachstum.

Nach der Ableitung eines thermischen Modells für das Abkühlverhalten wird auf die Werkstoffeigenschaften und die für den SLM-Prozess typische, sog. thermische Zyklierung eingegangen und der Wärmehaushalt analysiert.

5.2 Modellbildung zur Temperaturentwicklung beim SLM

Im Folgenden werden Modelle für den transienten Temperaturverlauf bei der Verfestigung und bei dem Pulverauftrag betrachtet. Sie dienen der Interpretation von aufgenommenen Temperaturdaten und zur Ableitung von charakterisierenden Größen (vgl. Abschnitt 6.3). Nachdem ein Überblick über bestehende Ansätze aus der Lasermaterialbearbeitung gegeben wird, erfolgt die Ableitung eines zweckmäßigen, vereinfachten Ansatzes, der die begrenzte Orts- und Zeitauflösung des Messsystems für die Überwachungsaufgabe berücksichtigt.

5.2.1 Grundlagen aus der Lasermaterialbearbeitung

Für die Lasermaterialbearbeitung stehen zahlreiche Modelle zur Verfügung, die die Temperaturentwicklung beschreiben. Da der Wärmetransport bei schnell bewegten Quellen hauptsächlich von der Wärmeleitung in den Festkörper dominiert wird, kann in vielen Fällen die Wärmestrahlung, Konvektion und Verdampfung vernachlässigt werden (Cline & Anthony 1977; Klemens 1976; Ready 1965). Die Temperaturentwicklung wird mit diesen Vereinfachungen durch die Wärmeleitungsgleichung (vgl. Gleichung 2.1) beschrieben, welche aufgrund ihrer Linearität eine Superposition der Lösungen ermöglicht. Ein

detaillierter Überblick über vorhandene Modelle für das Laser-Sintern bzw. Laserstrahlschmelzen ist in Zeng et al. (2012) zu finden.

Als Ausgangspunkt für die Bildung eines angepassten Modells dienen nachfolgende Ansätze. In dem Modell der *kontinuierlichen Punktquelle* (Gleichung 5.1) wird die Bewegung einer Wärmequelle nicht explizit betrachtet, es eignet sich jedoch dafür, beliebige Ausdehnungen der Wärmequelle durch Integration über deren Ortsverteilung zu berücksichtigen. Eine Reihe von Lösungen auf Basis der Fourier'schen Wärmeleitung sind in Carslaw & J. C. Jaeger (1986) und Rykalin et al. (1978) zu finden. Für T gilt:

$$T = \frac{q}{4\pi a r} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4at}}\right) \tag{5.1}$$

r: Abstand des betrachteten Punktes zur Wärmequelle, q: Temperaturleitung der Punktquelle

Für die Anwendung beim SLM sind die Modelle der bewegten Wärmequelle von Bedeutung, die nach Rosenthal (1946) aus dem Punktquellenmodell abgeleitet werden können. Unter Vernachlässigung der Strahlungsverluste und des Aufschmelzvorganges lässt sich die Temperaturverteilung im Modell der *bewegten Punktquelle* nach Gleichung 5.2 angeben:

$$T = T_0 + \frac{P}{2\pi\kappa r} e^{-\frac{v(x+r)}{2a}} \tag{5.2}$$

r: Abstand des betrachteten Punktes von der Wärmequelle, v: Geschwindigkeit der Quelle, Bewegung in x-Richtung, T_0: Grundtemperatur des Körpers für $r \gg 0$.

Das Rosenthal-Modell gilt für Punktquellen, die sich entlang einer festen Richtung mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, und es kann für den 2D- und den 3D-Fall angegeben werden. Die Singularität bei $r = 0$ ist in der Punktform der Quelle begründet und kann durch Berücksichtigung von örtlich ausgedehnten Wärmequellen aufgelöst werden.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Temperaturverteilung für beliebige Formen von bewegten Wärmequellen ist durch die Methode der *Green'schen Funktionen* gegeben. In dem praktisch bedeutenden Fall einer Gauß'schen Intensitätsverteilung resultiert aus einem allgemeinen Ansatz (vgl. Gleichung 2.1) das Modell von Cline und Anthony (Cline & Anthony 1977), welches nach Steen & Mazumder (2010) eines der realistischsten analytischen Modelle bis heute darstellt. Unter Verwendung der Green'schen Funktion einer Punktquelle als Lösung der Wärmeleitungsgleichung wird die dreidimensionale Temperaturverteilung durch Faltung[1] abgeleitet (Gleichung 5.3):

[1] Der grundlegende Ansatz besteht darin, dass die Temperaturverteilung zur Zeit t eine Superposition von Gauß-Verteilungen zu früheren Zeiten t' ist, zu denen sich der Laserspot an der Position x', y' befand.

$$T = T_0 + \frac{P}{c_p} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x-vt')^2+y^2}{2r_g^2+4at'} + \frac{z^2}{4at'}}}{\sqrt{\pi^3 at'}\,(2r_g^2+4at')} dt' \tag{5.3}$$

Abbildung 5.1 vergleicht die vorgestellten Modelle.

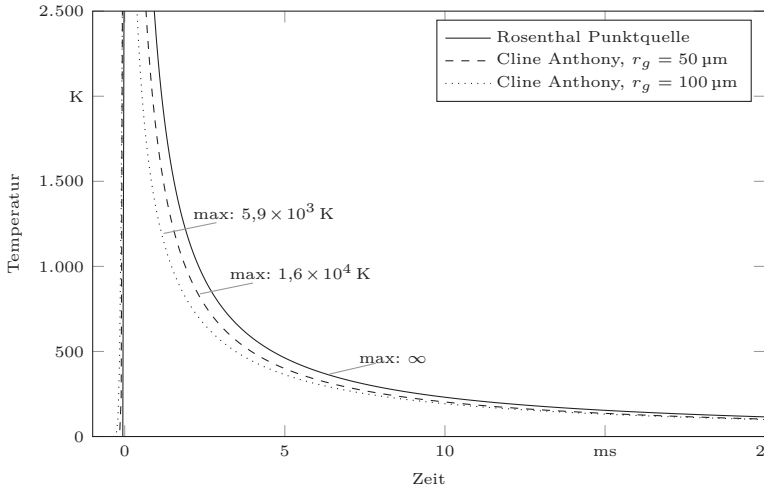


Abbildung 5.1: Modellvergleich für bewegte Wärmequellen, Werkstoff Iconel 718, Parameter: $v = 1{,}2\,\mathrm{m/s}$, $a = 3{,}4 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^2/s}$, $P = 195\,\mathrm{W}$, $c_p = 450\,\mathrm{J/kg}$

Die Green'schen Funktionen können im linearen Fall[2] angewandt werden und die Lösungen sind, je nach Komplexität der Randbedingungen, in analytischer oder integraler Form darstellbar. Ein weiterführender Überblick ist in Pittner (2012) zu finden.

Die Berücksichtigung zusätzlicher Wärmetransportphänomene erfolgt u. a. in Kar & Mazumder (1989). In Nunes (1983) wird gezeigt, dass Phasenübergänge und Schmelzbadströmungen beispielsweise durch eine Multipolexpansion des Rosenthal-Modells berücksichtigt werden können. In vielen Fällen bleiben jedoch nur numerische Ansätze, um das Temperaturfeld bei der Lasermaterialbearbeitung für nicht triviale Werkstückgeometrien ausreichend genau vorherzusagen (vgl. Bontha et al. (2006), Branner (2011), Roberts et al. (2010), van Elsen et al. (2007) und Vasinonta et al. (2001)). Beim SLM kommt erschwerend hinzu, dass mit der „Pulverphase" eine zusätzliche Phase

[2] keine Phasenumwandlungen, temperaturunabhängige Materialeigenschaften

besteht, die sich in ihren thermophysikalischen Eigenschaften und in ihrem Absorptionsverhalten stark von dem Feststoff unterscheidet (Zeng et al. 2012).

Darüber hinaus bleibt der wiederkehrende Energieeintrag beim SLM (Hatch-Verfestigung) in analytischen Modellen weitgehend unberücksichtigt. Um diesen in die Betrachtung aufzunehmen, werden nachfolgend zwei Temperaturmodelle abgeleitet, die ferner an die messtechnischen Randbedingungen der thermografischen Schichtüberwachung angepasst sind.

5.2.2 Temperaturmodelle für die Hatch-Verfestigung

Der Modellbildung liegen folgende Vereinfachungen bzw. Annahmen zugrunde:

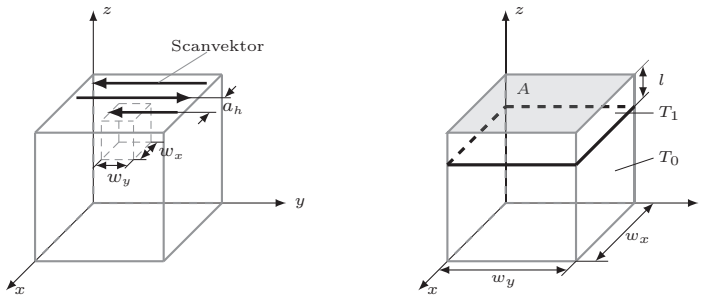
- Wärmetransport durch Wärmeleitung: Die Wärmeleitung stellt nach Unterabschnitt 5.2.1 den maßgeblichen Anteil am Wärmetransport dar. Die Konvektion in dem Schmelzbad bzw. in der Atmosphäre sowie die Abstrahlung werden vernachlässigt.
- Temperaturunabhängige Materialeigenschaften: Im Bereich der messtechnisch zugänglichen Temperaturen werden konstante, effektive Materialkennwerte angenommen. Nach Ready (1965) sind die Änderungen der Materialeigenschaften bei Metallen über weite Temperaturbereiche klein.
- Keine Phasenübergänge bzw. keine Betrachtung des Schmelzbades: Aufgrund der beschränkten Zeitauflösung des Messsystems und der typischerweise schnellen Abkühlung aus der Schmelze kann der Phasenübergang bzw. das Schmelzbad nicht aufgelöst werden. Er wird daher nicht modelliert.
- Nur Abkühlverhalten: Für die Qualität des erzeugten Materialgefüges bzw. die Identifikation von Unregelmäßigkeiten ist das Abkühlverhalten ausschlaggebend (Bontha et al. 2006; Krauss et al. 2012). Das Aufschmelzen des Pulverwerkstoffs erfolgt demgegenüber auf einer deutlich kürzeren Zeitskala und wird vernachlässigt.

5.2.2.1 Oberflächenwärmequelle

In dem nachfolgend abgeleiteten Modell der Oberflächenwärmequelle wird der Temperaturverlauf des erstarrten Schmelzbades nach einer großflächigen Belichtung untersucht. Das Modell geht von einem vertikalen Wärmefluss in das bereits verfestigte Material aus. Dies wird damit begründet, dass die Aufheizung eines kleinen Oberflächenelementes gegenüber der späteren Abkühlung um ein Vielfaches schneller erfolgt und in erster Näherung keine transversalen Temperaturgradienten bestehen. Das Pulverbett trägt nach den Ausführungen in Unterabschnitt 2.2.3 sowie nach Rombouts, Froyen,

Gusarov et al. (2005) nicht oder nur geringfügig zur Wärmeleitung bei und wird von der Betrachtung ausgenommen.

Die Verhältnisse unmittelbar nach der Verfestigung zum Zeitpunkt $t = t_0$ werden auf Basis eines halbunendlichen Blocks modelliert (vgl. Abbildung 5.2).



(a) Hatch-Belichtung einer Fläche **(b)** Vereinfachtes Modell mit homogener Temperaturverteilung bei $t = t_0$

Abbildung 5.2: Modell für eine Oberflächenwärmequelle, die zu einem Temperaturanstieg führt

An der Stirnseite des Blocks liegt die Anfangstemperatur in einem kleinen Volumen der Höhe l bei $T = T_1$. In dem restlichen Volumen ($z \in]-\infty, -l]$) beträgt sie dagegen $T = T_0 < T_1$. Die Dicke l repräsentiert eine effektive Schmelzefilmdicke, in der die gesamte Energie pro Zeiteinheit deponiert wird. Dies führt in dem Volumenelement zu einer instantanen Temperaturerhöhung auf T_1. Für Zeiten $t > t_0$ hat die Wärmequelle keinen Einfluss mehr und es findet ein ungestörter Abkühlvorgang statt, der mit einer Änderung der Oberflächentemperatur einhergeht.

Die thermische Isolation an der Schichtoberseite erfordert, dass der Temperaturgradient an dieser Stelle identisch verschwindet. Diese Randbedingung wird durch eine Spiegelung des Modells an der Schichtoberseite erzwungen (vgl. Abbildung 5.3). Die initialen Bedingungen sind in Gleichung 5.4 zusammengefasst:

$$T(z,t_0) = T_0 + (T_1 - T_0)\,[\Theta(z+l) - \Theta(z-l)] = \begin{cases} T_0: & z < -l \\ T_1: & -l \le z \le l \\ T_0: & z > l \end{cases} \qquad (5.4)$$

Θ: Heaviside-Funktion

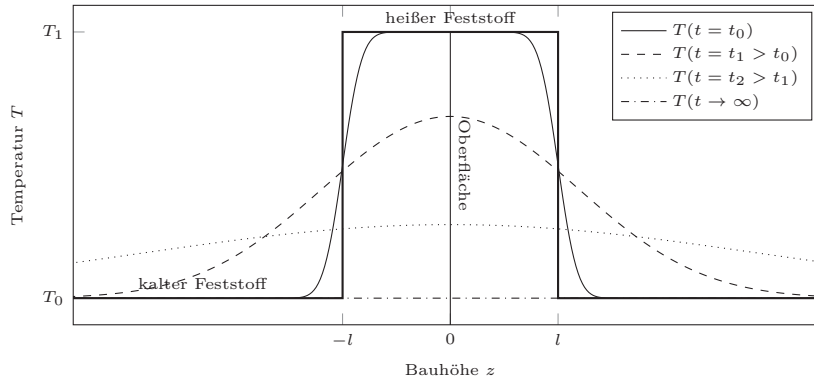


Abbildung 5.3: Temperaturverlauf entlang des Bloks zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Verfestigung

Die Oberflächentemperatur wird aus der Faltung der Fundamentallösung mit der Wärmeleitungsgleichung nach Gleichung 5.5 mit den Anfangsbedingungen aus Gleichung 5.4 bestimmt:

$$U(z,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}} e^{\frac{-z^2}{4at}} \tag{5.5}$$

Für die Temperatur auf der Oberfläche ($z = 0$) folgt nach Anhang A.3.1:

$$\begin{aligned} T(z,t) &= \int_{-\infty}^{\infty} T(z',t_0)\, U(z'-z,t)\, \mathrm{d}z' \\ \to T(z=0,t) &= T_0 + T_D \mathrm{erf}\left(\frac{l}{\sqrt{4at}}\right) \end{aligned} \tag{5.6}$$

Der Temperaturanstieg T_D beim Belichten eines Oberflächenelements wird aus den Parametern der Hatch-Verfestigung abgeschätzt. Für die deponierte Energie E gilt:

$$\begin{aligned} E &= T_D\, c_p\, m \\ &= T_D\, c_p\, \rho\, A\, l \\ &=: \alpha\, P\, t_A \end{aligned} \tag{5.7}$$

Die Zeit t_A zur Verfestigung des (quadratischen) Flächenelements A ist durch $A = v\, t_A\, a_h$ gegeben, der Temperaturanstieg T_D kann folglich durch den Energieeintrag pro Fläche ausgedrückt werden (vgl. Anhang A.3.1):

$$\begin{aligned} \alpha P \frac{A}{v a_h} &= T_D c_p \rho A l \\ \rightarrow T_D &= \frac{\alpha P}{v a_h c_p \rho l} \end{aligned} \tag{5.8}$$

Bei der Hatch-Verfestigung handelt es sich um einen kontinuierlichen, wiederkehrenden Energieeintrag auf der Oberfläche. Entgegen der vereinfachenden Annahme kann der transversale Temperaturgradient auf der Oberfläche daher nicht identisch verschwinden. Dieser Sachverhalt ist wesentlich durch die Scanvektorlänge bedingt, die die effektive Geschwindigkeit der Prozesszone charakterisiert. Je kürzer die Scanvektorlänge bei gleichem Hatch-Abstand und gleicher Scangeschwindigkeit ist, desto höher ist der effektive Temperaturanstieg, aber gleichzeitig auch die Geschwindigkeit, mit der der Prozess sich von dem verfestigten Bereich entfernt; der Einfluss der weiteren Verfestigung fällt demnach geringer aus. Diese Gegebenheit kann in erster Ordnung durch einen Korrekturfaktor k^* berücksichtigt werden, der multiplikativ in den theoretischen Temperaturanstieg eingeht. Er muss experimentell für verschiedene Parameter der Hatch-Verfestigung bestimmt werden.

Aus Gleichung 5.6 folgt dann:

$$T(z=0,t)_l = T_0 + k^* \frac{\alpha P}{v a_h c_p \rho l} \mathrm{erf}\left(\frac{l}{\sqrt{4at}}\right) \tag{5.9}$$

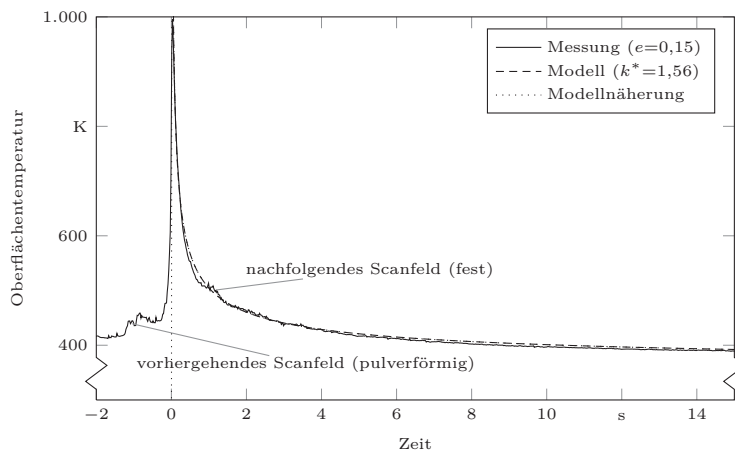


Abbildung 5.4: Vergleich zwischen Messung und Oberflächenmodell, Modellparameter $T_0 = 353\,\mathrm{K}$, $T_i = 308\,\mathrm{K}$, $T_a = 298\,\mathrm{K}$, $\alpha = 0{,}64$, $k^* = 1{,}56$

Durch Näherung des Modells in erster Ordnung für große Zeiten (vgl. Gleichung 5.10) kann der Hilfsparameter l eliminiert werden; diesem kommt folglich keine signifikante Bedeutung zu. Abbildung 5.4 zeigt das Modell und seine Näherung im Vergleich mit den thermografisch bestimmten Temperaturen. Aus dem analytischen Modell kann bei bekannten Belichtungsparametern auf den Materialparameter a geschlossen werden. Es gilt:

$$T(z=0,t) \approx T_0 + k^* \frac{\alpha P}{v a_h c_p \rho l} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{l}{\sqrt{4at}} = T_0 + k^* \frac{\alpha P}{v a_h c_p \rho \sqrt{\pi a}} \frac{1}{\sqrt{t}} \tag{5.10}$$

5.2.2.2 Linienwärmequelle

Die Oberflächenwärmequelle lässt die konkrete Belichtungsstrategie im Wesentlichen unberücksichtigt. Zur expliziten Beachtung der Hatch-Verfestigung wird im Folgenden von einer Streifenbelichtungsstrategie (vgl. Unterabschnitt 2.2.4) ausgegangen, bei der die einzelnen Hatch-Vektoren eine feste Länge l_h besitzen, die gleichzeitig der Streifenbreite entspricht. Ist die Scangeschwindigkeit v sehr viel größer als die transversale Geschwindigkeit v_T, mit der der gesamte Streifen verfestigt wird, so kann die Wärmequelle in erster Näherung als Linienwärmequelle modelliert werden, die sich transversal fortbewegt. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn gilt[3]:

$$\begin{aligned} v \gg v_T &\approx \frac{v a_h}{l_h} \\ &\rightarrow \frac{a_h}{l_h} \ll 1 \end{aligned} \tag{5.11}$$

In diesem Fall kann der sich schnell bewegende Laserspot als eine Linie fester Breite angesehen werden, in die die optische Energie des Lasers kontinuierlich eingetragen wird (vgl. Abbildung 5.5).

Die Annahme führt dazu, dass die Temperatur auf der Linie konstant ist, was nach Abbildung 5.1 jedoch nur eine grobe Näherung darstellt. Daher wird, wie bei der Oberflächenwärmequelle, ein multiplikativer Faktor k^* eingeführt, um dem in der Realität lokalisierten Energieeintrag und den damit verbundenen Mittelungseffekten Rechnung zu tragen. Die Temperaturverteilung ergibt sich durch Faltung der Intensitätsverteilung $I_{Linie}(x', y')$ mit der Lösung der bewegten Punktquelle (vgl. Dowden (2001)):

[3] Für typische Prozessparameter $l_h = 5\,\mathrm{mm}$, $a_H = 90\,\mu\mathrm{m}$ liegt das Verhältnis bei $\approx 0{,}02$.

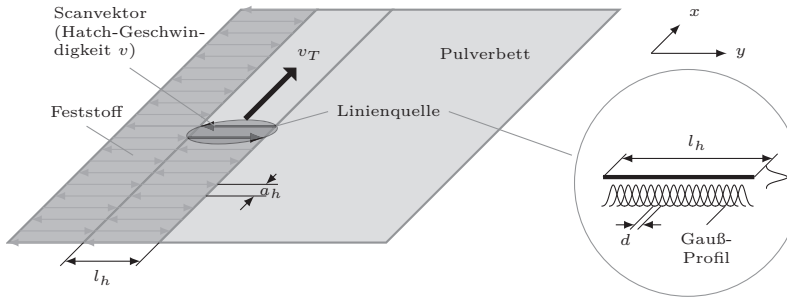


Abbildung 5.5: Linienwärmequelle bei der Streifenbelichtung

$$T(x,y) = T_0 + k^* \frac{\alpha}{2\pi\kappa} \int_{x'} \int_{y'} I_{\text{Linie}}(x',y') \times \frac{\mathrm{e}^{\frac{v_x}{2a}\left((x-x')-\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}\right)}}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}} \mathrm{d}x'\mathrm{d}y' \tag{5.12}$$

Die Linienintensitätsverteilung $I_{\text{Linie}}(x,y)$ wird durch Superposition von diskreten Gauß-Quellen ermittelt. In dem speziellen Fall, dass die Linienwärmequelle in x-Richtung nur um eine Gauß-Quelle, in y-Richtung dagegen um $n = l_h/d$ Gauß-Quellen ausgedehnt ist, ergibt sich für verschwindende Zwischenabstände d (vgl. Anhang A.3.2):

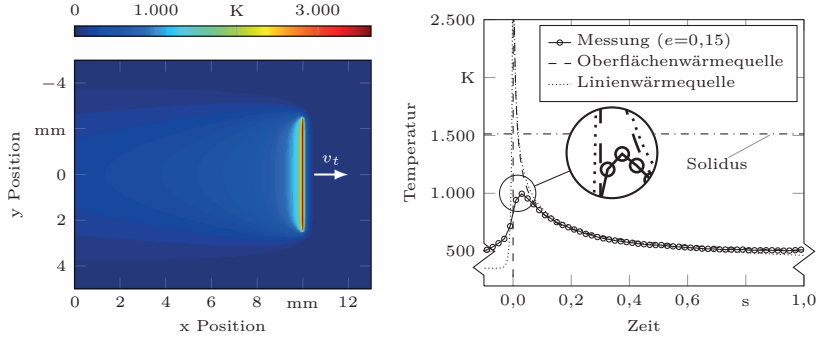
$$\begin{aligned} I_{\text{Linie}}(x,y) &= \frac{2P}{l_h \pi r_g^2} \mathrm{e}^{-2\frac{x^2}{r_g^2}} \int_{-l_h/2}^{+l_h/2} \mathrm{e}^{-2\frac{(y'-y)^2}{r_g^2}} \mathrm{d}y' \\ &= \frac{P}{l_h \sqrt{2\pi} r_g} \mathrm{e}^{-2\frac{x^2}{r_g^2}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2}-y)}{r_g} \right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2}+y)}{r_g} \right) \right] \end{aligned} \tag{5.13}$$

$\operatorname{erf}(x)$: Fehlerfunktion

Für die Temperaturverteilung auf der Oberfläche ($z = 0$) folgt schließlich Gleichung 5.14. Der Vergleich mit thermografisch gemessenen Verläufen in Abbildung 5.6b zeigt eine gute Übereinstimmung v. a. für kurze Zeiten nach der Belichtung, wenn benachbarte Scanfelder keinen Einfluss haben. Es gilt:

$$T(x,y) = T_0 + k^* \frac{1}{2\pi\kappa} \frac{\alpha P}{l_h \sqrt{2\pi} r_g} \times \int_{x'} \int_{y'} \mathrm{e}^{-2\frac{x'^2}{r_g^2}} \left[\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2} - y)}{r_g} \right) + \mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2} + y)}{r_g} \right) \right] \times \frac{\mathrm{e}^{\frac{v_x}{2a}\left((x-x') - \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}\right)}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \mathrm{d}x' \mathrm{d}y' \tag{5.14}$$

Da in dem Modell einzelne Hatch-Linien aufgrund der Annahme einer kontinuierlichen Transversalbewegung der Wärmequelle nicht berücksichtigt sind, beschreibt das Modell einen gemittelten Aufheiz- und Abkühlzyklus über mehrere Hatch-Linien. Für längere Zeiten nach der Verfestigung sinkt die Temperatur im Linienwärmequellenmodell schneller auf die Grundtemperatur ab als im Oberflächenmodell, da die Wärmeleitung auch transversal stattfindet.



(a) Linienwärmequelle **(b)** Modellvergleich

Abbildung 5.6: Linienwärmequelle und Modellvergleich, Parameter: $v = 1200\,\mathrm{mm/s}$, $l_h = 5\,\mathrm{mm}$, $P = 195\,\mathrm{W}$, $T_0 = 353\,\mathrm{K}$, $T_i = 308\,\mathrm{K}$, $T_a = 298\,\mathrm{K}$, $\alpha = 0{,}64$, $k^* = 1{,}56$

5.2.2.3 Gültigkeit der Modelle

Beide Modelle berücksichtigen nur den Wärmetransport durch Wärmeleitung und gehen von einem geschlossenen System aus, das sich ausschließlich auf ein verfestigtes Volumen bezieht. In der Realität erfolgt ein Energieaustausch zusätzlich durch Abstrahlung und durch Aufheizung des vorbeiströmenden Schutzgases. Ferner findet ein Wärmefluss von der Vorheizung des Substrates in das Pulverbett bzw. in die verfestigten Bauteile statt. Die Modelle sind

demnach nur grobe Näherungen, die es jedoch ermöglichen, die gemessenen Temperaturen im Fernfeld zu approximieren.

Das Oberflächenmodell entspricht im Wesentlichen einer statischen Wärmequelle, die ihre Energie blitzartig und nicht wiederkehrend an das Volumen abgibt. Da beim Hatching jedoch ein wiederkehrender Energieeintrag erfolgt, muss neben der Anwendung eines Korrekturfaktors sichergestellt werden, dass sich der Prozess schnell bewegt und dieser Einfluss somit klein bleibt. Das Linienmodell eignet sich vor allem für hohe Scangeschwindigkeiten und kleine Streifenbreiten bzw. Scanvektorlängen, wenn eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Scanvektors angenommen werden kann.

In detaillierten numerischen Simulationsansätzen (vgl. King et al. (2014) und Zeng et al. (2012)) können einzelne Hatchlinien aufgelöst und die Bauteilgeometrie explizit berücksichtigt werden. Aus diesen geht hervor, dass ein Volumenelement in der Größenordnung des Laserspots für typische Prozessparameter mehrfach merklich thermisch zykliert wird.

5.2.3 Temperaturmodell für den Schichtauftrag

Neben dem eigentlichen Verfestigungsprozess ist auch die Applizierung neuer Pulverschichten nach Abschnitt 4.4 Unregelmäßigkeiten unterworfen. Aufgrund der eingebrachten Prozesswärme besteht während des Bauprozesses ein Temperaturunterschied zwischen dem neu aufgetragenen Pulver ($T = T_0$) und dem im Bauraum vorhandenen Pulver bzw. den vorgeheizten Bauteilen ($T = T_1 > T_0$). Dieser Temperaturunterschied führt zu einem Wärmestrom, der im Folgenden genutzt werden kann, um die lokal aufgetragene Schichtdicke $d_l(x, y)$ berührungsfrei zu bestimmen.

Die Wärmeleitfähigkeit im Pulverbett wird durch die isolierende Wirkung des Gases in den Zwischenräumen der einzelnen Partikel und die Morphologie der Partikel dominiert. Sie ist praktisch unabhängig von dem Werkstoff und kann über etablierte Modelle abgeschätzt werden (vgl. Rombouts, Froyen, Gusarov et al. (2005), Sih & Barlow (1994) und Zehner & Schlünder (1970)). Das Vorgehen zur Modellbildung orientiert sich an den Ausführungen aus Unterabschnitt 5.2.2.1. Es werden die beiden Fälle betrachtet, bei denen Pulver auf das Pulverbett bzw. auf den Feststoff aufgetragen wird.

5.2.3.1 Pulver auf Pulver

Für den Fall *„Pulver auf Pulver“* (vgl. Abbildung 5.7a) kann die lineare Wärmeleitungsgleichung nach Gleichung 2.1 mit einer konstanten Temperatur-

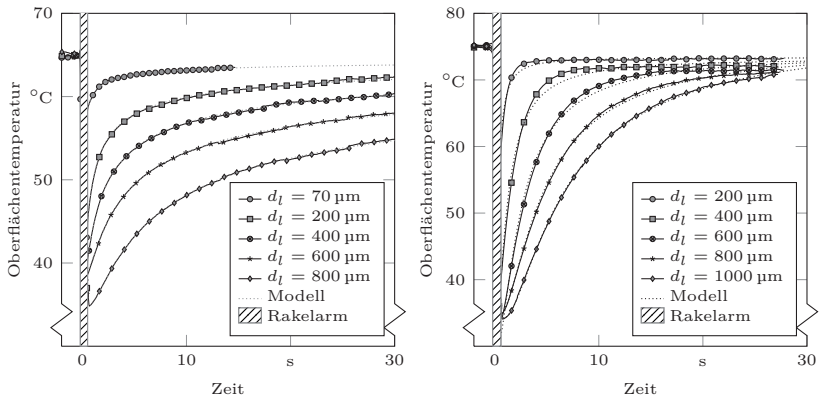
leitfähigkeit a_p ohne Quellterm angenommen werden[4]. Es handelt sich um ein Anfangswertproblem mit nachfolgenden Randbedingungen $T_A(z)$:

$$T_A(z) = T_0 + T_D(\Theta(z) - \Theta(z - 2d_l)) = \begin{cases} T_1: & z < 0 \\ T_0: & 0 \leq z \leq 2d_l \\ T_1: & z > 2d_l \end{cases} \tag{5.15}$$

$T_D = T_1 - T_0$: Temperaturunterschied

Für die Temperatur $T(z,t)$ folgt analog zu Unterabschnitt 5.2.2.1 durch Faltung mit der Fundamentallösung:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{T_D}{2}\left[\operatorname{erf}\left(\frac{2d_l - z}{\sqrt{4a_p t}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4a_p t}}\right)\right] \tag{5.16}$$



(a) Pulver auf Pulver

(b) Pulver auf Feststoff, Parameter $\nu = 2$ (vgl. Anhang A.3.3)

Abbildung 5.7: Aufheizen neu aufgetragener Pulverschichten zur Bestimmung der Schichtdicke, $a_p \approx 5 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2}$. Die angezeigten Schichtdicken entsprechen nominellen Größen, markiert ist jeder 60. Messpunkt.

Die messtechnisch relevante Oberflächentemperatur ist dann gegeben durch:

$$T(z = d_l, t) = T_0 + T_D \operatorname{erf}\left(\frac{d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) \tag{5.17}$$

[4] Der relevante Temperaturbereich liegt in der Größenordnung von 0 °C–100 °C, daher kann die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vernachlässigt werden.

Das gemessene Aufheizverhalten im Vergleich zum Modell nach Gleichung 5.17 zeigt Abbildung 5.7a. Über den relevanten Aufheizzyklus von einigen Sekunden ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

5.2.3.2 Pulver auf Feststoff

Für den Fall *„Pulver auf Feststoff“* kann keine homogene Wärmeleitfähigkeit in dem Werkstoff angenommen werden, da es sich zum einen um unverfestigtes Pulver und zum anderen um Festmaterial handelt. Da jedoch ausschließlich die Oberflächentemperatur von Relevanz für die Messung ist, kann das Anfangswertproblem für $z \neq d_l$ frei modelliert werden.

Es wird vereinfachend angenommen, dass sich die Bauteiltemperatur aufgrund der um Größenordnungen höheren Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers nicht ändert, $T(z = \pm d_l, t) = \text{const.} = T_1$. Um diese Randbedingungen in Gleichung 5.18 zu erzwingen, wird ein zusätzlicher Bereich mit der Anfangstemperatur $T_2 = 2T_1 - T_0$ in das Modell eingefügt (vgl. Carslaw & J. C. Jaeger (1986) und Abbildung 5.8).

$$\begin{aligned} z = 0: &\quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} T(z,t) = 0 \\ |z| = d_l: &\quad T(z,t) = \text{const} = T_1 \\ |z| = \pm\infty: &\quad T(z,t) = T_1 \end{aligned} \tag{5.18}$$

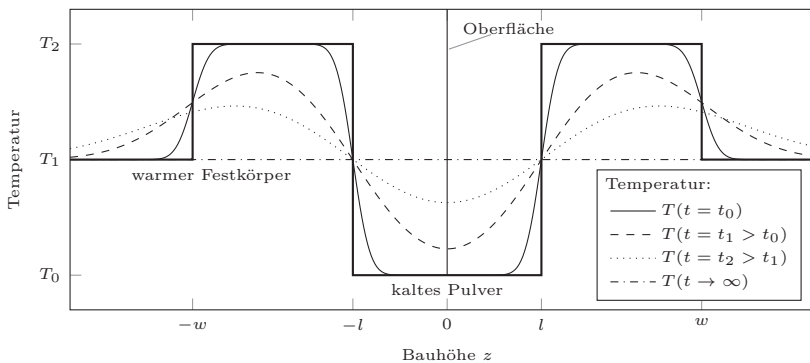


Abbildung 5.8: Modell für das Aufheizverhalten von Pulver auf Feststoff

Die Anfangsbedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

$$T_A(z) = T_1 + T_D \left[\Theta(z+w) - 2\Theta(z+d_l) + 2\Theta(z-d_l) - \Theta(z-w)\right] \tag{5.19}$$

Die Faltung mit der Fundamentallösung führt auf (vgl. Anhang A.3.3):

$$
\begin{aligned}
T(z,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}} \Bigg[& T_1 \int_{-\infty}^{-w} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4a_p t}} \mathrm{d}z' + T_2 \int_{-w}^{-d_l} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4a_p t}} \mathrm{d}z' \\
& + T_0 \int_{-d_l}^{d_l} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4a_p t}} \mathrm{d}z' + T_2 \int_{d_l}^{w} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4a_p t}} \mathrm{d}z' + T_1 \int_{w}^{\infty} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4a_p t}} \mathrm{d}z' \Bigg] \\
\rightarrow T(z=0,t) &= T_1 + (T_1 - T_2)\mathrm{erf}\left(\frac{-2d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) + (T_0 - T_2)\mathrm{erf}\left(\frac{d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) \\
&= T_1 + T_D \mathrm{erf}\left(\frac{2d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) + 2T_D \mathrm{erf}\left(\frac{-d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right)
\end{aligned}
\tag{5.20}
$$

T_D: Temperaturunterschied zwischen Festmaterial und Pulver

Abbildung 5.7b zeigt den gemessenen Temperaturverlauf von neu aufgetragenen Pulverschichten auf bereits verfestigtem Grundmaterial und den Vergleich mit dem Modell nach Gleichung 5.20. Für vergleichsweise hohe Schichtdicken ist eine gute Übereinstimmung erkennbar.

5.2.3.3 Gültigkeit und Anwendbarkeit

Im Gegensatz zum Fall *„Pulver auf Pulver“* kommt es im Fall *„Pulver auf Feststoff“* zu deutlichen Modellabweichungen. Diese sind in der Annahme für einen zusätzlichen Modellparameter w begründet (vgl. Anhang A.3.3). Durch w wird im Wesentlichen ein überhitzter Festkörper modelliert, der jedoch die Wärmeleitungseigenschaften des Pulvers besitzt, um die Linearität der Wärmeleitungsgleichung ausnutzen zu können. Das Modell stellt demnach eine grobe Näherung dar.

Prinzipiell kann aus dem Abgleich zwischen Modell und Messung die aufgetragene Schichtdicke sowohl auf einem noch vorhandenen Pulverbett als auch auf bereits verfestigtem Substrat lokal bestimmt werden. Zur Messung prozesstypischer dünner Schichtdicken im Bereich von 20 µm–200 µm werden aufgrund des geringen Temperaturunterschiedes und der schnellen Aufheizung hohe Anforderungen an die zeitliche Auflösung des Messgerätes gestellt. Zudem wird unmittelbar nach dem Pulverauftrag die direkte Sicht durch den Rakelarm versperrt, sodass die vollständige Aufheizkurve messtechnisch erst gar nicht zugänglich ist.

5.3 Materialeigenschaften und thermische Zyklierung

5.3.1 Abkühlverhalten

Die Werkstoffeigenschaften von SLM-Bauteilen werden wesentlich durch die Temperaturführung im Prozess bestimmt. Aus Kapitel 4 ist zudem bekannt, dass dies auch nach entsprechenden Wärmebehandlungen Gültigkeit besitzt. Der prozesstypischen, wiederkehrenden Aufheizung, im Folgenden „Zyklierung“ genannt, kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle zu. Sie führt nach Kruth (2007) zu einer Änderung der Schmelzbaddimensionen und beeinflusst das Abkühlverhalten und das entstehende Gefüge. Zudem kann es nach Zacharia et al. (1989) und Zeng et al. (2012) zu mikrostrukturellen Veränderungen durch Festphasenumwandlungen kommen.

Die wesentlichen Parameter zur Kontrolle der Mikrostruktur bei der Erstarrung sind nach Bontha et al. (2006) durch die Abkühlrate und den thermischen Gradienten gegeben. Diese Größen dienen als Eingang für Mikrostrukturmodelle, die wiederum das entstehende Gefüge bzw. die mechanischen Eigenschaften prognostizieren. Für eine detaillierte Behandlung dieses Themengebietes sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (vgl. De et al. (2003), J. Jaeger et al. (2012), Patil & Yadava (2007), Yadroitsev (2009) und K. Zhang et al. (2007)).

Für eine thermische Prozessüberwachung ist der Sachverhalt von Bedeutung, dass ein Wärmeeintrag in der Wärmeeinflusszone (WEZ) mit einer Herabsetzung der lokalen Materialeigenschaften einhergeht (vgl. Askeland & Fulay (2006)). Aufgrund des typischerweise sehr schnellen Verfestigungsprozesses und der hohen Abkühlraten beim SLM befindet sich der Werkstoff jedoch nur sehr kurz über der Rekristallisationstemperatur, sodass die aus dem klassischen Schweißen bekannte WEZ größtenteils vermieden wird (vgl. Abschnitt 2.3).

Beim Laserstrahlschmelzen können drei Ebenen der thermischen Zyklierung unterschieden werden, die alle zusammen das effektive Abkühlverhalten und damit die Werkstoffeigenschaften beeinflussen (vgl. Tabelle 5.1, Abbildung 5.9).

Tabelle 5.1: Ebenen der thermischen Zyklierung und Bewertung des Einflusses auf die Materialeigenschaften

Name	Zeitskala	Ortsskala	Parameter	Einfluss
Hatch-Zyklierung	ms	µm	a_h, l_h	hoch
Scanfeldzyklierung	s	mm	l_h, d_u, Strategie	gering
Schichtzyklierung	min	µm	d_l, Schichtzeit	hoch

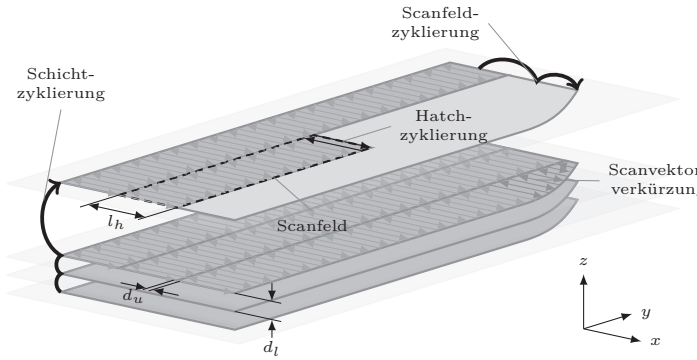


Abbildung 5.9: Ebenen der thermischen Zyklierung beim SLM

5.3.2 Hatch-Zyklierung

Bei der Hatch-Zyklierung wird ein Teil der bereits verfestigten Schmelzspur durch die nachfolgende Schmelzspur im Überlappbereich wieder aufgeschmolzen und bildet eine feste metallurgische Verbindung aus. Der nichtaufgeschmolzene Teil der Schmelzspur bzw. die weiter zurückliegenden Schmelzspuren erfahren aufgrund der Wärmeleitung im Festkörper eine wiederholte Wärmebehandlung. Die Schmelzbadlänge liegt für das untersuchte Material in der Größenordnung von einigen 100 µm und ist deutlich geringer als die Scanvektorlänge. Das Schmelzbad wird bis zum wiederkehrenden Energieeintrag demnach nicht aufrechterhalten.

Die Hatch-Zyklierung wird im Wesentlichen durch die Scanvektorlänge l_h festgelegt. Eine Verkürzung beispielsweise verringert die effektive Abkühlzeit zwischen benachbarten Spuren. Nach Meiners (1999) ist dann weniger Energie notwendig, um den Überlappungsbereich wieder aufzuschmelzen. Im Prozess selbst wird die voreingestellte Scanvektorlänge nicht notwendigerweise eingehalten. An Engstellen und Bauteilrändern wird sie bei konstantem Hatch-Abstand geometriebedingt verkürzt, sodass es zu einem Temperaturanstieg kommt[5] (vgl. Abbildung 5.9).

Die Untersuchung dieses Einflusses erfolgte anhand von Proben, die mit unterschiedlichen nominellen Scanvektorlängen verfestigt wurden. Abbildung 5.10 zeigt die bolometrisch gemessene und über eine Schicht kumulierte[6] Maximaltemperatur.

[5] Gilt im Falle einer nicht adaptiven Scanstrategie.
[6] Pro Messpunkt wird die maximal erreichte Temperatur während der Schichtverfestigung dargestellt.

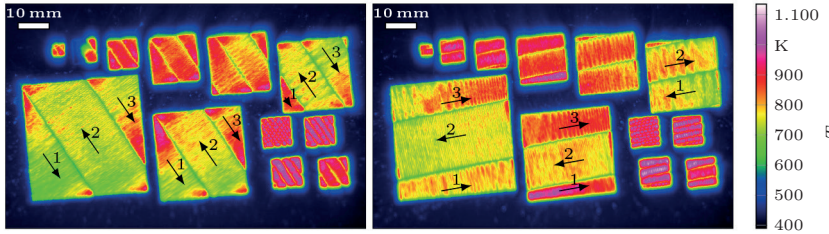


Abbildung 5.10: Maximaltemperatur für unterschiedliche Scanvektorlängen in zwei aufeinanderfolgenden Schichten (Markierung für Richtung und Reihenfolge der Verfestigung). Die erkennbaren Muster auf den Scanfeldern sind u. a. auf Schwebungen zwischen der Hatch- und der Aufnahmefrequenz zurückzuführen. Die gemessene Temperatur entspricht nicht der tatsächlichen Maximaltemperatur (vgl. Anhang A.2).

Es sind folgende Effekte auszumachen:

- Temperaturanstieg bei konstanter Scanvektorlänge: Nach Belichtungsstart steigt die Grundtemperatur der Probe durch den kontinuierlichen Energieeintrag an, sodass nachfolgende Scanfelder, je nach Größe, eine höhere Maximaltemperatur erreichen. Bei konstanter Scanvektorlänge steigt die Maximaltemperatur innerhalb eines Scanfeldes ebenfalls durch den kontinuierlichen Energieeintrag an.
- Temperaturanstieg bei Verkürzung der Scanvektorlänge: Durch die geometrieabhängige Verjüngung der Scanfelder werden die Scanvektoren verkürzt. Wenn keine adaptive Wartezeit zwischen den Scanvektoren vorgesehen wird, steigt die Maximaltemperatur in den Randbereichen bzw. Ecken der Scanfelder deutlich an. Für Proben, die mit nominell kürzerer Scanvektorlänge verfestigt werden, ist aus diesem Grund allgemein ein Anstieg der Maximaltemperatur zu erkennen.

Die Auswirkungen auf das Gefüge gehen aus Abbildung 5.11 hervor. Für mittlere bis große Scanvektorlängen ist eine hohe Antikorrelation zwischen der gemessenen Maximaltemperatur und dem FFA im Gefüge zu erkennen. Mit steigender Maximaltemperatur wird der FFA demnach reduziert. Eine Erklärung kann durch das erhöhte Grundtemperaturniveau bei kurzen Scanvektoren gegeben werden. Bei der Belichtung nachfolgender Vektoren begünstigt das gestiegene Gesamtenergieniveau in der Schmelze den Austrieb von vorhandenen Gaseinschlüssen bzw. die Durchschmelzung darunterliegender Schichten. Die Analyse der Fehlerformen zeigt in diesem Zusammenhang eine deutliche Zunahme von Bindefehlern (flache Fehler) für größere Scanvektorlängen, was diese Annahme stützt.

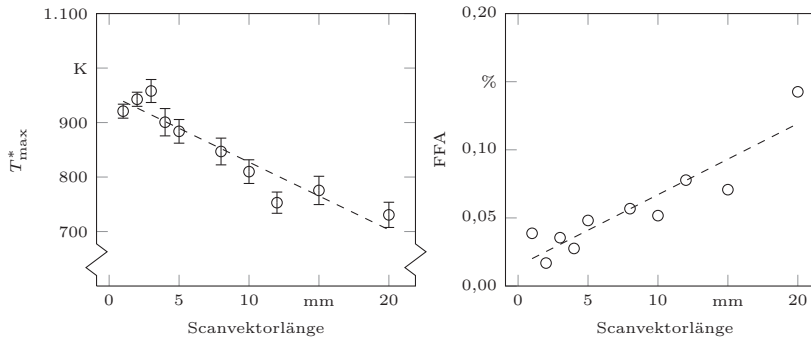


Abbildung 5.11: Links: Maximaltemperatur (gemittelt über 5 nachfolgende Schichten, Fehlerangabe entspricht 3σ des Schichtmittels). Rechts: FFA ermittelt am polierten Schliff in Probenmitte (7 mm^2, Laserscanmikroskop 20×).

Die für kleine Scanvektorlängen zu erkennenden Abweichungen in Abbildung 5.11 sind auf das sog. *Skywriting* zurückzuführen. Dies bedeutet: Nach der Verfestigung eines Vektors kehrt der Laserfokuspunkt nicht unmittelbar um, sondern überstreicht einen Wendekreis im abgeschalteten Zustand, um eine konstante Geschwindigkeit zu wahren. Die Scanzeit für den Wendekreis liegt in der Größenordnung der Scanzeit für Vektorlängen von 1 mm bis 2 mm, sodass es zu Überlagerungseffekten kommt.

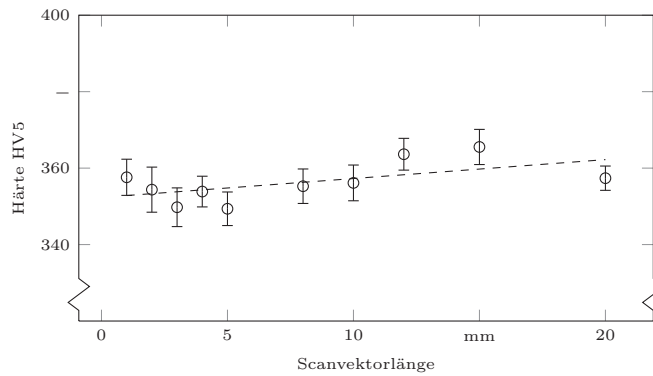


Abbildung 5.12: Gefügehärte für unterschiedliche Scanvektorlängen nach Vickers, Prüfkraft 49,03 N, Fehlerangabe $\pm 1\sigma$.

Zur weiteren Charakterisierung des Gefüges zeigt Abbildung 5.12 die gemessene Härte in Abhängigkeit der Scanvektorlänge. Alle Werte liegen in der

Größenordnung der Standardabweichung, die anhand von 30 Eindrücken pro Probe bestimmt wurde. Für zunehmende Scanvektorlängen lässt sich jedoch ein leichter Trend der Härtesteigerung erkennen, die nach Herrmann (2007) mit einer Reduktion der Korngrößen einhergeht.

Diese Beobachtung wird dadurch gestützt, dass bei langen Scanvektorlängen die mittlere Zeit oberhalb der Solidustemperatur minimal wird (vgl. Anhang A.3.2). Die tatsächlich vorherrschenden Abkühlgradienten sind dagegen maximal, da zum einen die Grundtemperatur und zum anderen der Einfluss der Hatch-Zyklierung reduziert ist.

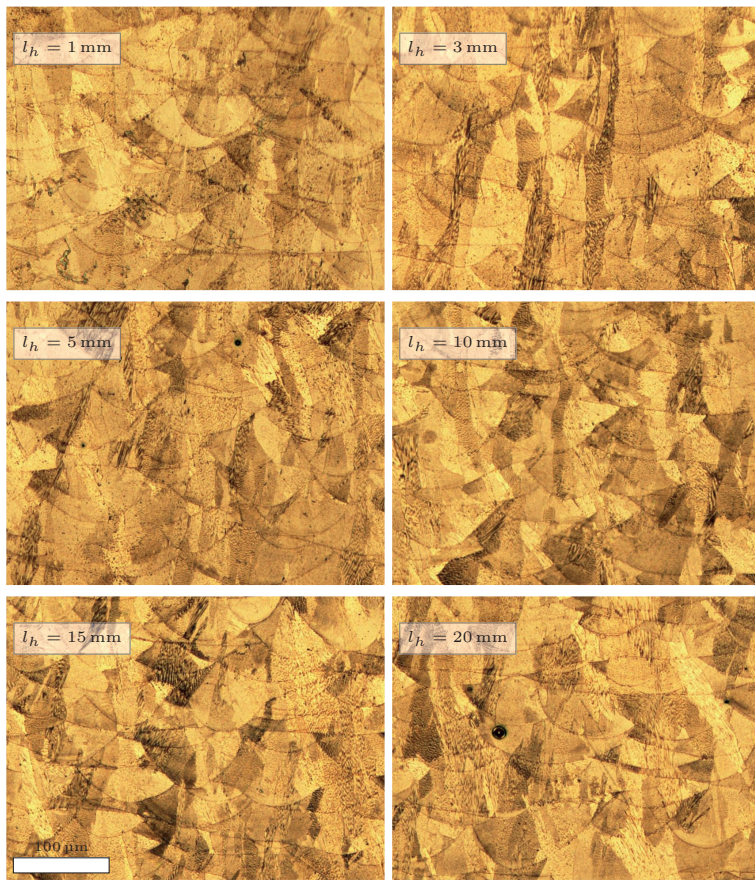


Abbildung 5.13: Gefügeausprägung für unterschiedliche Scanvektorlängen (Auflichtmikroskop 20×, Ätzung: V2A-Beize 150 s, 60 °C)

In Abbildung 5.13 sind die resultierenden Gefüge für unterschiedliche Scanvektoren anhand von geätzten Parallelschliffen dargestellt. Mit sinkender Scanvektorlänge ist eine Zunahme der mittleren Kornausdehnung in Aufbaurichtung nachweisbar. Die Beobachtungen decken sich mit der Temperaturmessung und der Modellbildung in Abschnitt 5.2, nach der bei kurzen Längen mehr Zeit bei erhöhter Temperatur zu Verfügung steht, in der das Kornwachstum erfolgen kann. Die laterale Kornausdehnung dagegen bleibt durch die Variation der Hatch-Zyklierung in Form des Parameters Scanvektorlänge nahezu unbeeinflusst. Die Hatch-Zyklierung und die Variation der Scanvektorlänge wirken sich darüber hinaus auf das Eigenspannungsniveau in den Bauteilen aus (vgl. Unterabschnitt 5.4.3).

5.3.3 Scanfeldzyklierung

Unter der Scanfeldzyklierung ist der wiederholte Temperaturanstieg bereits verfestigter Bereiche durch die Belichtung benachbarter Bereiche zu verstehen. Sie hat ihren Ursprung in der Aufteilung des zu verfestigenden Querschnitts in mehrere Scanfelder (z. B. Streifen, Inseln). Im Überlappungsbereich einzelner Scanfelder findet gezielt ein vollständiges Wiederaufschmelzen statt, um die metallurgische Verbindung der Scanfelder sicherzustellen. Das Temperaturniveau im Überlappbereich fällt bei wiederholtem Aufschmelzen niedriger aus, da die Wärmeableitung durch die bereits verfestigte Umgebung schneller erfolgen kann (vgl. Abbildung 5.10). Aus dem gleichen Grund kommt es in den Randbereichen der angrenzenden Scanfelder nur zu einem verhältnismäßig geringen Temperaturanstieg, dessen Auswirkung als unwesentlich einzuschätzen ist.

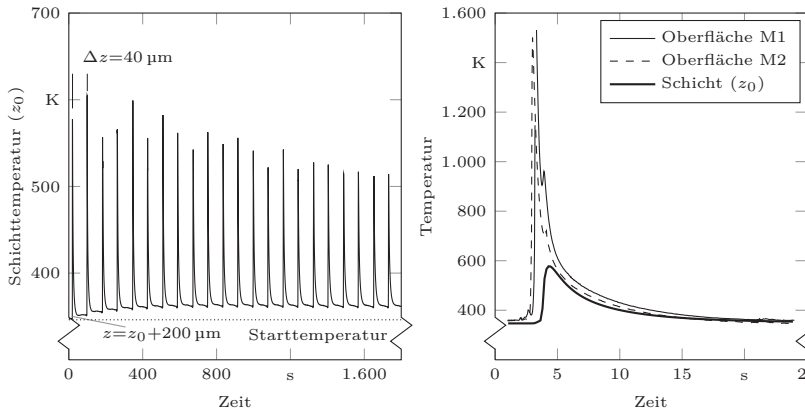
Die abrupte Änderung der thermischen Umgebung bzw. die Verlangsamung der Scangeschwindigkeit an den Scanfeldgrenzen kann jedoch dazu führen, dass ein Übergang vom Wärmeleitungsschweißen in das Tiefschweißen stattfindet. Dies begünstigt die Emission von Spritzerpartikeln und führt zu Fehlstellen im Werkstoff (vgl. King (2013) und King et al. (2014)). Durch die schichtweise Rotation der Scanfeldorientierungen bzw. die schichtweise Versetzung der Scanfelder tritt eine Homogenisierung des Gefüges ein und die Effekte werden ausgemittelt. Je nach Bauteilgeometrie und Belichtungsstrategie variiert des Weiteren die Scanfeldaufteilung und damit der Zeitpunkt, zu dem die Einzelbereiche einer Schicht verfestigt werden. In der Schicht entsteht ein thermischer Gradient, der sich auf die Ausbildung von Eigenspannungen auswirkt (vgl. Abschnitt 2.3, Unterabschnitt 5.4.3).

5.3.4 Schichtzyklierung

Unter der Schichtzyklierung wird das wiederholte Aufschmelzen bzw. Erwärmen bereits verfestigter Schichten durch den Energieeintrag in darüber liegende Schichten verstanden. Je nach gewählten Belichtungsparametern bzw. lokalen

Bedingungen variiert die Schmelzbadtiefe d_s (vgl. Unterabschnitt 4.3.3). Sie liegt in der Größenordnung der Schichtdicke d_l, kann aber durch den Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum (verdampfungsdominierten) Tiefschweißen deutlich ansteigen. Die Anzahl der relevanten Umschmelzzyklen ergibt sich aus dem Verhältnis d_s/d_l.

Unterhalb des Schmelzbades durchläuft der verfestigte Werkstoff mehrere Temperaturzyklen, aber keine weiteren Umschmelzvorgänge. Für eine thermografische Überwachung ist die Temperatur unterhalb der aktuellen Schicht nicht zugänglich. Zu deren Analyse zeigt Abbildung 5.14a die taktil aufgenommenen Temperaturen in fester Bauhöhe für einen fortschreitenden Bauprozess.



(a) Temperatur einer festen Schicht für einen fortschreitenden Bauprozess (taktile Messung)

(b) Vergleich zwischen thermografisch (Messstellen M1, M2) und taktil aufgenommener Temperatur

Abbildung 5.14: Temperaturentwicklung bei der Schichtzyklierung, Belichtungsparameter: $v = 850\,\mathrm{mm/s}$, $l_h = 5\,\mathrm{mm}$, $d_l = 40\,\mu\mathrm{m}$ (Mantelthermoelement Typ K, $\varnothing = 1\,\mathrm{mm}$, $\tau = 150\,\mathrm{ms}$)

Neben dem Abfall der Maximaltemperatur ist ein deutlicher Anstieg der Grundtemperatur mit zunehmendem Baufortschritt zu erkennen. Die taktile Messung zeigt, dass die Schichtzyklierung im Fall von Iconel 718 Temperaturen von mindestens 300 °C über die Größenordnung von 10 nachfolgenden Schichten bewirkt. Im Vergleich zu den thermografisch bestimmten Oberflächentemperaturen (vgl. nachfolgende Abbildung 5.14) ergeben sich schon bei geringen Abständen zwischen Messfühler und Oberfläche erhebliche Abweichungen, die vor allem auf die Trägheit der taktilen Messung zurückzuführen sind.

5.4 Wärmeabfuhr und Wärmehaushalt

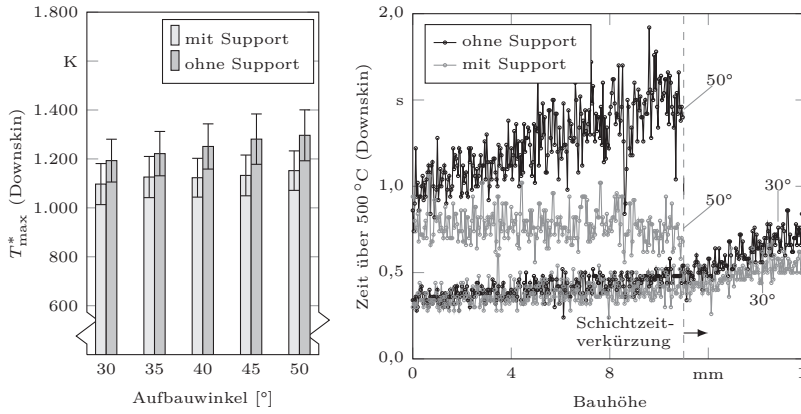
Die Geometrie der Bauteile im Bauraum, die Baukammer selbst, die Substratplatte und die mit Pulver gefüllten Zwischenräume bilden ein komplexes System von Wärmekapazitäten, das sich auf die Abkühlung der verfestigten Schichten auswirkt. Während das Pulver aufgrund der isolierenden Wirkung den Abkühlprozess verlangsamt, dienen Stützstrukturen und Bauträger dazu, den Abkühlprozess zu beschleunigen und prozessgefährdende Wärmestauungen zu vermeiden. Letztere führen beispielsweise an Überhängen zu der Ausbildung von Rayleigh-Taylor-Instabilitäten (Chivel & Smurov 2011) sowie *Balling* und verursachen Porositäten in diesen Bereichen (Craeghs, Clijsters, Yasa & Kruth 2011). Während erhöhte Temperaturen nach Unterabschnitt 5.3.2 vorteilhaft für einen geringen FFA sind, stellt die Überhitzung ein wesentliches Problem beim SLM dar, da sie zu Turbulenzen, Verdampfung und Porenbildung führt (Clijsters et al. 2014). Nachfolgend werden in diesem Zusammenhang Überhänge, poröse Grundmaterialien und Eigenspannungen diskutiert. Der Einfluss von umgebenden Wärmekapazitäten und der Bauteilhöhe ist gering und wird in Anhang A.4 erläutert.

5.4.1 Einfluss von Überhängen

Die Untersuchung von Überhängen erfolgt anhand von Prismengeometrien, die in unterschiedlichen Aufbauwinkeln mit und ohne Stützstrukuren aufgebaut wurden. Auf der dem Pulverbett zugeneigten Probenseite (*Downskin*) tritt eine prozessbedingte Verzögerung der Wärmeabfuhr auf. Abbildung 5.15a zeigt die thermografisch bestimmte Maximaltemperatur für unterschiedliche Aufbauwinkel. Ohne wärmeleitende Supportstrukturen kommt es zu einem höheren Temperaturniveau, das jedoch über den Bauprozess konstant bleibt. Für zunehmende Neigungswinkel der Proben steigt die Downskin-Fläche an und führt in diesem Bereich ebenfalls zu einem erhöhten Temperaturniveau.

Der transiente Wärmeabfluss wird anhand einer Zeitdauer t_O charakterisiert, die ein Bauteilbereich oberhalb einer festzulegenden Temperaturschwelle verweilt (vgl. Abbildung 5.15b). Es sind folgende Erkenntnisse abzuleiten (vgl. Krauss et al. (2014a)):

- Für große Aufbauwinkel und ohne Vorhandensein von entsprechenden Supportstrukturen steigt sowohl die Zeitdauer t_O als auch die Maximaltemperatur.
- Ohne Support steigt im Verlauf des Bauprozesses die Abkühlzeit t_O für große Aufbauwinkel kontinuierlich an, da der Wärmefluss reduziert ist. Infolge von Kantenüberhöhungen wird dadurch die Prozessstabilität zunehmend gefährdet.



(a) Max. Temperatur (Mittelwert, Fehlerangabe $\pm 1\sigma$)

(b) Zeit über 500 °C

Abbildung 5.15: Maximaltemperatur und Zeit über Schwellentemperatur an Überhängen. Mit steigendem Aufbauwinkel (gemessen von der z-Achse) nimmt die Downskinfläche zu und die Wärmeableitung wird verzögert.

- Geeignet ausgelegte Supportstrukturen ermöglichen eine konstante Wärmeableitung bzw. eine konstante Zeitdauer t_O und damit einen stationären Prozess.
- Der Wärmefluss verzögert sich bzw. die Zeitdauer t_O erhöht sich, wenn die Schichtzeit reduziert wird und eine andere Grundtemperatur vorherrscht.

Die Auswirkungen auf die Materialeigenschaften in Form von Dichte und Härte gehen aus Abbildung 5.16 hervor. Als Referenz dient jeweils die Messung in der Probenmitte, die in erster Näherung nicht durch den Randbereich beeinflusst wird. Im Rahmen der Messgenauigkeit und unter Berücksichtigung der statistischen Streuung unterscheiden sich die gemessenen FFA innerhalb einer Probe (Probenmitte und Downskin-Bereich) nicht signifikant (Bewertung -). Für Proben mit Support ist jedoch im Vergleich zu Proben ohne Support im Mittel eine Tendenz hin zu geringeren FFA festzustellen (Bewertung *). Bei dem größten untersuchten Aufbauwinkel ist dieser Unterschied statistisch signifikant (Bewertung **).

Der Anstieg des FFA kann mit den Verdampfungseffekten bei hohen Maximaltemperaturen und verzögerter Wärmeleitung in Verbindung gebracht werden (vgl. Abschnitt 5.3). Da der Effekt jedoch sehr gering ausfällt, wird der Einfluss auf die mechanische Festigkeit in diesem Versuchsraum vernachlässigt.

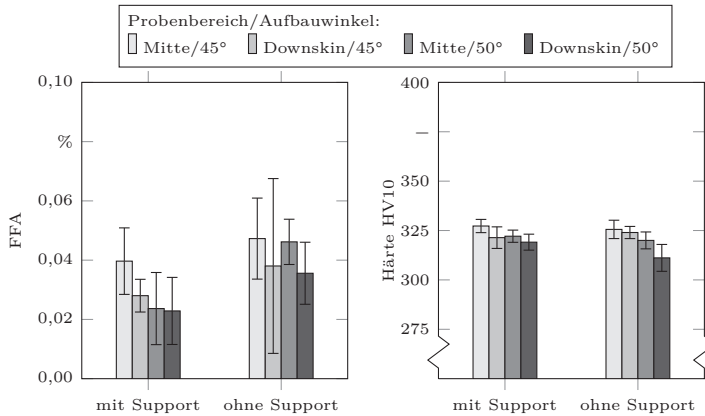


Abbildung 5.16: FFA und Härte an Überhängen (Zustand: nach Aufbau, Auswertefläche FFA 3,6 mm^2, 10 Eindrücke pro Härtewert, Fehlerangabe $\pm 1\sigma$)

Hinsichtlich der Härte lassen sich für Proben mit und ohne Support im Mittel keine Unterschiede feststellen. Gleiches gilt für unterschiedliche Aufbauwinkel, wenn die Proben mit Stützstrukturen gefertigt werden. Ohne Stützstrukturen sind dagegen signifikante Unterschiede der resultierenden Härte für unterschiedliche Aufbauwinkel nachweisbar (Bewertung ***). Für den maximal untersuchten Aufbauwinkel von 50° (ohne Supportstruktur) trifft dies auch für den Vergleich zwischen Probenmitte und Downskin-Bereich zu. Die Probenhärte ist in diesem Falle reduziert und kann mit der wachsenden Korngröße in den überhitzten Bereichen erklärt werden (vgl. Unterabschnitt 5.3.2).

5.4.2 Einfluss von porösem Grundmaterial

Das Abkühlverhalten einer Schicht ist neben den Wärmeleitungseigenschaften der Schicht selbst auch durch die Wärmeleitungseigenschaften des darunterliegenden Grundmaterials begründet. Zur Charakterisierung dieses Sachverhaltes wird nachfolgend die aus dem Oberflächenmodell bestimmte, effektive Temperaturleitfähigkeit betrachtet (vgl. Unterabschnitt 5.2.2.1). Als Versuchsgrundlage dienen Würfelgeometrien (Proben A–L), die durch eine geeignete Wahl der Prozessparameter zur Hälfte porös aufgebaut wurden, um unterschiedliche Wärmeleitungseigenschaften zu provozieren. Die Verfestigung der anderen Probenhälfte erfolgte dagegen mit einheitlichen Belichtungsparametern, um vergleichbare Oberflächeneigenschaften für die thermografische Messung zu erzeugen. Abbildung 5.17 zeigt die gemittelte Temperaturleitfähigkeit der Proben über die Bauhöhe (vgl. Krauss et al. (2014b)).

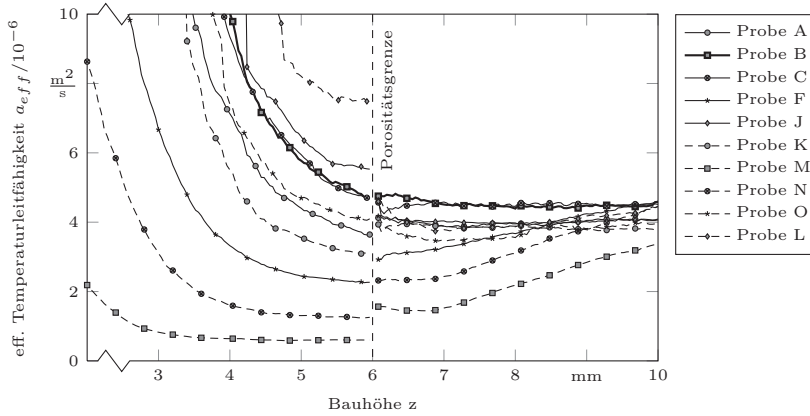


Abbildung 5.17: Effektive Temperaturleitfähigkeit für Proben mit unterschiedlicher Porosität in Abhängigkeit der Bauhöhe, gemittelt über 10 Schichten. Einheitliche Verfestigungsparameter ab Porositätsgrenze $z = 6\,\mathrm{mm}$, Markierung an jedem 10. Messpunkt, Referenzprobe: Probe B.

Unterhalb der Porositätsgrenze wird der Einfluss der Substratplatte und der unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften deutlich, indem die effektive Leitfähigkeit hoch ausfällt und stark variiert. Oberhalb der Porositätsgrenze ist jedoch ein signifikanter Unterschied der Wärmeableitung erkennbar, der nicht auf die Oberflächenqualität, die Verfestigungsparameter oder die Nähe zur Grundplatte, sondern ausschließlich auf das Grundmaterial zurückzuführen ist. Sowohl die auftretenden Delaminationen als auch die erhöhten Porositäten (vgl. Abbildung 5.18) führen zu einer Reduktion der effektiven Temperaturleitfähigkeit, die sich in der Größenordnung von Millimetern nach der Porositätsgrenze thermografisch nachweisen lässt. Mit zunehmender Bauhöhe tritt eine Homogenisierung ein.

In Abbildung 5.19 wird die effektive Temperaturleitfähigkeit oberhalb der Porositätsgrenze dem FFA unterhalb der Porositätsgrenze (vgl. Abbildung 5.18) gegenübergestellt. Es ist eine hohe negative Korrelation erkennbar, nach der die Temperaturleitfähigkeit für steigende Porositäten des Grundmaterials deutlich abnimmt. Durch die Quantifizierung des Abkühlverhaltens lässt sich demnach auf die Eigenschaften des bereits verfestigten Materials schließen, allerdings erst bei einem FFA in der Größenordnung von Prozentpunkten.

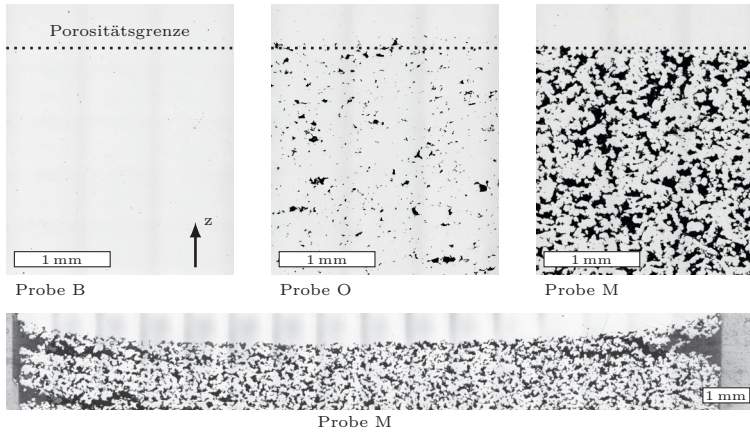


Abbildung 5.18: Poröse Grundkörper zur Bestimmung der effektiven Temperaturleitfähigkeit. Thermische Spannungen führen im Verlauf des Bauprozesses zu Delaminationen in der Umgebung der Übergangsstelle. Probenbezeichnung gemäß Abbildung 5.17.

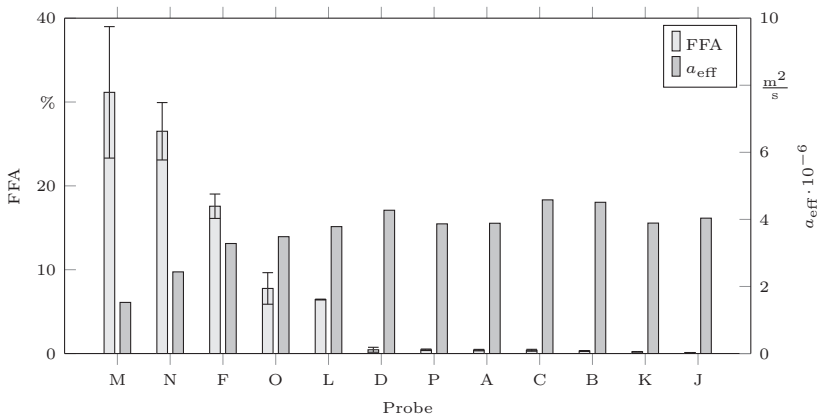
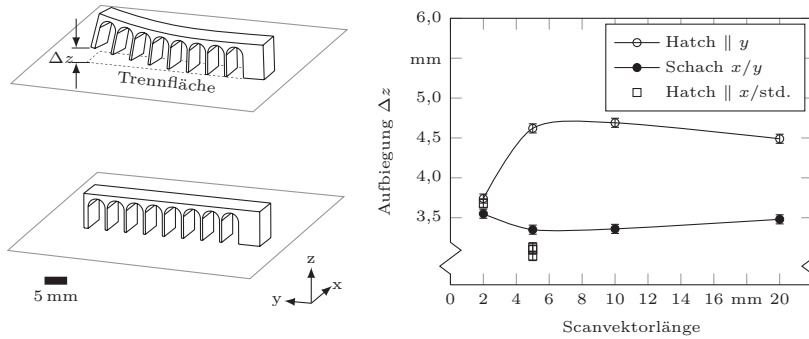


Abbildung 5.19: FFA des Grundmaterials und eff. Temperaturleitfähigkeit darüber liegender Schichten im Abstand von 1 mm zur Porositätsgrenze. Der Korrelationskoeffizient beträgt −0,9. Probenbezeichnung gemäß Abbildung 5.17.

5.4.3 Eigenspannungen und Verzug

Eigenspannungen, die zu Delaminationen und Rissen führen, stellen nach Kempen et al. (2013) eine Barriere im Bereich der additiven Fertigung dar, die die Verarbeitung vieler Metalle verhindert bzw. erschwert. Die Temperaturgradienten, sowohl innerhalb einer Schicht als auch entlang der Aufbaurichtung, gelten als die treibende Kraft für die Ausbildung von Eigenspannungen. Die Gradienten sind wiederum geometrie- und belichtungsbedingt und können sich, je nach lokalen Wärmeleitungsbedingungen, in einem inhomogenen Abkühlverhalten äußern. Nach Kruth et al. (2012) ist bekannt, dass sowohl die Scanvektorlänge als auch die Orientierung der Scanvektoren relativ zu einer Vorzugsrichtung das Eigenspannungsniveau ändern. Inwiefern aus der thermografisch zugänglichen Oberflächentemperatur einer Schicht auf die verbleibenden Eigenspannungen geschlossen werden kann, wird anhand von Cantilever-Proben nach Abbildung 5.20a erläutert. Die Quantifizierung des Eigenspannungsniveaus erfolgt indirekt über die Verformung der Probengeometrie, nachdem sie von der Substratplatte teilweise abgetrennt wurde und die Spannungen relaxieren konnten.



(a) Cantilever-Proben und Messprinzip

(b) Verzugshöhe nach Freischneiden der Probenkörper

Abbildung 5.20: Charakterisierung des Eigenspannungsniveaus (Parameter: Streifen mit Hatch-Richtung x bzw. y, Schach x/y und Standardbelichtung x/y, Probenvorzugsrichtung: y)

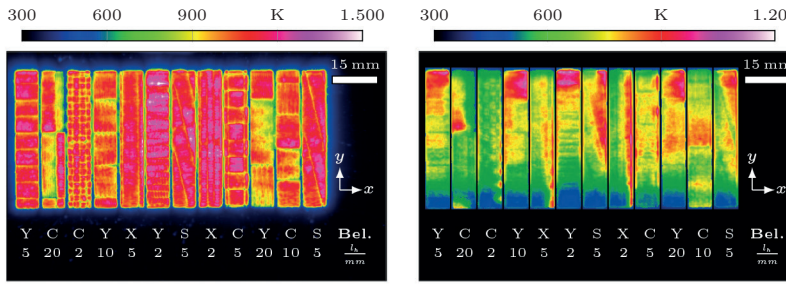
Die Ergebnisse aus Abbildung 5.20b bestätigen im Wesentlichen die Erkenntnisse von Kruth et al. (2012), nach denen lange Scanvektoren entlang der Vorzugsrichtung das Eigenspannungsniveau erhöhen. Die Schachbelichtung bzw. die sog. Island-Strategie weist nahezu unabhängig von der Scanvektorlänge das geringste Eigenspannungsniveau auf. Darüber hinaus reduzieren höhere Maximaltemperaturen das Eigenspannungsniveau. Dieser Zusammenhang wird in Kruth et al. (2012) über den Temperaturgradienten erklärt, der

bei kurzen Scanvektorlängen geringer ausfällt. Aus der Korrelationsanalyse (vgl. Tabelle 5.2) mit den gemessenen Temperaturen wird diese These ebenfalls bekräftigt.

Tabelle 5.2: Korrelation von Verzugshöhe und Wärmehaushalt einer Schicht hinsichtlich Maximaltemperatur T^*_{max} und Temperatur unmittelbar nach Verfestigung des jeweiligen Probenkörpers T_{ende}

Messgröße	$T^*_{\mathbf{max}}$	$\sigma_{T_{\mathbf{max}}*}$	$T_{\mathbf{ende}}$	$\sigma_{T_{\mathbf{ende}}}$
Korrelation mit Δz	−0,31	−0,23	0,39	0,46

Der Thermografie sind nur Oberflächentemperaturen zugänglich. Die Ausbildung der Eigenspannungen erfolgt jedoch maßgeblich in Aufbaurichtung und wird durch die Schichtzyklierung mehrfach beeinflusst. Einen Hinweis auf ein erhöhtes Eigenspannungsniveau liefert jedoch die Analyse der mittleren Temperatur bzw. die Varianz dieser Temperaturverteilung unmittelbar nach der Verfestigung des Querschnitts (vgl. Abbildung 5.21). Für homogene Temperaturverteilungen (geringe Varianz) kann von einem geringeren Eigenspannungsniveau ausgegangen werden.



(a) Maximaltemperatur $T^*_{\max}$ für unterschiedliche Belichtungsstrategien

(b) Schichttemperatur T_{ende} unmittelbar nach der Verfestigung der jeweiligen Probengeometrie (zusammengesetzt)

Abbildung 5.21: Wärmehaushalt für unterschiedliche Belichtungsstrategien (C: Schachbrettmuster, X/Y: Streifenbelichtung mit Hatch-Richtung in x- bzw. y-Richtung, S: Standardbelichtung mit rotierenden Streifen)

Bei großflächigen Bauteilen scheidet eine solche Analyse jedoch aus, da die Belichtungszeit im Vergleich zu der Abkühlzeit groß ist und eine Momentaufnahme nicht aussagefähig ist. Die geringen Korrelationen sind u. a. darauf zurückzuführen. Um ein erhöhtes Eigenspannungsniveau im Rahmen einer thermischen Prozessüberwachung zu erkennen, ist die Temperaturbestimmung nur bedingt geeignet. Die Folgen von frei werdenden Eigenspannungen und Schicht-

abrissen lassen sich dagegen über den gestörten Wärmefluss identifizieren (vgl. Unterabschnitt 5.4.4).

5.4.4 Schichtanbindung

Eine fehlerhafte bzw. ungenügende Anbindung zwischen aufeinanderfolgenden Schichten kann sowohl geometrie- als auch belichtungs- als auch beschichtungsbedingte Ursachen haben. Sie führt zu Prozessunregelmäßigkeiten, die mithilfe eines Überwachungssystems frühzeitig erkannt werden müssen. Inwiefern sich die Qualität einer Schichtanbindung anhand des Abkühlverhaltens charakterisieren lässt, wird nachfolgend anhand der Verfestigung von Einzelspuren untersucht.

Abbildung 5.22 zeigt den thermografisch aufgenommenen Temperaturverlauf für unterschiedliche nominelle Schichtdicken. Durch die Erhöhung der Schichtdicke wird die Durchschmelzung reduziert und es werden Anbindungsfehler zwischen den Schichten provoziert. Diese äußern sich in einer verminderten Wärmeleitung in den Grundkörper und es kommt zu einer Erhöhung der Temperaturniveaus und der Abkühlzeit.

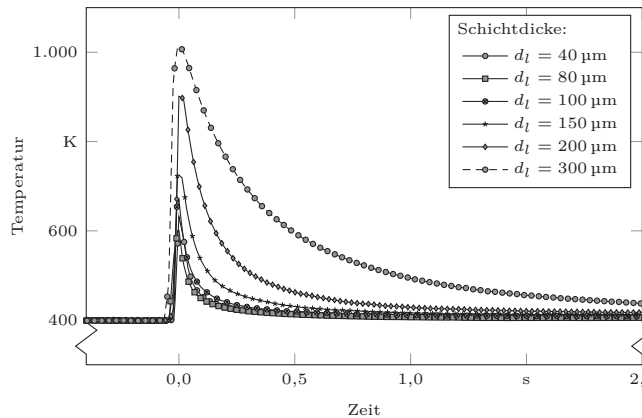


Abbildung 5.22: Temperaturverlauf bei Verfestigung einzelner Hatch-Vektoren ($P = 195\,W, v = 1200\,mm/s$, markiert ist jeder 5. Messpunkt). Zur Steigerung der Zeitauflösung wurde das zeilenweise Auslesprinzip des Detektors verwendet (vgl. Anhang A.2.3).

Aus Abbildung 5.22 ist ersichtlich, dass bei hohen Schichtdicken (hier $d_l > 150\,\mu m$) die eingetragene Energie zur Durchschmelzung/Anbindung nicht mehr ausreicht. Die Temperatur steigt sprunghaft an und die Wärmeleitung erfolgt stark verzögert über das Pulverbett. In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass sich die

Schichtdicke unmittelbar auf den FFA in dem Gefüge auswirkt. Für prozesstypische Belichtungsparameter ist eine deutliche Zunahme des FFA schon bei geringen Schichtdicken ($d_l < 50\,\mu m$) zu erkennen.

Eine Erhöhung der Schichtdicke führt neben einem Anstieg der Maximaltemperatur auch zu einem zunehmenden Spritzeraufkommen (vgl. Abbildung 5.23). Nach Abschnitt 2.2 ist dies u. a. darin begründet, dass der Wärmekontakt zu darunterliegenden Schichten aufgrund der hohen Prozessdynamik lokal variiert und Schmelzbadaustriebe bei abrupten Änderungen begünstigt werden. Darüber hinaus gewinnen die Schmelzbaddynamik und der stabilisierende Kontakt zum Substrat an Bedeutung (vgl. Yadroitsev (2009)). Ein vollständiger Abriss des Wärmekontaktes bei noch höheren nominellen Schichtdicken geht schließlich wieder mit einer Abnahme der Spritzeraktivität einher.

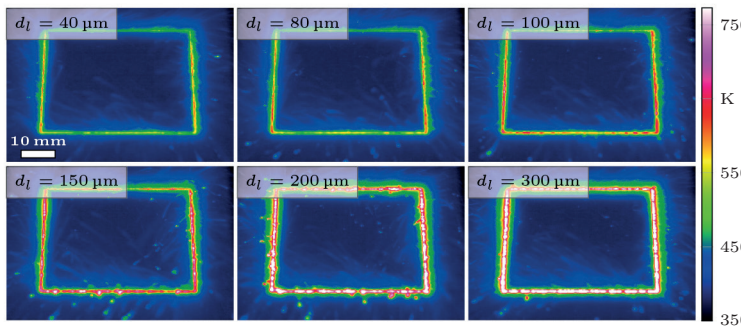


Abbildung 5.23: Maximaltemperatur (kumuliertes Schichtbild) bei der Verfestigung von Einzelspuren mit unterschiedlichen Schichtdicken

5.5 Zusammenfassung

Die Ausführungen des Kapitels haben gezeigt, dass die Gefügeeigenschaften hinsichtlich Fehlerflächen (Poren, Bindefehler) und Korngrößen einerseits durch die Prozessführung und das thermische Verhalten im SLM-Prozess beeinflusst werden, andererseits selbst Einfluss auf den Temperaturverlauf nehmen. Prozessabweichungen, z. B. in Form einer lokal erhöhten Schichtdicke oder einer erhöhten Porosität, können anhand des Abkühlverhaltens durch thermografische Verfahren erkannt werden.

Darüber hinaus spielten die Bauteilgeometrie, die Bauteilorientierung im Bauraum und die Auslegung von Stützstrukturen eine wichtige Rolle für das thermische Verhalten im Prozess. An Überhängen kommt es zu Überhitzungen, die die Materialqualität negativ beeinflussen können oder im weiteren Verlauf die Prozessstabilität gefährden. Durch die Charakterisierung des Abkühlverhaltens in Form von zum Teil modellbasierten Indikatoren konnten in diesem

Kapitel erste Abhängigkeiten aufgezeigt werden. Diese sollen nachfolgend für die Umsetzung eines thermischen Überwachungssystems weiter analysiert werden.

6 Thermografische In-Process-Überwachung

6.1 Überblick

In Kapitel 5 wurde diskutiert, dass sich aus dem Wärmehaushalt im SLM-Prozess Rückschlüsse auf die Qualität ziehen lassen. Die Prozessauslegung beim SLM gestaltet sich hinsichtlich Bauteilgeometrie, Positionierung, Orientierung, Stützstrukturauslegung und Belichtungsparametern sehr individuell bzgl. verschiedenen Anwendern und Maschinen. Eine In-Process-Überwachung kann in diesem Zusammenhang eine Vergleichbarkeit schaffen und dient dazu, Unregelmäßigkeiten frühzeitig zu erkennen und die Bauteilqualität zu erfassen. Gegenüber einer Maschinenparameterüberwachung (vgl. Kapitel 2) besteht der Mehrwert einer In-Process-Überwachung in der Erkennung von Unregelmäßigkeiten, die durch externe Einflüsse und intrinsische Randbedingungen, bzw. Veränderungen dieser, verursacht werden und nicht direkt zugänglich sind (z. B. Absorptionsverhalten, Intensitätsverteilung der Laserstrahlung, Oberflächeneigenschaften, stochastische Kurzzeitschwankungen etc.).

Nachfolgend wird ein allgemeines Vorgehen zur schichtweisen Bildung und Bewertung von Indikatoren vorgestellt (vgl. Abschnitt 6.2), die als Grundlage für eine schichtweise In-Process-Überwachung dienen. Für die hier im Vordergrund stehende thermische In-Process-Überwachung werden in Abschnitt 6.3 geeignete Indikatoren nach diesem Vorgehen abgeleitet und deren Potenziale und Grenzen anhand von Anwendungsbeispielen in den anschließenden Unterabschnitten diskutiert. Die Analyse erfolgt auf Basis der in Anhang A.2 vorgestellten und untersuchten Sensorik. Der Fokus liegt dabei nicht auf einer industriellen Umsetzung einer Überwachungslösung, sondern auf dem Aufbau von Verständnis bzgl. der grundlegenden Zusammenhänge.

6.2 Methode

6.2.1 Aufbau der Methode

Als Grundlage für die In-Process-Überwachung dient die aus der Wechselwirkungszone und von der Schichtoberfläche emittierte Strahlungsleistung im sensorspezifischen Wellenlängenbereich (hier 7 µm bis 14 µm). Sie stellt nach Kapitel 5 eine prozesscharakterisierende Ausgangsgröße dar, die von einem Off-Axis-Messsystem in ortsaufgelöster Form erfasst werden kann (vgl. Anhang A.2). Abbildung 6.1 zeigt das prinzipielle Vorgehen zum Aufbau des Prozessüberwachungssystems.

Durch das Überwachungssystem werden aus den Messdaten in einem schichtweisen Prinzip Merkmale und Indikatoren extrahiert. Deren Eignung für eine Qualitätsbeurteilung wird anschließend für zwei Anwendungsbereiche bewertet: die schichtweise Auswertung (SWA) und die schichtaufgelöste Auswertung (SAA). Es folgt eine Reduktion und Priorisierung der betrachteten

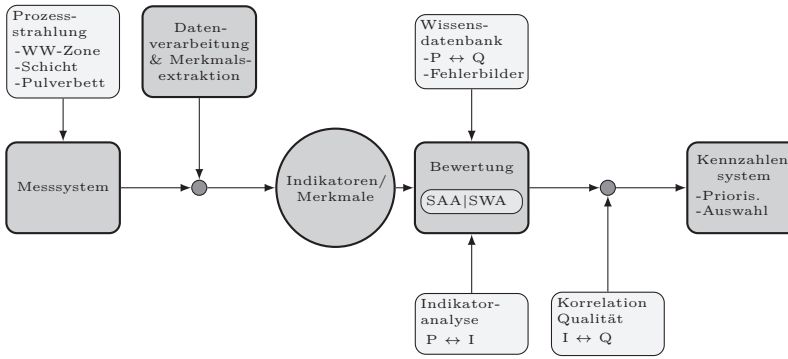


Abbildung 6.1: Vorgehen zum Aufbau der Prozessüberwachung (P Prozessparameter, I Indikatoren, Q Qualitätsmerkmale)

Merkmale sowie eine Zusammenfassung der Eigenschaften in einem Kennzahlensystem. Die Methode berücksichtigt dabei bereits vorhandene Daten aus Prozessuntersuchungen und Werkstoffprüfungen (Wissensdatenbank), um die nachträgliche Einbindung eines In-Process-Überwachungssystems in eine bestehende Anwendung aufwandsarm gestalten zu können. Das Vorgehen ist nicht auf die Messung thermischer Strahlung begrenzt, sondern prinzipiell auf alle ortsaufgelöst und berührungslos messbaren Prozessemissionen bei Pulverbettverfahren verallgemeinerbar.

Anhand des Kennzahlensystems wird für die spätere Nutzung der Prozessüberwachung eine Auswahl der zu betrachtenden Indikatoren getroffen (vgl. Unterabschnitt 6.2.4). Zudem unterstützt es bei der nutzerspezifischen Klassifikation des vorliegenden Prozesszustandes bzw. Fehlerbildes.

6.2.2 Datenverarbeitung und schichtweise Merkmalsextraktion

Für die Beurteilung der Qualität, die Dokumentation und die Visualisierung der Überwachungsergebnisse müssen die orts- und zeitaufgelösten Messdaten verarbeitet, das Datenaufkommen reduziert und das Wissen über den betrachteten Prozess gesteigert werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Ableitung der (Qualitäts-)Indikatoren zu (vgl. Kapitel 2). Indikatoren werden nachfolgend als Merkmale verstanden, die durch geeignete Verfahren im Rahmen der Merkmalsextraktion aus den Rohdaten gewonnen werden.

Die In-Process-Überwachung basiert auf einem schichtweisen Prinzip, bei dem für jede additiv hergestellte Einzelschicht ortsaufgelöste Daten in Form von komprimierten Indikatoren erzeugt werden. Über den gesamten Bauprozess betrachtet entsteht damit für jede physikalisch erzeugte Schicht und jeden

Indikator ein sog. Schichtbild. Die Kombination der Schichtbilder in einem tomografischen Ansatz führt dann zu einer vollständigen dreidimensionalen Darstellung der erzeugten Indikatoren bzw. Merkmale. Neben den Visualisierungsmöglichkeiten, denen nach E. DIETRICH et al. (2007) eine zentrale Bedeutung zukommt, wird mit dem schichtweisen Ansatz das aufkommende Datenvolumen in einem handhabbaren Rahmen gehalten. Bei der Auswahl von Indikatoren für eine schichtweise Überwachung müssen neben den detektorspezifischen Möglichkeiten v. a. die prozess- und qualitätsrelevanten Aspekte einbezogen werden (vgl. VDI 3405-1).

Überwachungsbereiche Für die thermische In-Process-Überwachung beim SLM sind zwei Anwendungsbereiche relevant: Die Überwachung der Verfestigung bei hohen Temperaturen und die Überwachung des Schichtauftrages bei geringen Temperaturen. Im Bereich der *Verfestigung* können unterschieden werden:

- die geometrische und thermische Charakterisierung des Wärmeeinflussbereichs (WEB),
- der Temperaturverlauf und der Wärmehaushalt der Schicht während der Verfestigung.

Der WEB umfasst das flüssige Schmelzbad und die es umgebenden heißen, bereits verfestigten Bereiche (vgl. Abschnitt 5.3, Unterabschnitt 6.3.2). Die Temperaturschwelle, ab der ein Bereich zu dem WEB gezählt wird, muss abhängig von den Prozessparametern und Materialeigenschaften analysiert und festgelegt werden.

Im zweiten Anwendungsbereich, dem *Schichtauftrag*, werden die Qualität und die Homogenität der aufgetragenen Pulverschichten fokussiert. Hier kann es zu lokal variierenden Schichtdicken kommen, die in mechanischen Wechselwirkungen, Verschleiß des Auftragssystems und Pulvermangel begründet sind (vgl. Kapitel 2). Für die thermische Überwachung sind zu unterscheiden:

- die thermische Charakterisierung der aufgetragenen Schicht (z. B. Aufheizverhalten bzw. Schichtdicke, vgl. Unterabschnitt 5.2.3),
- die geometrische Charakterisierung der aufgetragenen Schicht auf Basis lokal unterschiedlicher Emissionseigenschaften.

Vorgehen Das Vorgehen zur Ableitung von schichtweisen Indikatoren gliedert sich in drei Schritte und ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Bei den thermografischen Daten des Messsystems handelt es sich um Grauwertbilder B einer vordefinierten Auflösung, die im Samplingabstand ausgegeben werden[1]:

[1] Der Grauwert eines Pixels $T \in \mathbb{R}$ entspricht der nach Anhang A.2 abgeleiteten Temperatur. Ein Bild lässt sich formal darstellen als Abbildung $B : \mathbb{N}_0^2 \mapsto \mathbb{R}^c$, wobei c die Anzahl der Farbkanäle angibt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen Kanal (Temperaturwert), die Dimension des Einzelbildes beträgt daher eins.

$B \in \mathcal{B} \subseteq \mathbb{R}^{w \times h}$. Dabei stehen w und h für die Breite bzw. Höhe des Ursprungsbildes (in Pixel).

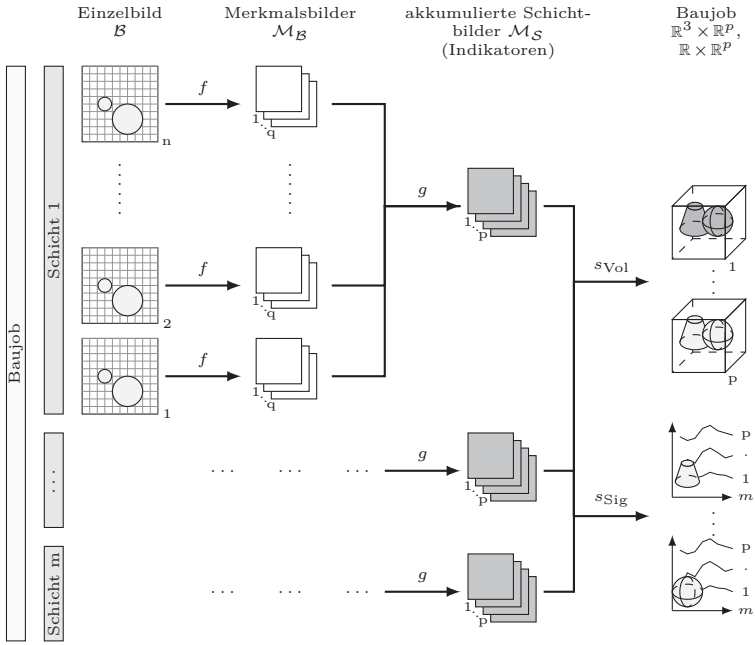


Abbildung 6.2: Methode zur Schichtüberwachung

Schritt 1 Im ersten Schritt wird aus einem Einzelbild B durch Methoden der Bild- und Signalverarbeitung ein Merkmalsvektor $\overrightarrow{m_B} \in \mathcal{M}_B \subseteq \mathbb{R}^{w \times h \times q}$ erzeugt. Es handelt sich dabei um q Merkmale, die jeweils als Einzelbilder die Merkmalswerte in ortsaufgelöster Form enthalten (Merkmalsbilder). Ohne Beschränkung der Allgemeinheit werden sie durch eine reelle Zahl quantifiziert und sind beispielsweise durch die aktuelle Temperatur, deren Ortsableitung oder statistische Größen gegeben.

Je nach Merkmal erfolgt die Zuordnung der Merkmalswerte $m_B \in \mathbb{R}$ zu einem festen oder einem merkmalsspezifischen Ort im Einzelbild (Orts-Mapping). Wird beispielsweise der Temperaturgradient an der Stelle (x_0, y_0) im Ursprungsbild betrachtet, erfolgt die Zuordnung an die gleiche Stelle im Merkmalsbild $m_B(x_0, y_0) =: |grad(B)|_{(x_0,y_0)}$. Liegt das Interesse an dem bauteilspezifischen Mittelwert der Temperatur, erfolgt die Zuordnung zu dem gesamten Bauteil-

bereich $C \subseteq B$ mit $m_B(x,y) := \langle T \rangle_{x,y} \forall (x,y) \in C$. Die abbildende Funktion f kann wie folgt dargestellt werden:

$$f : \mathcal{B} \to \mathcal{M}_\mathcal{B}, \quad B \in \mathbb{R}^{w \times h} \mapsto M_B \in \mathbb{R}^{w \times h \times q} \tag{6.1}$$

Die Frage nach den konkret zu überwachenden Merkmalen ist anwendungs- bzw. sensorspezifisch und wird in Abschnitt 6.5 beantwortet.

Schritt 2 Im zweiten Schritt werden die Merkmalsräume $\mathcal{M}_{B_i}$, $i = 1 \ldots n$ aller n Einzelbilder, die zu einer Schicht im SLM-Prozess gehören, zu einem Schichtmerkmalsraum $\mathcal{M}_S^*$ zusammengefasst:

$$\mathcal{M}_S^* = \mathcal{M}_{B_1} \times \mathcal{M}_{B_2} \times \cdots \times \mathcal{M}_{B_n} \tag{6.2}$$

Anschließend erfolgt durch die Funktion g die Abbildung der gesammelten, zeitlich geordneten Merkmalsbilder einer Schicht auf ein akkumuliertes Schichtbild $M_S \in \mathcal{M}_S$. Die Dimension wird dabei um eins reduziert. Die Abbildung g berücksichtigt somit den zeitlichen Verlauf einzelner Merkmale, um daraus schichtweise p Indikatoren zu generieren. Diese Indikatoren können dabei von statistischer Natur sein (z. B. zeitliches Mittel einer Schicht), auf Basis von Modellen gewonnen werden (z. B. effektive Temperaturleitfähigkeit) oder durch andere mathematische Operationen abgeleitet werden (z. B. Integration eines Merkmals über die Schichtzeit):

$$g : \mathcal{M}_\mathcal{S}^* \to \mathcal{M}_S \qquad , M_S^* \in \mathbb{R}^{w \times h \times q \times n} \mapsto M_S \in \mathbb{R}^{w \times h \times p} \tag{6.3}$$

Schritt 3 Im dritten und letzten Schritt werden die Merkmalsräume aller m akkumulierten Schichtbilder in einem Baujob-Indikatorraum $\mathcal{M}_{BJ}$ zusammengefasst:

$$\mathcal{M}_{BJ} = \mathcal{M}_{S_1} \times \mathcal{M}_{S_2} \times \cdots \times \mathcal{M}_{S_m} \tag{6.4}$$

Bei den Elementen dieser Menge handelt es sich im Wesentlichen um Bildstapel aus den akkumulierten Schichtbildern. Eine Zuordnung der Indikatoren zu den hergestellten Bauteilen aus der Menge $\mathcal{C} \subset \mathbb{R}^3$ erfolgt schließlich durch die (bauteilspezifische) Funktionen s, die je nach geforderter Darstellung bzw. Ausgabeform unterschiedlich geartet sein kann[2]:

$$\begin{aligned} s_{\text{Vol}} &: \mathcal{M}_{\mathcal{BJ}} \to \mathcal{C} \times \mathbb{R}^p \\ s_{\text{Sig,j}} &: \mathcal{M}_{\mathcal{BJ}} \to \mathbb{R} \times \mathbb{R}^p \end{aligned} \tag{6.5}$$

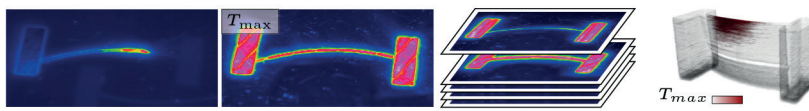
s_{Vol} beschreibt den tomografischen Ansatz, indem jedem Volumenelement ΔV eines Bauteils an der Position $(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$ mehrere Indikatoren $I \in \mathbb{R}$

[2]Eine schichtweise Bauteilzuordnung kann, je nach Merkmal, bereits in Schritt 1 notwendig sein. Die Gesamtzuordnung in Schritt 3 wird dadurch nicht beeinflusst.

(Anzahl p) zugeordnet werden. Mittels $s_{Sig,j}$ werden die Indikatoren einer Schicht (Schichtindex j) über die jeweiligen Bauteile gemittelt, um sie als konventionelles Signal über den Zeitverlauf[3] ausgeben zu können und sie im Rahmen einer bauteil- und schichtweisen Prozessregelung (z. B. mittels Prozessregelkarte) nutzbar zu machen.

Im Gegensatz zu einer auf Einzelbildern gründenden Prozessüberwachung für kontinuierliche Prozesse basiert die Ableitung von potenziell qualitätsrelevanten Indikatoren in diesem Ansatz auf den gesammelten Informationen einer Schicht. Die Merkmalsextraktion bezieht sich dabei auf den gesamten Überwachungsbereich sowie die gesamte Schichtzeit $(t_{j,start}, ..., t_{j,end})$ und wird zusammenfassend in Gleichung 6.6 dargestellt:

$$\vec{I}(x_0, y_0)_j = \begin{pmatrix} I_1(x_0, y_0)_j \\ \vdots \\ I_p(x_0, y_0)_j \end{pmatrix} = \vec{f}\,(T(x, y, t)) \quad \begin{matrix} x \in [0, w] \\ x \in [0, h] \\ t \in [t_{j,\mathrm{start}}, t_{j,\mathrm{ende}}] \end{matrix} \tag{6.6}$$



Einzelbild B (Temperatur) | akkumuliertes Schichtbild (f, g) M_S | Bildstapel Schichten $1 \ldots m$ | Tomografie (Indikator=T_{max})

Abbildung 6.3: Abfolge bei der Schichtüberwachung

In diesem schichtweisen Ansatz wird das Datenvolumen für einen Indikator um das Verhältnis der Samplingzeit zur Schichtzeit reduziert, da nur ein Einzelbild pro Indikator und Schicht gespeichert wird (vgl. Abbildung 6.3).

6.2.3 Indikatorbewertung und -reduktion

Nachdem schichtweise Indikatoren zur Verfügung stehen, muss deren prinzipielle Eignung als Qualitätsindikatoren überprüft werden. Indikatoren, die bei einer Variation von qualitätsrelevanten Parametern (vgl. Kapitel 4) konstant bleiben, tragen keine Information über die Abweichung des Prozesses von seinem Sollzustand und werden daher verworfen. Des Weiteren beinhaltet ein Indikator, der mit einem anderen zu 100 % korreliert, keine Mehrinformation über den vorliegenden Zustand. Es kann daher ohne Informationsverlust eine Reduktion um Indikatoren dieser Art stattfinden. Gemessen wird die Korrelation dabei anhand eines Korrelationskoeffizienten, der den Grad des linearen Zusammenhangs zweier oder mehrerer Größen angibt. Dieser Zusammenhang wird jedoch rein statistisch bewertet, sodass einer hohen Korrelation

[3] entspricht hier den physikalischen Einzelschichten

nicht notwendigerweise eine eindeutige Ursache-Wirkungs-Beziehung zugrunde liegt.

Für die Bewertung der Indikatoren werden zwei Betrachtungsräume unterschieden: Die SWA wird für eine globale Aussage über die zu erwartende Qualität einer Schicht bzw. eines Bauteils genutzt. Die Indikatoren werden entsprechend gemittelt und dienen als Grundlage für die Vergleichbarkeit additiv hergestellter Bauteile (s_{Sig}). Demgegenüber dient die SAA der Erkennung lokalisierter Fehler und Unregelmäßigkeiten, die aus kurzzeitigen Abweichungen des Prozesses von seinem Sollzustand entstehen oder geometriebedingte Ursachen haben (s_{Vol}).

SWA Aus Prozessanalysen in Form von Versuchsplanungen und Einzeluntersuchungen sowie Werkstoffprüfungen liegt im Regelfall eine Wissensdatenbank vor, die die Prozessparameter P_i (unabhängige Variablen) mit Qualitätsmerkmalen Q_i (abhängige Größen) in Beziehung setzt (z. B. in Form von Regressionsmodellen $\vec{Q} = \vec{r}(\vec{P})$ oder Korrelationskoeffizienten). Für eine Qualitätsüberwachung steht, im Gegensatz zu einer vollfaktoriellen Prozessanalyse, die Erkennung von Abweichungen vom Sollprozess und deren Auswirkung auf die Qualitätsmerkmale im Vordergrund. Eine wesentliche Bedeutung kommt hierbei dem Zentralpunkt in dem Versuchsraum zu, der die Grundkonfiguration des Prozesses bzw. den Sollprozess mit der Parametereinstellung $\vec{P} = (\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_3, \ldots, \hat{P}_n)$ repräsentiert.

Inwiefern sich die Indikatoren eignen, Abweichungen von diesem Sollprozess zu detektieren, wird durch getrennte Variationen der Prozessparameter, ausgehend von dem Zentralpunkt, untersucht. Die Bewertung bezieht sich auf folgende Kriterien:

- Bestimmtheitsmaß R^2: Durch Regression wird bestimmt, wie gut die gemessenen Indikatoren durch Prozessparametervariationen beschrieben werden können. Abhängig von der Irrtumswahrscheinlichkeit, mit der sich eine Prozessvariation in einer Änderung des jeweiligen Indikators wiederfindet, wird ein lineares[4] bzw. ein quadratisches Modell zugrunde gelegt.
- Signal-Rausch-Verhältnis (SNR): Aus dem Verhältnis des mittleren Signalwertes einer Probe zu der Standardabweichung wird die Signalqualität bewertet. Für einen robusten Einsatz und reproduzierbare Messwerte sind hohe SNR-Werte notwendig.
- Detektionsgrenze $\Delta p_{\min}$: Die Auflösungsgrenze eines Indikators bzgl. der Variation eines Prozessparameters wird aus dem Rauschverhalten und der Steigung des Regressionsmodells am Zentralpunkt bestimmt (vgl.

[4] Für ein lineares Modell entspricht das Bestimmtheitsmaß dem quadrierten Korrelationskoeffizienten.

Anhang A.5.1). Sie charakterisiert die Sensitivität des Indikators und sollte möglichst gering sein.

Aus der Detektionsgrenze eines Parameters kann mithilfe der Wissensdatenbank unmittelbar auf die minimal zu erwartende Qualitätsabweichung geschlossen werden[5]. Da es sich bei den Indikatoren $\vec{I}$ und Qualitätsmerkmalen $\vec{Q}$ jeweils um abhängige Messgrößen handelt, wird deren Zusammenhang anhand ihrer Korrelation bewertet. Inwiefern sich die Indikatoren dann eignen, die resultierende Qualität direkt zu bemessen, so dass sie als Qualitätsindikatoren fungieren können, muss anhand der Korrelationskoeffizienten c_{iq} beurteilt werden.

SAA Lokalisierte, oberflächennahe Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten zeichnen sich sowohl durch eine veränderte Wärmeleitung als auch durch veränderte Temperaturniveaus aus. Je nach Fehlergröße und -form, Oberflächenbeschaffenheit und Entfernung zur messtechnisch erfassten Oberfläche variiert deren Erkennbarkeit. In Krauss et al. (2012) wurde gezeigt, dass sich unter idealisierten Bedingungen die Differenz der Abkühlkurve zu einer Referenzkurve als Detektionssignal für lokale Fehler eignet. Eine allgemeingültige Referenzkurve ist jedoch aufgrund der geometrie-, oberflächen- und parameterbedingten Einflüsse in einem schichtweisen Ansatz nicht praktikabel (vgl. Unterabschnitt 6.4.1). Für die SAA werden die Indikatoren daher bzgl. ihrer lokalen Umgebung mithilfe der *Probability of Detection* (POD) untersucht. Eine Bewertung und Priorisierung erfolgt anschließend mithilfe des sog. $a_{90/95}$-Wertes, der die minimal detektierbare Fehlergröße bei einem festgelegten Vertrauensbereich charakterisiert. Sie setzt die Indikatoren mit den Fehlerbildern/Qualitätsmerkmalen in Beziehung und ist analog zu der Korrelation im SWA-Fall zu verstehen.

6.2.4 Anwendung und Klassifikation

Die Anwendung der schichtweisen Überwachung erfolgt nach dem in Abbildung 6.4 dargestellten Prinzip. Neben den Indikatoren und deren Bewertung hinsichtlich Signalqualität und Korrelation zu Qualitätsmerkmalen (Kennzahlensystem) gehen auch nutzerspezifische Anforderungen ein.

Es lassen sich mindestens folgende Szenarien unterscheiden:

- Schichtweise Überwachung durch eine gewichtete Kennzahl (SWA)
- Schichtweise Überwachung aller Indikatoren im Rahmen einer multivariaten Qualitätsregelkarte (SWA)
- Erkennung lokaler Fehler durch einzelne Indikatoren (SAA)
- Erkennung lokaler Fehler durch Gewichtung aller Indikatoren (SAA)

[5] Bezogen auf die Variation des jeweils untersuchten Prozessparameters.

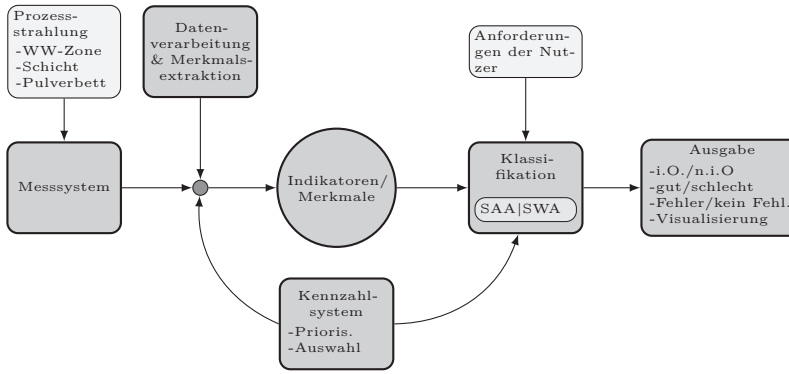


Abbildung 6.4: Anwendung einer schichtweisen Prozessüberwachung

In dem ersten Fall wird aus allen zur Verfügung stehenden Indikatoren eine Kennzahl K_Q pro Schicht ermittelt. Diese setzt Soll- und Ist-Werte der Indikatoren zueinander ins Verhältnis und berücksichtigt die Signaleigenschaften der Indikatoren, die nutzerspezifische Priorisierungen von Qualitätsmerkmalen und die Abhängigkeiten von Indikatoren zu Qualitätsmerkmalen (vgl. Gleichung 6.7)[6]:

$$K_Q = \sum_{i,q} \langle \hat{a}_i \rangle_P \; \hat{c}_{iq} \, \hat{q}_q \, \frac{\|I_i - I_{i0}\|}{I_{i0}} \tag{6.7}$$

I_i, I_{i0} : Ist-, Sollwert Indikator i, $\hat{a}_i$: Gewichtungsfaktor Signalqualität, $\hat{c}_{iq}$: Korrelationskoeffizienten Indikator i und Qualitätsmerkmal q, $\hat{q}_q$: anwenderspezifische Gewichtung von Qualitätsmerkmal q, $\langle \rangle_P$: Mittelung über Parameterraum

Die Kennzahl K_Q dient dem direkten, schichtweisen Vergleich mit historischen Daten oder anderen Prozessläufen. Weicht der vorliegende Prozess beispielsweise nicht von dem theoretischen Soll-Prozess ab, so beträgt die Kennzahl $K_Q = 0$. Die Bewertungsergebnisse einzelner Indikatoren werden in der Kennzahl über den Gewichtungsfaktor $\hat{a}_i = f(R^2, \mathrm{SNR}, \Delta p_{min})$ berücksichtigt und über den untersuchten Parameterraum gemittelt (vgl. Unterabschnitt 6.2.3).

In dem zweiten Fall werden die Indikatoren einzeln im Rahmen einer multivariaten Qualitätsregelkarte weiterverarbeitet (z. B. T^2-Hotelling). Über ein definiertes Distanzmaß können die Indikatoren statistisch ausgewertet werden, um Warn- und Eingriffsgrenzen festzulegen.

Bei der schichtaufgelösten Auswertung (SAA) werden im Vergleich zur schichtweisen Auswertung die Signaleigenschaften der Indikatoren bereits durch die minimal auflösbare Fehlergröße $a_{90/95}$ berücksichtigt. Die Identifikation eines

[6] Bei den mit (ˆ)-markierten Größen handelt es sich um normierte, positiv reelle Zahlen, die aus den entsprechenden Grundgrößen abgeleitet werden.

lokalisierten Fehlers erfolgt anhand von Soll-Ist-Vergleichen der lokalen Indikatorwerte. Ist ein bestimmtes Fehlerbild von Interesse, wird der Indikator mit dem geringsten $a_{90/95}$-Wert bzgl. dieses Fehlerbildes verwendet. Ist dagegen die Identifikation des vorliegenden Fehlerbildes von Interesse, werden alle Indikatoren bzgl. ihrer Auflösungsgrenzen gewichtet[7]. Die Kennzahl K_f kann dann als Prioritätswert verstanden werden, mit dem das Fehlerbild f vorliegt:

$$\overline{K_f} = \sum_i \hat{b}_{iq} \frac{\|I_i - I_{i0}\|}{I_{i0}} \tag{6.8}$$

I_i, I_{i0} : Ist-, Sollwert Indikator i, $\hat{b}_{iq}$: normierte Detektionsgrenze für Indikator i und Qualitätsmerkmal/Fehlerbild q

Die hier diskutierten Größen (Indikatoren, Qualitätsmerkmale/Fehlerbilder, Korrelationen und Auflösungsgrenzen) lassen sich tabellarisch in einem Kennzahlensystem zusammenfassen (vgl. Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Übersicht zur Bewertung der Indikatoren in einem Kennzahlensystem (Priorisierung der Qualitätsmerkmale $\hat{q}_q$ nicht explizit dargestellt)

Indikator	SWA (Qualitätsmerkmale)					SAA (Fehlerbilder)			
	Signal-bewertung	Korrelation $I \leftrightarrow Q$				Auflösungsgrenze $a_{90/95}$ $I \leftrightarrow Q$			
I_1	$\langle \hat{a}_1 \rangle_P$	$\hat{c}_{11}$	$\hat{c}_{12}$	…	$\hat{c}_{1n}$	$\hat{b}_{11}$	$\hat{b}_{12}$	…	$\hat{b}_{1m}$
I_2	$\langle \hat{a}_2 \rangle_P$	$\hat{c}_{21}$	$\hat{c}_{22}$	…	$\hat{c}_{2n}$	$\hat{b}_{21}$	$\hat{b}_{22}$	…	$\hat{b}_{2m}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
I_p	$\langle \hat{a}_p \rangle_P$	$\hat{c}_{p1}$	$\hat{c}_{p2}$	…	$\hat{c}_{pn}$	$\hat{b}_{p1}$	$\hat{b}_{p2}$	…	$\hat{b}_{pm}$
Kennzahl		$\rightarrow K_Q$				K_1	K_2	…	K_m

Klassifikation Unabhängig von den Betrachtungsräumen erfolgt eine abschließende Klassifikation der ermittelten Daten durch einen Schwellwertvergleich (Toleranzbandverfahren, feste Schwelle, variable Schwelle o. ä.). Die Grenzen sind anwendungsspezifisch und in Abhängigkeit des Vertrauensbereichs bzw. des Stichprobenumfangs festzulegen. Im Rahmen der Arbeit erfolgt aus diesem Grund keine Festlegung von Schwellwerten bzw. Grenzen und es wird stattdessen auf weiterführende Literatur verwiesen (vgl. E. Dietrich et al. (2007)).

Das Über- bzw. Unterschreiten der Schwellen wird in fortgeschrittenen Verfahren bzgl. der Häufigkeit und Verteilung analysiert, um Fehlalarme zu

[7] Es wird implizit angenommen, dass die Indikatorwerte mit der Fehlergröße skalieren.

minimieren bzw. um Grenzen anzupassen (vgl. Wiesemann (2004)). Unabhängig davon ist die Festsetzung der Schwellwerte immer ein Kompromiss zwischen maximaler Erkennungssicherheit und minimaler Fehlalarmrate bei reduzierter Erkennungssicherheit. Der Schwellwertvergleich stellt nur eine Möglichkeit dar, eine Klassifikation, in diesem Fall „i.O./n.i.O." bzw. „vorhanden/nicht vorhanden", herbeizuführen. Für eine Einteilung der gemessenen Merkmale in mehrere interessierende Klassen (z. B. Qualitätsstufen, Fehlerbilder) können weitere Klassifikatoren z. B. in Form von neuronalen Netzen oder statistische Methoden eingesetzt werden.

6.3 Bildung von Indikatoren

In Abschnitt 6.2 wurde ein allgemeines Vorgehen zur Umsetzung und Anwendung eines schichtweisen Überwachungssystems vorgestellt. Nachfolgend sollen für den Fall der thermografischen Überwachung Indikatoren abgeleitet und in Abschnitt 6.4 analysiert werden. Für die konkrete Umsetzung der schichtweisen Überwachung sind darüber hinaus Module zur Verarbeitung von Anlagenzustandsdaten, Baujobkonfigurationsdaten sowie Geometrie- und Sensordaten notwendig. Ein Überblick über die konkrete Funktionsweise des Systems ist in Anhang A.5.3 zu finden.

6.3.1 Einteilung

Die Bildung von Indikatoren basiert auf dem in Abschnitt 6.2 vorgestellten Prinzip. Eine wesentliche Unterscheidung der Indikatoren ist anhand der zugrunde liegenden Orts- bzw. Zeitauswahl gegeben, die über die beiden Abbildungen f und g realisiert wird. Die Ortsauswahl (Region of Interest) erfolgt auf Basis der thermischen Informationen aus dem Prozess und der zugrunde liegenden Geometriedaten zwischen räumlich festen und räumlich variablen Größen.

Die aktuelle Prozesszone ist beispielsweise räumlich variabel, die Position einzelner Bauteile bzw. Bauteilbereiche dagegen räumlich fest. Für den in Unterabschnitt 6.2.2 diskutierten SWA-Ansatz wird unabhängig von der Orts- und Zeitauswahl die Statistik der Indikatoren schichtweise über den jeweiligen Bauteilquerschnitt betrachtet. Größen, die auf einer variablen Ortsauswahl basieren, müssen einem Bauteil demnach schon im Vorfeld zugeordnet werden (vgl. Spritzeraktivität ISA).

Hinsichtlich der Zeitauswahl können die Indikatoren bzw. deren Datengrundlagen nach Momentaufnahmen (Einzelbilder) und nach Bildfolgen unterschieden werden. Die Analyse des Beschichtungsergebnisses basiert beispielsweise auf einem Einzelbild nach dem Schichtauftrag, während für die Bestimmung der Maximaltemperatur eine Bildfolge betrachtet werden muss. Tabelle 6.2 zeigt

einen Überblick von möglichen Indikatoren. Nachfolgend wird eine Auswahl davon diskutiert.

Tabelle 6.2: Indikatoren für die thermografische Schichtüberwachung und Klasseneinteilung

Bereich	Orts-auswahl	Zeit-auswahl	Merkmal/Indikator
Ver-festigung	fest	Einzelbild	verfestigte Fläche, Flächenabweichung, Bauteiltemperatur
		Bildfolge	max. Temperatur, Zeit über Schwelle, Zeitintegral, effektive Temperaturleitfähigkeit
	variabel	Einzelbild Bildfolge	geometrische Ausprägung des WEB Spritzeraktivität, Spritzerintensität
Schicht-auftrag	fest	Einzelbild Bildfolge	lokale Pulvertemperatur lokale Schichtdicke
	variabel	Einzelbild Bildfolge	Fehlerflächenanteil Unregelmäßigkeit der Beschichterfahrt

6.3.2 Indikatoren für die Verfestigung

Verfestigte Fläche (IVF) Dieser Indikator dient der Überwachung, ob ein Flächenelement im Prozess verfestigt wurde. Die Prüfung erfolgt pixelweise anhand der Überschreitung einer Temperaturschwelle T_S (vgl. Gleichung 6.9). Die Schwelle wird dabei unter folgenden Randbedingungen gewählt:

- T_S liegt im Messbereich des Messsystems[8] und gilt für beide Werkstoffzustände (pulverförmig, fest)
- Die Dauer, über die T_S überschritten wird, ist länger als das Samplingintervall, um die Temperaturschwelle sicher erfassen zu können:

$$\mathrm{IVF} = \begin{cases} 1 & : T > T_S \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} \qquad [-] \tag{6.9}$$

Alternativ lässt sich die verfestigte Fläche aus einer (bildweisen) Kantenextraktion, gefolgt von morphologischen Bildoperationen, bestimmen. Die Grauwerte (scheinbare Temperaturen) von verfestigter und nicht-verfestigter Fläche müssen sich hierbei unterscheiden.

[8] Der Schmelzpunkt kann messtechnisch hier nicht erfasst werden (vgl. Anhang A.2). Es wird implizit davon ausgegangen, dass beim Überschreiten der gewählten Schwelle auch der Schmelzpunkt überschritten wird.

Flächenabweichung (IFA) Dieser Indikator dient der Überwachung der Form- und Maßhaltigkeit auf Schichtebene und damit indirekt der Erkennung von Verzügen bzw. Delaminationen während des Prozesses. Es werden die Abweichungen zwischen Soll- und Istkontur nach folgendem Vorgehen kumuliert und normiert (vgl. Abbildung 6.5):

- Bestimmung der Differenzfläche von Soll-Bereich A_{Soll} und verfestigtem Ist-Bereich A_{Ist},
- Differenztransformation (DT)[9] zur Gewichtung der Abweichungen,
- Summation der Abweichungen über Bauteilbereich und Normierung.

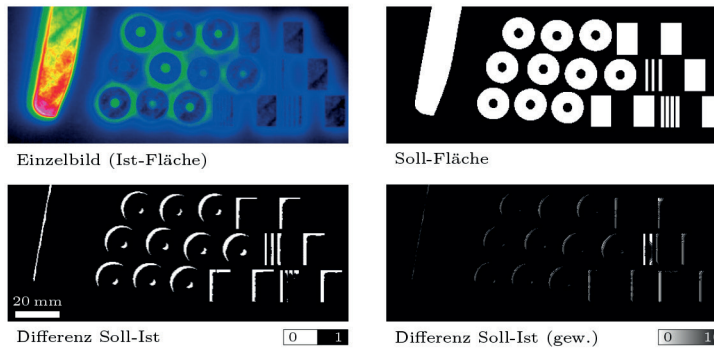


Abbildung 6.5: Bestimmung der Flächenabweichung

Der Indikator (vgl. Gleichung 6.10) stellt eine gewichtete Größe im Wertebereich $[0, \infty[$ dar:

$$\mathrm{IFA} = \frac{\sum_{p \in A_{\mathrm{Soll}}} DT\left((A_{\mathrm{Soll}} - A_{\mathrm{Ist}}) \cup \overline{A_{\mathrm{Soll}}}\right)}{A_{\mathrm{Soll}}} \qquad [-] \qquad (6.10)$$

Die thermografische Überwachung eignet sich aufgrund der realisierbaren Auflösungen nicht direkt zur Prüfung der Geometrie und der Maßhaltigkeit nach DIN ISO 2768-1 (vgl. Anhang A.2, VDI 3405-2). Mit dem Indikator IFA kann jedoch eine schichtweise Vollständigkeitsprüfung bzw. Positionskontrolle vorgenommen werden.

Max. Temperatur (IMA), Zeit über Schwelle (IZU), Zeitintegral (IIN) Die Indikatoren Maximaltemperatur, Zeit über Schwelle und Zeitintegral werden über den gesamten Zeitbereich der Verfestigung bzw. Abkühlung einer

[9] Die DT berechnet den Abstand eines Pixels zu dem nächsten Null-Pixel.

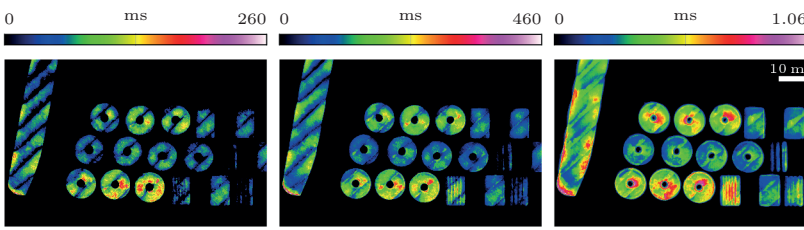
Schicht gebildet ($t_i \in [t_{j,start}, t_{j,ende}]$). Sie dienen der Erkennung von Überhitzungen und Wärmestauungen bzw. Veränderungen des Energieeintrags:

$$\begin{aligned} \text{IMA} &= \max_{t_i} T(t_i) && [K] \\ \text{IZU} &= \sum_{\{t_i : T(t_i) \geq T_S\}} \Delta t_s && [\text{s}] \\ \text{IIN} &= \sum_{\{t_i : T(t_i) \geq T_S\}} T(t_i) && [\text{Ks}] \end{aligned} \tag{6.11}$$

t_i : diskrete Zeitschritte, Δt_s : Samplingzeit

Die Schwelle T_S kann werkstoffabhängig gewählt werden, um Umwandlungstemperaturen, Festigkeitsgrenzen etc. zu berücksichtigen. Daneben sind jedoch die Randbedingungen des Messsystems hinsichtlich Samplingrate sowie Orts- und Zeitauflösung zu beachten. Folgende Schwellen werden für IN 718 betrachtet:

- $T_S = 650\,^{\circ}\text{C}$: Maximale Einsatztemperatur des Werkstoffs (Renhof 2007) - Über dieser Schwelle sind Änderungen der Festigkeitseigenschaften mit potenziellem Einfluss auf das verbleibende Eigenspannungsniveau zu erwarten.
- $T_S = 550\,^{\circ}\text{C}$: Hatch-Temperatur - messtechnisch zugängliche Temperaturschwelle, bei der benachbarte Scanfelder (Streifen) weitgehend keinen Einfluss auf die Indikatoren haben, da der erneute Temperaturanstieg unterhalb der Schwelle liegt.
- $T_S = 400\,^{\circ}\text{C}$: Streifentemperatur - messtechnisch zugängliche Temperaturschwelle, bei der die Streifenzyklierung (vgl. Abschnitt 5.3) in den Indikator eingeht.



(a) $T_S = 650\,^{\circ}\text{C}$ **(b)** $T_S = 550\,^{\circ}\text{C}$ **(c)** $T_S = 400\,^{\circ}\text{C}$

Abbildung 6.6: Zeit über Schwelle (IZU) für unterschiedliche Schwellwerte. Die wiederholte Aufheizung des Überlappbereichs führt bei geringen Schwellwerten zu einem Anstieg des Indikators im Überlappbereich.

Nach Abschnitt 2.3 ist bei den vorherrschenden Abkühlzeiten für Iconel 718 nicht mit einer signifikanten Ausscheidung der festigkeitssteigernden Pha-

sen γ', γ'' zu rechnen, weshalb keine Umwandlungstemperaturen überwacht werden. Anhand der Indikatoren IZU und IMA kann jedoch indirekt auf verbleibende Eigenspannungen geschlossen werden, da nach HOFFMEISTER (2010) für Temperaturen $T > 0,5 \cdot T_{Solidus} \approx 500\,°\mathrm{C}$ Makroeigenspannungen aufgrund von Rekristallisationsprozessen abgebaut werden. Mit zunehmender Verweilzeit oberhalb einer Schwelle kann demnach von einem geringeren Eigenspannungsniveau ausgegangen werden.

Effektive Temperaturleitfähigkeit (ITL) Dieser Indikator wird modellbasiert abgeleitet (vgl. Unterabschnitt 5.2.2.1) und charakterisiert lokal veränderte Werkstoffeigenschaften bzw. geometrisch bedingte Wärmestauungen. In die analytische Bestimmung gehen nach Gleichung 6.12 die nominellen Belichtungsparameter ein. Es handelt sich um einen Effektivwert, der systematische Abweichungen zu der Materialkonstanten aufweisen kann (z. B. wenn die Modellparameter von den nominellen Verfestigungsparametern abweichen oder die Wärmeleitung geometrisch bedingt verzögert ist):

$$a_{\mathrm{eff}}(t) \approx \frac{1}{t} \left(\frac{1}{T(t) - T_0} \right)^2 \left(\frac{k^* P \alpha}{V d c_p \rho \sqrt{\pi}} \right)^2 \tag{6.12}$$
$$\mathrm{ITL} = \langle a_{\mathrm{eff}} \rangle_t \qquad [m^2/\mathrm{s}]$$

Abbildung 6.7 veranschaulicht die Bestimmung der effektiven Temperaturleitfähigkeit für eine Würfelprobe. Aufgrund veränderlicher Materialeigenschaften

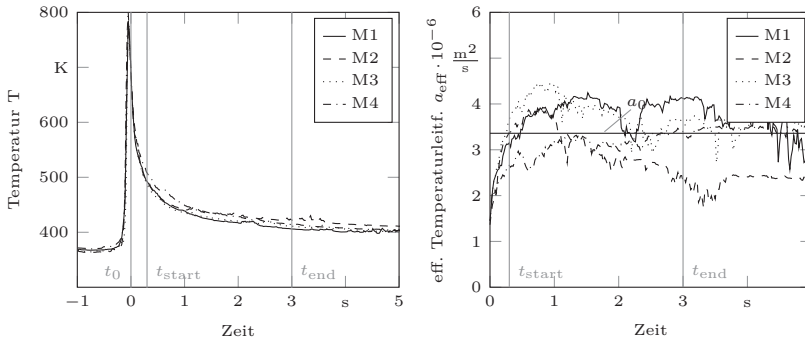


Abbildung 6.7: Links: Abkühlkurven für unterschiedliche Messpunkte (M1-M4); rechts: abgeleitete Temperaturleitfähigkeit während des Abkühlvorgangs. Unmittelbar nach der Belichtung ist die Atmosphäre oberhalb der Prozesszone aufgeheizt, was sich auf die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit auswirkt.

und variierender Messbedingungen[10] unmittelbar nach dem Energieeintrag ist die bestimmte effektive Temperaturleitfähigkeit nicht konstant. Die Wurzelabhängigkeit nach Gleichung 5.9 führt zu einer Erhöhung der Messunsicherheiten, sodass für die Indikatorbildung über einen Bereich von wenigen Sekunden nach der Belichtung gemittelt wird.

Für die Erkennung oberflächennaher, lokalisierter Fehlstellen muss der Zeitbereich für die Mittelung möglichst kurz nach dem Energieeintrag gewählt werden, um das Maximum des Fehlerkontrastes zu erfassen (vgl. Sackewitz (2011)). Auf der anderen Seite wirken sich nach der Belichtung, wenn der prozessierte Bereich auf Umgebungstemperatur abgekühlt ist, die Messunsicherheiten deutlich aus. Für die Indikatoranalyse in Abschnitt 6.4 werden daher unterschiedliche Zeitbereiche für die Bestimmung der effektiven Temperaturleitfähigkeit betrachtet (kurz: 0 s bis 1 s, mittel 0,1 s bis 3 s, lang 0,1 s bis 10 s).

Geometrische Ausprägung des Wärmeeinflussbereichs Die geometrische Charakterisierung des WEB dient der Überwachung des Energieeintrags (Laserleistung, Scanvektorlänge etc.) und der Wärmeableitung. Der WEB wird als der Teilbereich einer Schicht definiert, in dem die Verfestigung zum aktuellen Zeitpunkt stattfindet und der sich auf einem erhöhten Temperaturniveau befindet. Er ist zu unterscheiden von der vom Schweißen bekannten WEZ, die den Bereich angibt, in dem sich Gefügeänderungen ausprägen. Im Gegensatz zum Schweißen treten beim SLM an jeder verfestigten Stelle bzw. im gesamten Bauteil Gefügeänderungen auf.

Auf Basis einer Schwellwertbildung und einer nachfolgenden Blob-Analyse[11] werden bildweise die Indikatoren Fläche (IWA), Umfang (IWU), Aspektverhältnis (IWV) und Integral (IWI) des WEB bestimmt:

$$\begin{aligned}
\mathrm{IWA} &= \sum_{\{p \in B : T(p) > T_S\}} 1 && [\mathrm{px}^2] \\
\mathrm{IWU} &= \sum_{\{p \in \partial_{WEB}\}} 1 && [\mathrm{px}] \\
\mathrm{IWV} &= \frac{a_{WEB}}{b_{WEB}} && [-] \\
\mathrm{IWI} &= \sum_{\{p \in B : T(p) > T_S\}} T(p) && [\mathrm{px}^2 \cdot \mathrm{K}] \\
\mathrm{IWH} &= \mathrm{Hu}_{1..7}(\{p \in B : T(p) > T_S\}) && [-]
\end{aligned} \tag{6.13}$$

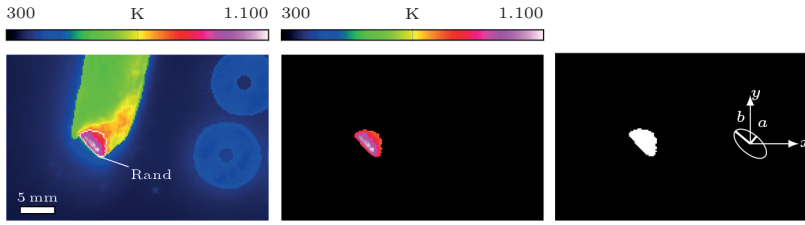
p : Pixel, B : Bild, a_{WE}, b_{WE}: Große und kleine Halbachse einer angenäherten Ellipse, $Hu_{1..7}$: Hu-Momente nach Ming-Kuei Hu (1962)

[10] z. B. heiße Gasschichten über der Prozesszone

[11] Methode der Bildverarbeitung zur Bestimmung geometrischer Eigenschaften von segmentierten Partikeln.

Für eine allgemeine Beschreibung der geometrischen Form werden zudem die sog. Hu-Momente (IWH) herangezogen. Sie ergeben sich auf Basis der zentralen Bildmomente und sind invariant unter Translation, Rotation und Skalierung und damit unabhängig von der Orientierung bzw. Bewegungsrichtung des WEB.

Die Schwelle T_S wird analog zu Gleichung 6.9 definiert. Abbildung 6.8 veranschaulicht einzelne Parameter zur geometrischen Charakterisierung des WEB.



(a) Umfangsbestimmung des WEB **(b)** Integralbestimmung des WEB **(c)** Fläche und Aspektverhältnis

Abbildung 6.8: Geometrische Charakterisierung des WEB: Umfang entspricht der Länge einer Isotherme, Aspektverhältnis aus einer elliptischen Formnäherung

Spritzeraktivität (ISA) Spritzer sind heiße Schmelzbadaustriebe, die aufgrund von sich schnell ändernden Randbedingungen der Energieabsorption und Wärmeableitung explosionsartig entstehen (vgl. Kapitel 2).

Die Spritzeraktivität kann anhand der Anzahl, Größe oder Geschwindigkeitsverteilung der Schmelzbadaustriebe charakterisiert werden und stellt eine indirekte Messgröße der vorherrschenden Prozessdynamik bzw. Prozessstabilität dar. Thermografisch sind die Spritzer durch ihre erhöhte Temperatur gegenüber dem Hintergrund identifizierbar, da sie während des Fluges langsam abkühlen und nur durch Wärmestrahlung Energie abgeben.

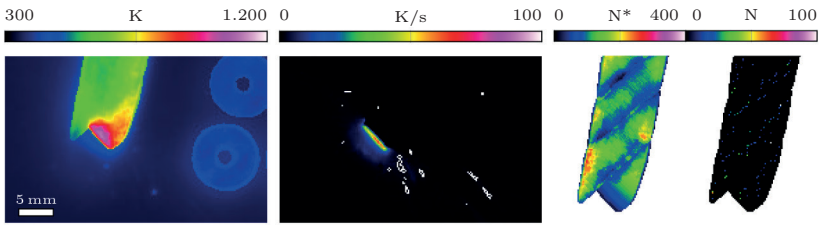
Im vorliegenden Fall misst der Indikator ISA die Anzahl der bewegten Spritzerpartikel nach folgendem Vorgehen (vgl. Abbildung 6.9):

- Zeitableitung der Rohdaten (unkorrigierte Temperaturwerte T^*),
- Schwellwertbildung zur Identifikation bewegter Partikel,
- Partikelerkennung mit Größenfilterung und Zählung.

Es gilt:

$$P = \left\{ p^* \in B : \frac{\mathrm{d}T^*}{\mathrm{d}t}|_p > S_1 \right\}$$
$$\mathrm{ISA} = \sum_{\{P \in I:\, A_{\min} \leq A(P) \leq A_{\max}\}} 1 \qquad [-] \tag{6.14}$$

P: Partikel, p^* zusammenhängender Pixelbereich aus Einzelpixel p, S_1: Schwelle zur Partikelbestimmung, $A(P)$: Partikelfläche von Partikel P, $A_{\min/\max}$: Partikelfläche min./max.



(a) Originalaufnahme des Prozesses **(b)** Zeitableitung und Spritzererkennung **(c)** Darstellung der Spritzeranzahl

Abbildung 6.9: Spritzererkennung auf Basis der Zeitableitung und anschließender Größenfilterung (Darstellung: Akkumuliert über WEB (N^*) bzw. Anzahl an Position der Maximaltemperatur (N)).

Die Spritzererkennung arbeitet auf dem gesamten zur Verfügung stehenden Bildbereich. Um das Ergebnis in dem schichtweisen Ansatz nutzen zu können, erfolgt eine Zuordnung des Indikatorwertes zu dem Ort der Spritzerentstehung (Maximum der zu diesem Zeitpunkt gemessenen Temperaturverteilung). Alternativ kann der Indikator auch der Fläche des WE zugeordnet bzw. akkumuliert werden.

Spritzerbelegung (ISB) Im Gegensatz zu der Spritzeraktivität dient der Indikator Spritzerbelegung ISB der Identifikation von Landestellen der emittierten Spritzerpartikel. Die Relevanz für eine Überwachung ist dadurch gegeben, dass Spritzer, die an Stellen auftreffen, die noch nicht verfestigt wurden, zu lokalen Unregelmäßigkeiten bei der Energieeinkopplung bzw. Benetzung der Pulverpartikel führen können. Der Indikator stellt demnach eine probabilistische Größe dar, da sie bereits vor dem eigentlichen Verfestigungsprozess an der jeweiligen Stelle ermittelt wird.

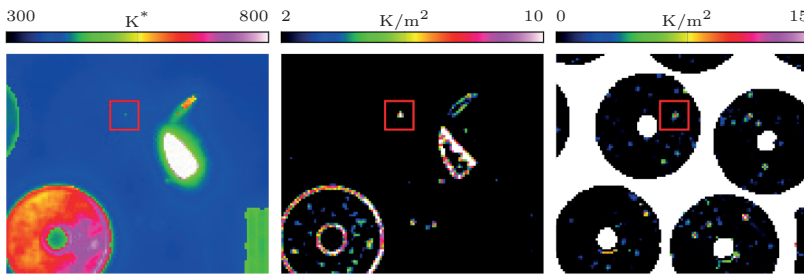
Anhand der Ortsableitung einer Bildfolge werden die ruhenden Spritzerpartikel identifiziert. Aufgrund ihrer erhöhten Temperatur und der verminderten Wärmeleitung der Landestelle (pulverförmiger Untergrund) können sie von der Umgebung separiert werden. Anschließend erfolgt oberhalb einer Schwelle S_2 eine zeitliche Integration über die gesamte Schichtzeit, um die Spritzer

abhängig von ihrer Größe und Strahlungsintensität zu gewichten. Zudem können dadurch weitere Spritzerpartikel an den jeweiligen Orten berücksichtigt werden. Es gilt:

$$\begin{aligned} I_s(t) &= \frac{\partial^2 T^*(t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^*(t)}{\partial y^2} \\ J_p(t) &= \{p \in I_s(t) : p > S_2\} \\ \mathrm{ISB} &= \sum_{t_i} J_p(t_i) \qquad [\frac{K}{m^2}] \end{aligned} \tag{6.15}$$

I_s: Spritzerbild, S_2: Schwelle zur Partikelbestimmung

Im Gegensatz zu den anderen Indikatoren findet die Ortszuordnung direkt entsprechend der Landestellen und nicht entsprechend dem Entstehungsort statt. Abbildung 6.10 veranschaulicht das Vorgehen.



(a) Originalaufnahme des Prozesses mit Spritzermarkierung

(b) Ortsableitung, Spritzererkennung auf nicht verfestigter Fläche

(c) Spritzerintensität akkumuliert bis zum Verfestigungszeitpunkt

Abbildung 6.10: Spritzerintensität für Landestellen auf Basis der Ortsableitung

6.3.3 Indikatoren für den Schichtauftrag

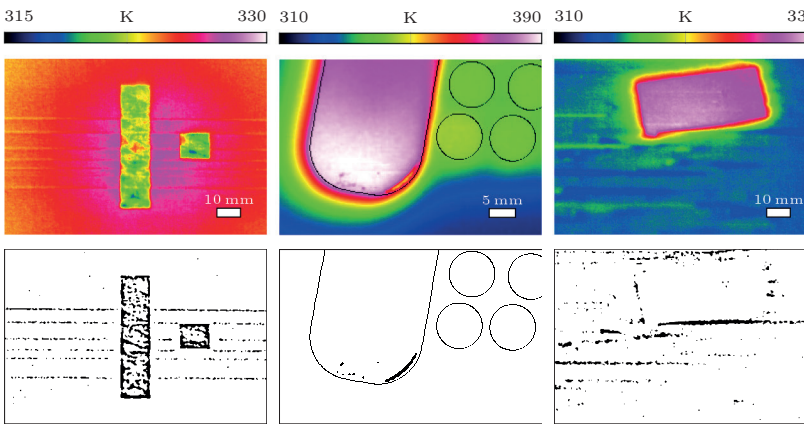
Unregelmäßigkeiten vor/nach Schichtauftrag Unregelmäßigkeiten bei dem Schichtauftrag entstehen u.a. durch den Kontakt des Beschichtungsmechanismus mit herausragenden Bauteilen bzw. durch eine ungenügende Pulverzustellung. Die Fehlstellen lassen sich, ebenso wie Fremdpartikel im Pulverbett, durch die lokal unterschiedlichen Emissionseigenschaften und Schichtdicken separieren. Sie sind von Relevanz für die Prozessstabilität sowie die Bauteilqualität und werden durch eine Fehlerfläche charakterisiert, die die Fläche der erkannten Unregelmäßigkeiten mit einer Bezugsfläche (Bauteilbereich (IFB), Pulverbettbereich ohne Bauteile (IFP)) in Bezug setzt. Das Vorgehen kann gleichermaßen vor und nach dem Schichtauftrag angewandt werden.

Die Indikatorbildung basiert auf einer adaptiven Schwellwertbildung, die die lokale Umgebung berücksichtigt[12]. Im Vergleich zu einem festen Schwellwert können dadurch variable Grundtemperaturen des Pulverbetts bzw. der darin enthaltenen Bauteile einbezogen werden (vgl. Abbildung 6.11):

$$\begin{aligned} \mathrm{IFB} &= \sum_{\{p \in C : T(p) > S^*(x,y)\}} 1 \quad [\mathrm{px}] \\ \mathrm{IFP} &= \sum_{\left\{p \in B \cap \bar{C} : T(p) > S^*(x,y)\right\}} 1 \quad [\mathrm{px}] \end{aligned} \tag{6.16}$$

C: Bildbereich, in dem die Bauteilquerschnitte enthalten sind, $S^*(x, y)$: adaptiver Schwellwert

Die Indikatorbildung findet zu einem festen Zeitpunkt vor bzw. nach dem Schichtauftrag statt und basiert demnach auf einer Momentaufnahme. Nach Abschnitt 4.4 können bei der Beschichtung mehrere Fehlerbilder unterschieden werden, deren Erkennung in Abbildung 6.11 veranschaulicht wird. Je



(a) Schlieren im Pulverbett (nach Belichtung, präparierte Klinge mit Einkerbungen 100 µm–500 µm)

(b) Freigelegte Oberflächen durch Beschichterkollision/-abtrag (nach Schichtauftrag)

(c) Fremdkörper im Pulverbett (nach Schichtauftrag, präparierte Spritzerpartikel)

Abbildung 6.11: Fehlerflächen im Pulverbett, die durch eine adaptive Schwellwertbildung separiert und erfasst werden können.

[12] Überschreitet ein Flächenelement den Mittelwert seiner Umgebung um einen festen Wert (Offset), wird es separiert. Die Größe der Umgebung und der Offset-Wert sind einstellbar.

nach Zeitpunkt der Indikatorbildung müssen die Parameter für eine adaptive Schwellwertbildung entweder an die markanten Oberflächenstrukturen verfestigter Bereiche oder an die homogenen Oberflächeneigenschaften einer Pulverschicht angepasst werden (vgl. Abbildung 6.11).

Im Gegensatz zu optischen Verfahren im VIS-Bereich, die die Schichtauftragsqualität bzw. das Verfestigungsergebnis überwachen, wird bei der thermischen Überwachung keinerlei Zusatzbeleuchtung oder Zusatzheizung benötigt. Die variierenden Emissionseigenschaften in dem zu untersuchenden Temperaturbereich führen zu einem ausreichenden, messtechnisch erfassbaren, thermischen Kontrast.

Lokale Schichtdicke (ISD) Die Temperatur einer neu aufgetragenen Pulverschicht liegt unterhalb der Vorheiztemperatur und kann aufgrund des bekannten und vergleichsweise hohen Emissionsgrades genau bestimmt werden. Die Ableitung der lokalen Schichtdicke erfolgt durch die Betrachtung des Aufheizverhaltens (vgl. Abbildung 5.7b). Für eine Qualitätsüberwachung wird das Verhältnis der gemessenen Schichtdicke d_l^* zu der nominellen Schichtdicke d_l gebildet (vgl. Gleichung 5.20):

$$\mathrm{ISD} = \frac{d_l^*(x,y)}{d_l} \qquad [-] \tag{6.17}$$

Der Indikator dient sowohl zur Erkennung lokalisierter Schichtauftragsfehler als auch zur Erkennung globaler Abweichungen der Schichtdicke (Krauss et al. 2014a). Die Temperaturmessung zur Schichtdickenbestimmung ist jedoch durch die nicht vollständige Zugänglichkeit der Messstrecke und die Zeitauflösung des Thermografiesystems beschränkt. Da die Aufheizung innerhalb weniger Zehntelsekunden nach dem Auftrag stattfindet, darf das Sichtfeld von dem Beschichtungsmechanismus in diesem Zeitraum nicht verdeckt werden. Diese Randbedingungen werden mit dem in Unterabschnitt 4.3.1 bzw. Anhang A.2 diskutierten Aufbau nicht erfüllt. Der Indikator wird daher nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Weitere Indikatoren Die vorgestellten Indikatoren stellen eine Auswahl möglicher Qualitätskenngrößen dar. Der Off-Axis-Aufbau eignet sich darüber hinaus zur direkten Ergebnisdokumentation in Form von Einzelbildern. Aus der charakteristischen Oberflächentopologie verfestigter Flächen lässt sich im VIS-Bereich beispielsweise auf den Energieeintrag schließen (vgl. Kleszczynski & Zur Jacobsmühlen (2013)). Im IR-Bereich kann dagegen der thermische Kontrast aufgrund unterschiedlicher Abstrahleigenschaften genutzt werden (vgl. Bauteilbereich in Abbildung 6.11a), um Gestaltsabweichungen zu identifizieren und Oberflächenfehler zu erkennen (vgl. Abdelrahman & Starr (2014)). Ebenso kann die bauteilspezifische Grundtemperatur vor dem

Energieeintrag für Vergleichbarkeitsuntersuchungen zwischen verschiedenen Bauaufträgen herangezogen werden (vgl. Abschnitt 6.5).

6.4 Indikatoranalyse

Für die Analyse und Bewertung der Indikatoren werden nach Abschnitt 6.2 die Korrelationen zu Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen sowie die Auflösungsgrenze für lokale Unregelmäßigkeiten betrachtet.

6.4.1 Schichtweise Überwachung - globale Unregelmäßigkeiten

Aus Kapitel 4 sind die Zusammenhänge zwischen typischen Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen bekannt. Im Rahmen der Indikatoranalyse für eine schichtweise Auswertung (SWA) werden diese Ergebnisse nachfolgend durch zusätzliche Sensitivitätsstudien erweitert. Die Indikatorbewertung erfolgt anhand von Würfelproben, um den Einfluss durch die geometrische Form des Prüfkörpers konstant und gering zu halten. Der Fokus liegt auf der Erkennung globaler bzw. langfristiger Änderungen der Prozessparameter (Driften). Für idealisierte Prozess- und Messbedingungen wurde die generelle Eignung der auf dem WEB basierenden Indikatoren in Krauss et al. (2012) nachgewiesen. Für reale Prozessbedingungen und unter Berücksichtigung der Belichtungsstrategie werden nachfolgend die schichtweise ermittelten Indikatoren bei Variation diverser Prozessparameter in Abbildung 6.12 analysiert. Die Bewertung geschieht durch Mittelung der Indikatoren über die jeweiligen Probenquerschnitte während der Probenfertigung.

Aus den Schichtbildern in Abbildung 6.12 geht hervor, dass Abweichungen der Prozessparameter anhand der Indikatoren unterschiedlich gut erkannt bzw. unterschieden werden können. Die Abhängigkeiten und Varianzen werden dabei von folgenden Effekten beeinflusst:

- Oberflächenstruktur: Die Oberflächenstruktur ändert sich mit den Prozessparametern. Aufgrund unterschiedlicher Emissionseigenschaften wird dadurch die strahlungsbasierte Temperaturbestimmung beeinflusst.
- Grundtemperatur: Der kontinuierliche Energieeintrag beim Verfestigen einer Bauteilschicht führt zu einer Anhebung der Grundtemperatur dieses Bauteils während der Verfestigung. Je nach Zeitpunkt der Verfestigung eines Bauteilbereichs variieren dadurch die Randbedingungen der Wärmeableitung.
- Belichtungsstrategie: Die Orientierung einzelner Scanvektoren und Scanflächen wirkt sich nach Anhang A.2.4 auf das Emissionsverhalten aus und beeinflusst die strahlungsbasierte Temperaturbestimmung. Durch die Belichtungsstrategie kommt es zu variablen Scanvektorlängen im

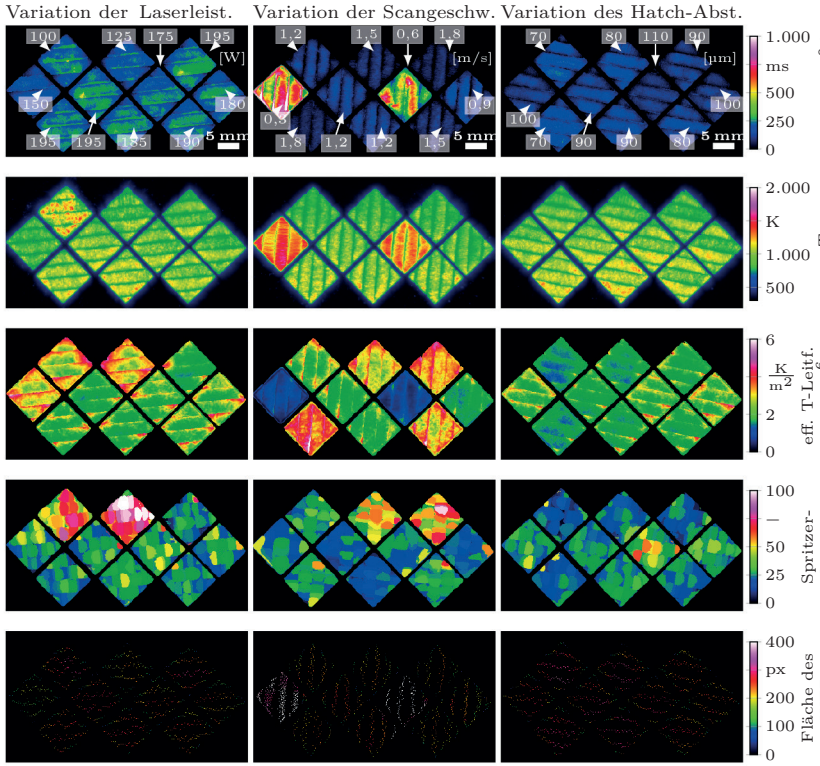


Abbildung 6.12: Sensitivität ausgewählter Indikatoren bzgl. der Variation von Prozessparametern. Die Variation erfolgte innerhalb einer einzelnen Schicht, das darunterliegende Grundmaterial wurde mit einheitlichen Parametern verfestigt. Auswirkung der Variation gemäß Spalte auf die Indikatoren gemäß Zeile.

Probenrandbereich, die bei einer schichtweisen Mittelung zu zusätzlichen Variationen führen.

- Inhomogenität der Off-Axis-Messung: Je nach Position im Bildbereich variieren die Integrationsfläche und die Abbildungsschärfe bzw. der Auswertebereich z. B. für die Spritzeraktivität (vgl. Anhang A.2.1).
- Samplingrate: Es kommt zu Frequenzüberlagerungen zwischen der Hatch-Frequenz (ca. 200 Hz) und der Samplingrate des Messsystems (50 Hz), die zu weiteren Varianzen im Messsignal führten.

Zur Berücksichtigung dieser Gegebenheiten werden die Indikatoren abhängig von ihren Korrelationen zu den Prozessparametern bzw. Qualitätsmerkmalen

und den Signaleigenschaften hinsichtlich der Kriterien aus Unterabschnitt 6.2.3 analysiert. Sowohl bezüglich der Modellgüte R^2 (vgl. Abbildung 6.13) als auch der Detektionsgrenze (vgl. Abbildung 6.15) ergeben sich wesentliche Unterschiede zwischen den Indikatoren. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist im Allgemeinen gering und liegt in der Größenordnung von SNR = 3–10 (vgl. Abbildung 6.14).

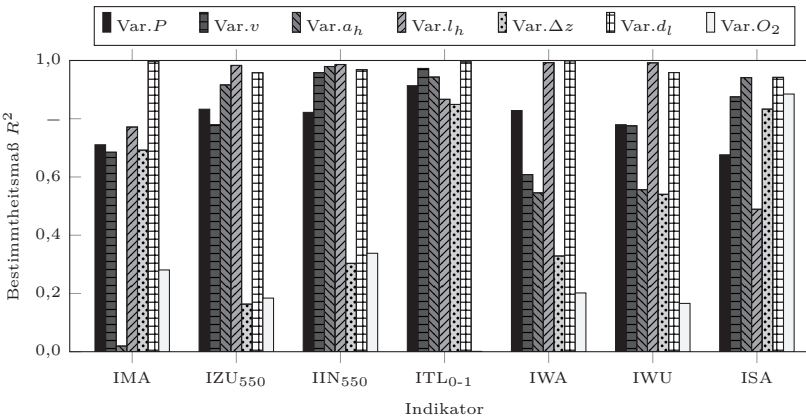


Abbildung 6.13: Bestimmtheitsmaß bei der Regression mit linearen bzw. quadratischen Modellen, ausgewählte Indikatoren

Maximaltemperatur (IMA) Die Maximaltemperatur zeichnet sich hinsichtlich des Signal-Rausch-Verhältnisses positiv gegenüber den anderen Indikatoren aus. Ein Grund hierfür liegt in der Messdatenerhebung, da der Messwert auf einem einzigen Sample basiert und daher von dem Auslesezeitpunkt im Detektor abhängig ist. Zudem ist durch die Off-Axis-Anordnung eine Positionsabhängigkeit hinsichtlich des Abstrahlwinkels gegeben, die sich bei Indikatoren mit nur wenigen Datenpunkten ebenfalls auswirkt. Die Detektionsgrenze dieses Indikators liegt daher in vielen Fällen höher als bei anderen Indikatoren.

Temperaturleitfähigkeit (ITL) Der Indikator „effektive Temperaturleitfähigkeit“ besitzt den theoretischen Vorteil, nicht direkt von der Oberflächenstruktur abhängig zu sein, da nur der Temperaturunterschied im Verlauf der Abkühlung in seine Berechnung eingeht. In der Praxis wirken sich die Oberflächeneigenschaften jedoch deutlich aus und es sind nur geringe Signal-Rausch-Verhältnisse zu erreichen. Je nach gewähltem Belichtungsmuster beeinflusst zudem der wiederkehrende Energieeintrag an den Grenzen der Scanflächen die Abkühlkurven und damit die Bestimmung der Leitfähigkeit. Prinzipiell können anhand der effektiven Temperaturleitfähigkeit auch Unterschiede in der Werkstoffzusammensetzung sichtbar gemacht werden. Aufgrund des geringen

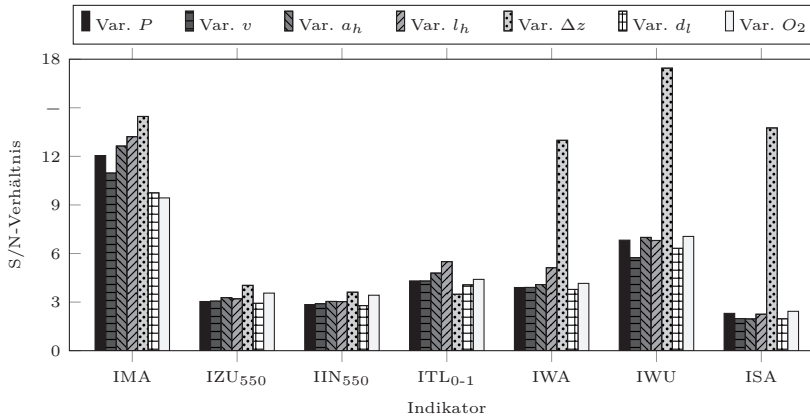


Abbildung 6.14: Signal-Rausch-Verhältnis, ausgewählte Indikatoren

Signal-Rausch-Verhältnisses ist ein solcher Ansatz zur Detektion veränderter Werkstoffzusammensetzungen mit niedrig auflösender Sensorik jedoch nicht praktikabel.

Darüber hinaus kann das Abkühlverhalten prozessbedingt nur wenige Sekunden nach der Belichtung beobachtet werden, da der nachfolgende Schichtauftrag die Messstrecke blockiert. Für unterschiedliche Mittelungsbereiche dieses Indikators (z. B. 0 s bis 1 s, 0,1 s bis 3 s, 1 s bis 10 s) ergeben sich trotz dieses Umstandes deutliche Korrelationen untereinander (vgl. Anhang A.5.2), sodass für die Überwachung eine Auswahl getroffen werden kann. Für energierelevante Prozessparameter besitzen die Regressionsmodelle der effektiven Temperaturleitfähigkeit ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0{,}8$ und es sind geringe Detektionsgrenzen zu erreichen. Für die Detektion eines erhöhten Sauerstoffgehalts ist der Indikator v.a. bei kurzen Mittelungsperioden nicht geeignet (vgl. Abbildung 6.15).

Wärmeeinflussbereich (IWA, IWH, IWI, IWU, IWV) Die geometrische Charakterisierung des WEB durch Fläche (IWA) und Umfang (IWU) zeigt vor allem bei Variationen der Fokuslage eine niedrige theoretische Detektionsgrenze von ±1 mm. Aufgrund des geringen Bestimmtheitsmaßes ist sie jedoch nur bedingt geeignet, solche Abweichungen sicher zu identifizieren. Da die Größe und Form des WEB mit den Wärmeableitungsbedingungen variiert, kommt es geometriebedingt an Überhängen, Randbereichen und dünnwandigen Strukturen zu erheblichen Änderungen der darauf basierenden Indikatoren (IWA, IWI, IWV). Gleiches gilt auch für skalen- und orientierungsunabhängige Indikatoren (IWH). Abgesehen von Dokumentationszwecken eignet sich die Analyse des WEB daher nur bei großflächiger Belichtung von massiven

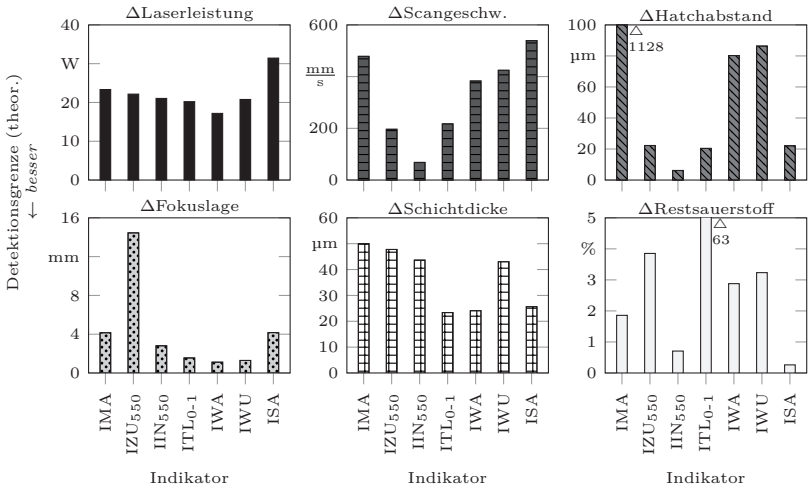


Abbildung 6.15: Theoretische Detektionsgrenze, ausgewählte Indikatoren und Prozessparameter

Bauteilen, bei denen von gleichen Randbedingungen der Wärmeableitung über weite Bauteilbereiche hinweg ausgegangen werden kann.

Spritzerbildung (ISA) Die Quantifizierung der „Spritzeraktivität“ eignet sich v.a. zur Erkennung eines erhöhten Sauerstoffgehalts bzw. veränderter Schichtdicken, da in diesen Fällen geringe Detektionsgrenzen erreicht werden. Der Indikator steht damit im Zusammenhang mit der Prozessstabilität, die durch einen erhöhten Sauerstoffgehalt bzw. erhöhte Schichtdicken beeinträchtigt werden kann (vgl. Unterabschnitt 5.4.4). Im Gegensatz zu anderen Indikatoren erfolgt die Zuordnung des Indikators zu dem Entstehungsort (*Mapping*) anhand der aktuellen Maximaltemperatur. Die Zuordnung wird daher von Wärmestauungen und erhöhten Temperaturen in Bauteilrandbereichen verfälscht. Das Signal-Rausch-Verhältnis und das Bestimmtheitsmaß des Indikators werden zudem durch das Sichtfeld des Messsystems beeinträchtigt. Für Überwachungsbereiche am Rand des Sichtfeldes kann nur ein reduzierter Anteil aller entstehenden Spritzer erfasst werden.

Zeit über Schwelle (IZU) und Integral (IIN) Die Indikatoren IZU und IIN zeigen ähnliche Eigenschaften hinsichtlich Bestimmtheitsmaß und Signal-Rausch-Verhältnis. Beide Indikatoren werden über einen endlichen Zeitbereich unmittelbar nach der Verfestigung gebildet und reagieren, je nach gewählter Schwelle, weniger sensitiv auf den Aufnahmezeitpunkt, da es zu Mittelungseffekten kommt. Durch den Indikator IIN werden alle Messdaten über einen

Zeitbereich aufsummiert, sodass der konkrete Temperaturverlauf eingeht. Der Indikator IZU misst dagegen nur die entsprechende Intervalllänge und enthält weniger Information über Unregelmäßigkeiten und Fehler, die den Temperaturverlauf beeinflussen. In der Praxis äußert sich das in den besseren Detektionsgrenzen von IIN, wobei diese für geringe Modellgüten nur theoretische Relevanz haben (vgl. Variation der Fokuslage).

Für unterschiedliche Schwellwerte beider Indikatoren (400 °C, 550 °C, 650 °C) ergeben sich deutliche Korrelationen (vgl. Anhang A.5.2), sodass für die praktische Überwachung eine Auswahl zwischen diesen Schwellwerten getroffen werden kann.

6.4.2 Schichtaufgelöste Überwachung - lokale Unregelmäßigkeiten

Im Rahmen der SAA werden die Indikatoren anhand der sog. POD analysiert. Sie gibt in Abhängigkeit der Fehlergröße die Wahrscheinlichkeit an, diesen Fehler zu detektieren. Als Fehler sind in diesem Zusammenhang lokale Unregelmäßigkeiten z. B. in Form von Poren und Bindefehler zu verstehen. Die Erkennbarkeit ist einerseits von geometrischen Abmessungen und der Lage der Fehler, andererseits von dem Detektionsprinzip (Indikator) und der Umgebung des Fehlers abhängig. Die POD wird als Verhältnis der richtig erkannten Fehler zu der Summe der vorliegenden Fehler definiert und stellt eine statistisch zu ermittelnde Größe dar:

$$POD = \frac{TP}{TP+FN} \tag{6.18}$$

TP: „True Positive“-Ereignisse (Fehler liegt vor und wird erkannt), FN: „False Negative“-Ereignisse (Fehler liegt vor und wird nicht erkannt)

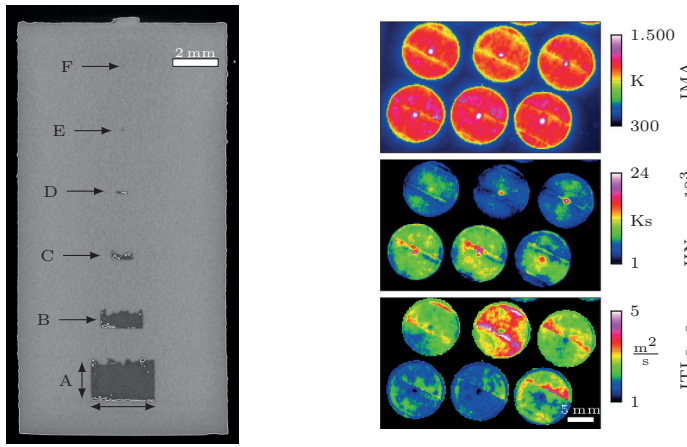
Nach Department of Defense (2009) sind für die Bestimmung der POD zwei Verfahren üblich. In der „hit/miss“-Strategie wird anhand einer festzulegenden Schwelle zwischen „Fehler erkannt“ und „Fehler nicht erkannt“ unterschieden. Bei der „$\hat{a}$ vs. a“-Korrelationsanalyse wird dagegen die gesamte Signalantwort in die Auswertung einbezogen[13]. Als Bewertungskriterium für unterschiedliche Indikatoren wird letztlich der POD-Kurvenverlauf bzw. die daraus ableitbare Auflösungsgrenze, das $a_{90/95}$-Level, herangezogen. Sie entspricht der Fehlergröße, bei der die untere Schwelle des 95%-Vertrauensbereichs das 90%-Niveau der POD erreicht[14].

Die Indikatoranalyse erfolgt anhand von künstlich eingebrachten Fehlstellen in Form von lokal nicht verfestigtem Pulverwerkstoff (vgl. Abbildung 6.16).

[13] Für die Analyse sind diverse Anforderungen zu beachten, darunter die Linearität der Modellparameter, die Normalverteilung der Fehler im Regressionsmodell und die Gleichheit der Varianz (vgl. Department of Defense (2009)).

[14] Die Wahl erfolgt nach Konvention.

Als Fehlergröße a dient der aus CT-Aufnahmen bestimmte Durchmesser einer äquivalenten Kugel, die das Volumen der Fehlstelle repräsentiert. Mit diesem Vorgehen können unterschiedliche Fehlerformen berücksichtigt werden und die Abschätzung der Auflösungsgrenze erfolgt konservativ. Das Detektionssignal $\hat{a}$



(a) Zylinderförmiger Probenkörper (CT-Aufnahme, Bestimmung a)

(b) Schichtbilder mit Fehlstelle (C) (Bestimmung $\hat{a}$)

Abbildung 6.16: Probenkörper mit variablen Fehlstellen (unverfestigtes Pulver), CT-Aufnahme und thermografisches Schichtbild

wird als die maximale Differenz des jeweiligen Indikators zu den Werten von dessen lokaler Umgebung gewählt (vgl. Abbildung 6.16b). Im Gegensatz zu der späteren Anwendung der SAA geht bei der Indikatoranalyse das Wissen über die Lage der Fehlstelle ein, da nur die Schicht direkt oberhalb der Fehlstelle betrachtet wird und die maximale Abweichung in einem engen Bereich um die Fehlstelle gesucht wird. A priori werden bei der Erkennung lokalisierter Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten diejenigen Indikatoren ausgeschlossen, deren räumliche Zuordnung nicht eindeutig ist. Dies ist der Fall für die auf dem WEB basierenden Indikatoren.

Eine besondere Bedeutung bei der POD-Analyse kommt dem Rauschen zu (vgl. Unterabschnitt 6.4.1). Es erschwert zum einen die Lokalisierbarkeit von Fehlstellen in den schichtweise generierten Aufnahmen (vgl. Abbildung 6.16b) und beeinflusst zum anderen die Wahrscheinlichkeit für Falsch-Positiv-Ereignisse – Ereignisse, bei denen ein Fehler angezeigt wird, obwohl keiner vorliegt. Als zentrale Größe geht in der POD-Analyse der Schwellwert $\hat{a}_d$ für die Rausch/Signal-Unterscheidung ein. Per Definition besteht bei der zum Signalwert $\hat{a}_d$ korrespondierenden Fehlergröße a eine 50 %-Wahrscheinlichkeit, dass der Fehler als solcher erkannt wird.

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Indikatoren sicherzustellen, wird $\hat{a}_d$ so gewählt, dass über alle relevanten Fehlergrößen die Wahrscheinlichkeit einer Fehldetektion (FP-Ereignisse) unter 10 % liegt. Abbildung 6.17 veranschaulicht die diskutierten Größen und die Ableitung der POD-Kurve am Beispiel des Indikators IMA.

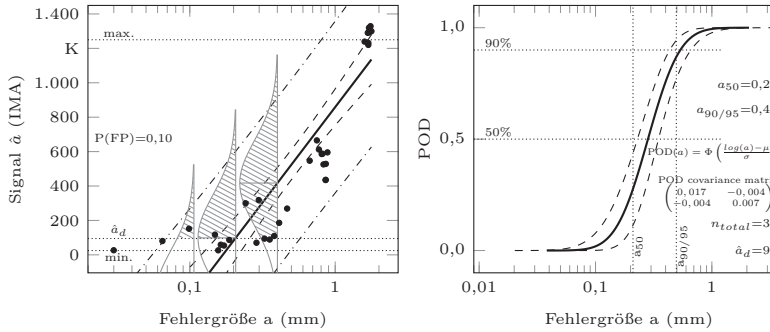


Abbildung 6.17: Ableitung der Auflösungsgrenze anhand künstlicher Fehler; links: Signalwerte und Fehlergrößen mit Konfidenzintervallen; rechts: POD-Kurve mit Auflösungsgrenze.

Die POD-Analyse basiert auf der sog. Deltamethode und stellt eine lineare Näherung dar (vgl. Department of Defense (2009)). Große Fehlstellen, die sicher erkannt werden, tragen nicht zur POD-Kurve bei, können aber die lineare Näherung erheblich verfälschen. Aus diesem Grund werden Fehlstellen, die deutlich über der Detektionsgrenze liegen, von der Analyse ausgeschlossen. Die ermittelten Auflösungsgrenzen für die Indikatoren sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Für die Festlegung der Entscheidungsschwelle wird weißes Rauschen angenommen, dessen Standardabweichung aus dem Schichtbild unmittelbar vor der Fehlstellendetektion ermittelt wird.

Tabelle 6.3: Auflösungsgrenzen $a_{90/95}$ und Entscheidungsschwellen für ausgewählte Indikatoren

Indikator	**IZU**$_{400}$	**IZU**$_{550}$	**ITL**$_{0\text{-}1}$	**ITL**$_{0\text{-}3}$	**IIN**$_{400}$	**IIN**$_{550}$	**ISA**	**IMA**
$a_{90/95}$ [mm]	1,03	0,63	0,84	1,03	0,45	0,44	18,13	0,49
$\hat{a}_d$	0,14	0,06	0,85	0,62	5200	2700	15	95
Einheit	s	s	m^2/s	m^2/s	Ks	Ks	—	K

Die Auflösungsgrenze liegt in der Größenordnung von $a_{\min} \approx 500\,\mu m$ und entspricht der doppelten Pixelauflösung.

Bei der vorliegenden Analyse erfolgt die Auswertung anhand einer einzelnen Schicht und jeweils direkt oberhalb der künstlichen Fehlstellen. In Krauss

et al. (2015) wird gezeigt, dass lokale Fehler auch in größerem Abstand zu der Oberfläche erkannt werden können. Durch Betrachtung mehrerer Schichten in einem schichtübergreifenden Ansatz wird dadurch die Wahrscheinlichkeit für einen Fehlalarm reduziert.

Spritzerbelegung (ISB) Eine Sonderstellung im Rahmen der SAA nimmt der Indikator *Spritzerbelegung* ein. Dieser zeigt die Landestellen von Spritzerpartikeln an und gewichtet deren Größe und Strahlungsintensität. Im Gegensatz zu den anderen Indikatoren ist ein erhöhter Indikatorwert nicht notwendigerweise mit einer Fehlstelle an dieser Position in Verbindung zu bringen. Stattdessen kann der Indikatorwert als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, dass der Prozess an dieser Stelle so gestört wird, dass im späteren Bauteil messbare Unregelmäßigkeiten entstehen. Es wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Prozessstörung mit der Spritzergröße bzw. mit der gemessenen Strahlungsintensität des Spritzers und damit dem Indikatorwert ISB skaliert. Zur Analyse des Indikators und zur Prüfung dieser Annahme wurde der Indikatorwert an realen Fehlstellen validiert, die aus hochauflösenden CT-Aufnahmen extrahiert wurden (vgl. Abbildung 6.18).

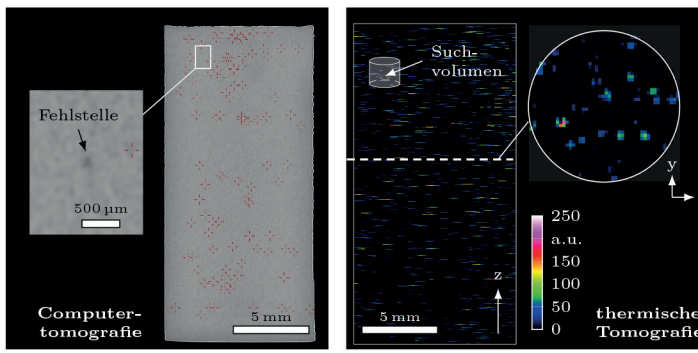


Abbildung 6.18: Analyse des Indikators *Spritzerbelgung* anhand von CT-Aufnahmen (Auflösung 15 µm) und thermischer Tomografie, Zylinderprobe

Abbildung 6.19 zeigt den über ein kleines Suchvolumen gemittelten Indikatorwert an den realen Fehlstellen im Vergleich zu zufällig ausgewählten Stellen ohne Fehler. Für den Fall, dass ein Zusammenhang zwischen dem Indikatorwert und einem tatsächlich aufgetretenen Fehler an dieser Position besteht, müssten sich die Mittelwerte der beiden Verteilungen bzw. deren Histogramme signifikant unterscheiden. Unter der Annahme, dass die Position der Spritzerpartikel durch den Verfestigungsprozess nicht wesentlich verändert wird, konnte dieser Unterschied in dem untersuchten Fehlergrößenbereich (10 µm bis

50 µm) jedoch nicht nachgewiesen werden. Der Indikator eignet sich daher nur bedingt zur Anzeige von potenziellen Fehlstellen in dieser Größenordnung.

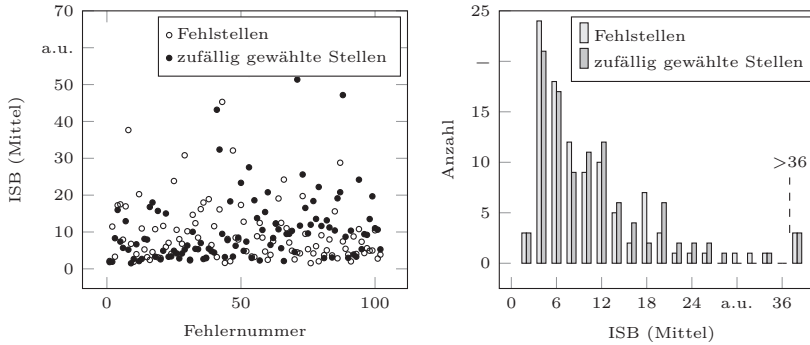


Abbildung 6.19: Indikatorwerte an Fehlstellen und zufällig ausgewählten Stellen, Umfang jeweils 100 Datenpunkte, Fehlergrößenbereich 10 µm–50 µm, Suchvolumen ± 1 Schicht mit Suchradius 500 µm.

Für den Prozess bedeutet das, dass Spritzer auf noch nicht verfestigten Flächen in der unter Normalbedingungen aufkommenden Größe und Menge kein oder nur ein sehr geringes Risiko bedeuten, an der Landestelle computertomografisch detektierbare Fehlstellen zu verursachen.

6.5 Kennzahlensystem und Qualitätsbewertung

6.5.1 Priorisierung von Indikatoren

Die Zusammenführung von Indikatoren in einem Kennzahlensystem bietet die Möglichkeit, den Prozess auf Grundlage definierter Anforderungen zu bewerten. In Abschnitt 6.4 wurde gezeigt, dass sich die Indikatoren bzw. Kennzahlen unterschiedlich gut eignen, singuläre Abweichungen von Prozessparametern (SWA) und lokale Fehler (SAA) anzuzeigen. In dem nachfolgenden Kennzahlensystem werden die Signaleigenschaften der einzelnen Indikatoren abschließend bewertet und eine Rangordnung etabliert.

Während für die SAA die Rangordnung unmittelbar aus der Auflösungsgrenze $a_{90/95}$ folgt, müssen bei der SWA die Signaleigenschaften gesondert einbezogen werden. Dazu wird für jeden Indikator und jede singuläre Parameteränderung („*one factor at a time*“) eine Bewertungskennzahl $\hat{a}(I_i, p)$ anhand der drei Kriterien aus Unterabschnitt 6.2.3 abgeleitet, die hier jeweils in gleicher Gewichtung eingehen:

$$\hat{a}(I_i,p) = \frac{1}{3}\frac{\mathrm{SNR}(I_i)-\mathrm{SNR}_{\min}}{\mathrm{SNR}_{\max}-\mathrm{SNR}_{\min}} + \frac{1}{3}R^2(I_i) + \frac{1}{3}\left(1-\frac{\Delta p(I_i)-\Delta p_{\min}}{\Delta p_{\max}-\Delta p_{\min}}\right) \quad (6.19)$$

i: Index Indikator, p: Index Prozessparameter, min-max-Bestimmung über alle Indikatoren bezüglich Prozessparameter p

Durch Mittelung der Bewertungskennzahlen über den untersuchten Parameterraum wird schließlich eine Rangfolge abgeleitet. Sie beschreibt, durch welchen Indikator eine allgemeine Änderung der Prozessparameter am ehesten identifiziert wird. Für die Detektion singulärer Prozessparameteränderungen werden dagegen die Einzelergebnisse für diesen Parameter (vgl. Tabelle 6.4) herangezogen.

Tabelle 6.4: Rangordnung nach Eignung von Indikatoren bei der SWA. Mit (*) sind hochkorrelierende Indikatoren, mit (-) Einträge, für die keine Bewertungskennzahl ermittelt werden konnte, gekennzeichnet (vgl. Anhang A.5.2)

Indikator	**Bewertungskennzahl** $\hat{a}(I_i,p)$								**Rang**
	Laserleistung 100 W–195 W	Scangeschw. 0,3 m/s–1,8 m/s	Hatch-Abstand 70 µm–110 µm	Vektorlänge 1 mm–15 mm	Schichtdicke 20 µm–80 µm	Fokus 0 mm–5 mm	O_2- Konzentr. 0,4 %–2 %	Mittel $\langle\hat{a}\rangle_p$	
IMA	0,82	0,60	-	0,67	0,67	0,75	0,67	0,60	3
IZU_{400}	0,68	0,62	0,69	0,65	0,43	0,61	0,11	0,54	5
IZU_{550}	0,62	0,59	0,65	0,62	0,38	0,11	0,25	0,46	(*)
IZU_{650}	0,62	0,55	0,60	0,55	0,43	0,06	0,29	0,44	(*)
IIN	0,62	0,73	0,73	0,60	0,42	0,40	0,47	0,57	4
$ITL_{0\text{-}1}$	0,70	0,68	0,71	0,68	0,68	0,61	-	0,58	(*)
$ITL_{0\text{-}3}$	0,40	0,75	0,75	0,76	0,81	0,51	0,29	0,61	1
$ITL_{0\text{-}10}$	0,48	0,75	0,77	0,79	0,62	-	0,46	0,55	(*)
IWA	0,69	0,42	0,32	0,78	0,66	0,66	0,34	0,55	(*)
IWU	0,72	0,51	0,38	0,80	0,57	0,83	0,44	0,61	2
IWV	-	-	-	-	-	0,60	-	0,09	8
IWI	0,71	0,45	0,25	0,79	0,57	0,68	0,43	0,55	(*)
IWH_1	-	-	-	-	-	0,91	-	0,13	7
ISA	0,45	0,34	0,62	0,20	0,55	0,78	0,63	0,51	6

Tabelle 6.4 ist Teil des Kennzahlensystems. Für die Überwachung von Prozessparameteränderungen und damit auch von Qualitätsänderungen können entweder alle Indikatoren einbezogen werden oder gezielt einzelne Indikatoren betrachtet werden. Im ersten Fall dient ein gemittelter Indikatorwert (vgl. Gleichung 6.8) zur Anzeige von allgemeinen Abweichungen. Im zweiten Fall kann anhand von Tabelle 6.4 abgeschätzt werden, welche Parameteränderung

mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgetreten ist. Dies wird ermöglicht, da in die Bewertungskennzahl die parameterspezifische Detektionsgrenze und damit die Sensitivität eingeht.

Wird nur ein Indikator verwendet, so lassen sich beispielsweise Änderungen der Laserleistung vornehmlich durch die Maximaltemperatur identifizieren. Die effektive Temperaturleitfähigkeit dagegen dient der Erkennung von Scangeschwindigkeits-, Hatch-Abstands- und Schichtdickenänderungen. Demgegenüber bietet die geometrische Charakterisierung des WEB Vorteile bei der Identifikation von Fokusabweichungen und variablen Scanvektorlängen.

Zu beachten sind des Weiteren die Korrelationen zwischen den Indikatoren. Alle Indikatoren entstammen dem selben Sensorsystem, sodass a priori davon auszugehen ist, dass hohe Korrelationen auftreten. Auch wenn in diesem Ansatz keine vollständige Orthogonalität der untersuchten Indikatoren vorliegt, wird der Informationsgehalt bei gleichzeitiger Betrachtung mehrerer Indikatoren deutlich gesteigert. Dies ist auf die Einbeziehung unterschiedlicher physikalischer Aspekte bei der Ableitung der Indikatoren (z. B. Spritzeraktivität, Temperaturleitfähigkeit etc.) zurückzuführen (vgl. Anhang A.5.2).

6.5.2 Indikation der Bauteilqualität

Eine zentrale Bedeutung bei der Interpretation der Indikatoren liegt auf deren Aussagefähigkeit bezüglich der resultierenden Bauteilqualität. Nach Wiesemann (2004) sollte ein geeigneter Qualitätsindikator eine bekannte, eindeutige Funktion der gewählten Qualitätsmerkmale sein. Die Qualitätsindikatoren dürfen daher nicht von intrinsischen Prozessparametern abhängen, die nicht selbst qualitätsrelevant sind.

Da es sich bei beiden Variablen – Indikator und Qualitätsmerkmal – um Messgrößen bzw. abhängige Größen handelt, wird deren Zusammenhang anhand der wechselseitigen Korrelationen hergestellt (vgl. Unterabschnitt 6.2.3). Mit dem Korrelationskoeffizient werden schließlich die gemessenen Indikatorwerte gewichtet, um eine qualitätsbezogene Kennzahl nach Gleichung 6.8 abzuleiten. Aus Abbildung 6.20 gehen die Streudiagramme und die daraus bestimmten Korrelationskoeffizienten für ausgewählte Indikatoren und Qualitätsmerkmale hervor.

Fehlerflächenanteil/Härte Der FFA wird nach Kapitel 4 von allen untersuchten Prozessparametern beeinflusst. Hinsichtlich einer Qualitätsüberwachung korreliert dieses Qualitätskriterium deutlich mit der Spritzerbildung und der effektiven Temperaturleitfähigkeit. Eine Änderung dieser Indikatoren kann auf einen erhöhten FFA hinweisen.

Im Gegensatz zu der hier untersuchten Größenordnung des FFA im Bereich von 0 % bis 0,5 % ist aus Unterabschnitt 5.4.2 bekannt, dass für signifikant

höhere FFA, z. B. in Form von porösem Grundmaterial, die Abhängigkeit von der effektiven Temperaturleitfähigkeit noch deutlicher ausgeprägt ist. Die Härte korreliert nach Unterabschnitt 4.3.3 mit dem FFA und demnach auch mit den gleichen Indikatoren (vgl. Abbildung 6.20).

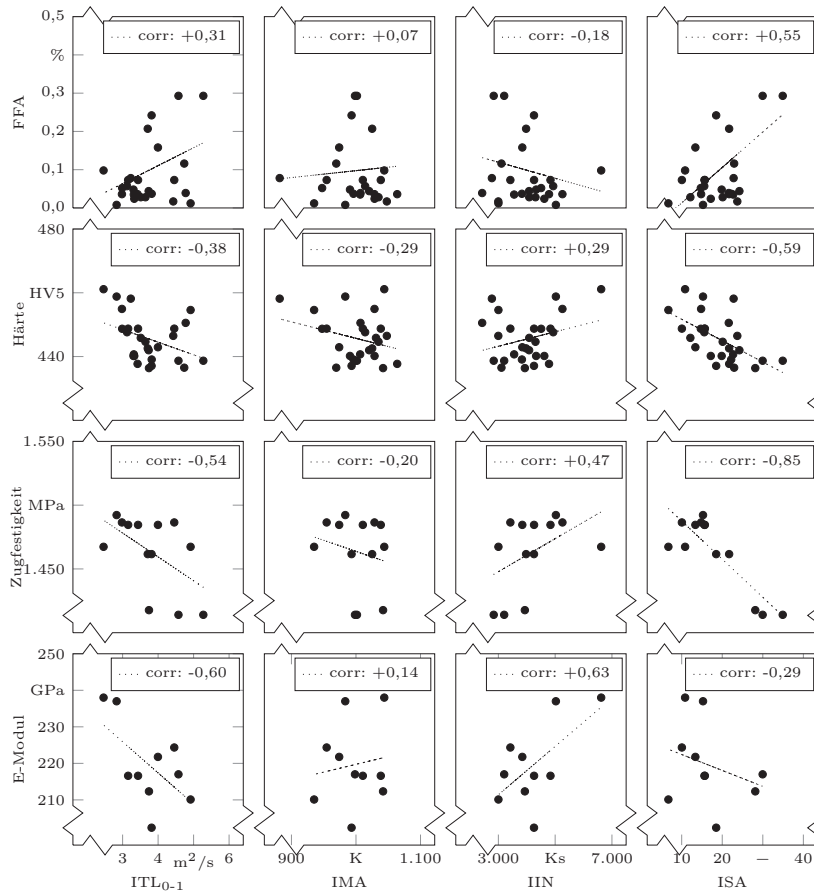


Abbildung 6.20: Korrelation von Indikatoren und Qualitätsmerkmalen c_{iq}

Zugfestigkeit/E-Modul Bei der Zugfestigkeit und dem E-Modul handelt es sich in der Additiven Fertigung im Allgemeinen um richtungsabhängige Qualitätsmerkmale. In einem schichtweisen Überwachungsansatz kann jedoch keine Richtungsunterscheidung erfolgen, sodass sich vorhandene Richtungsabhängigkeiten auf die Streuung auswirken. Nach Abbildung 6.20 korrelieren

Änderungen der Zugfestigkeit (nach Wärmebehandlung) vornehmlich mit der Spritzerbildung, während Änderungen im E-Modul durch die effektive Temperaturleitfähigkeit bzw. durch das Zeitintegral angezeigt werden. Je geringer die effektive Leitfähigkeit bzw. je höher das Zeitintegral ist, desto länger befindet sich der Prozess auf einem erhöhten Temperaturniveau und eine höhere Festigkeit bzw. ein höheres E-Modul ist theoretisch zu erwarten.

Aus der Betrachtung der Korrelationen, der Bewertungskennzahlen und der Auflösungsgrenzen ist eine unterschiedliche Eignung der Indikatoren für die Auswertung (SWA oder SAA) festzustellen. Der Indikator *Maximaltemperatur* eignet sich beispielsweise nur bedingt, um im Rahmen der SWA Änderungen der Qualitätsmerkmale anzuzeigen. Bei der SAA weist er jedoch eine verhältnismäßig geringe Auflösungsgrenze auf und kann für die Erkennung lokaler Fehler herangezogen werden. Die Spritzeraktivität dagegen besitzt auf der einen Seite eine unbrauchbare Detektionsgrenze in der SAA, auf der anderen Seite korreliert sie jedoch deutlich mit Qualitätsmerkmalen in der SWA.

6.5.3 Schichtübergreifende Überwachung

Nach Leischnig (2009) wird die Qualität von Produkten durch die Niveaustabilität und die Streuung qualitätsrelevanter Prozesskenngrößen des Fertigungsprozesses bestimmt. In einem schichtübergreifenden Ansatz kann diese Niveaustabilität anhand der in Abschnitt 6.3 eingeführten Indikatoren kontinuierlich überwacht werden. Für die SWA werden die Indikatoren in einer qualitätsbeschreibenden Kennzahl zusammengefasst (K_Q) oder singulär betrachtet, bei der SAA pixelweise bzgl. der lokalen Umgebung ausgewertet.

Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Robustheit eines schichtweisen Überwachungssystems bzw. Senkung der Fehlalarmrate müssen die Indikatorwerte in ihrem zeitlichen Verlauf, d. h. schichtübergreifend betrachtet werden. Im Rahmen der SWA zeigt Abbildung 6.21 einen typischen Verlauf singulärer Indikatorwerte über einen Bauprozess, anhand derer die Randbedingungen für eine schichtübergreifende Überwachung diskutiert werden.

Für die Schwellwertdefinition zur Fehlererkennung sind folgende Gegebenheiten zu berücksichtigen:

- Streuung der Messwerte innerhalb eines Bauteils: Die Streuung ist durch das Messverfahren (Punktmessung, Mittelung über Temperaturverlauf, Merkmalsextraktion durch Bildverarbeitung), die Sensorik (Optik, Trägheit, Kalibrierung, Off-Axis-Anordnung), die Oberflächenbeschaffenheit sowie das Belichtungsmuster bedingt und unterscheidet sich von Indikator zu Indikator.
- Beginn des Bauprozesses und Einfluss der Substratplatte: Zu Beginn des Bauprozesses befinden sich Baukammer, Substratplatte und Bauteile

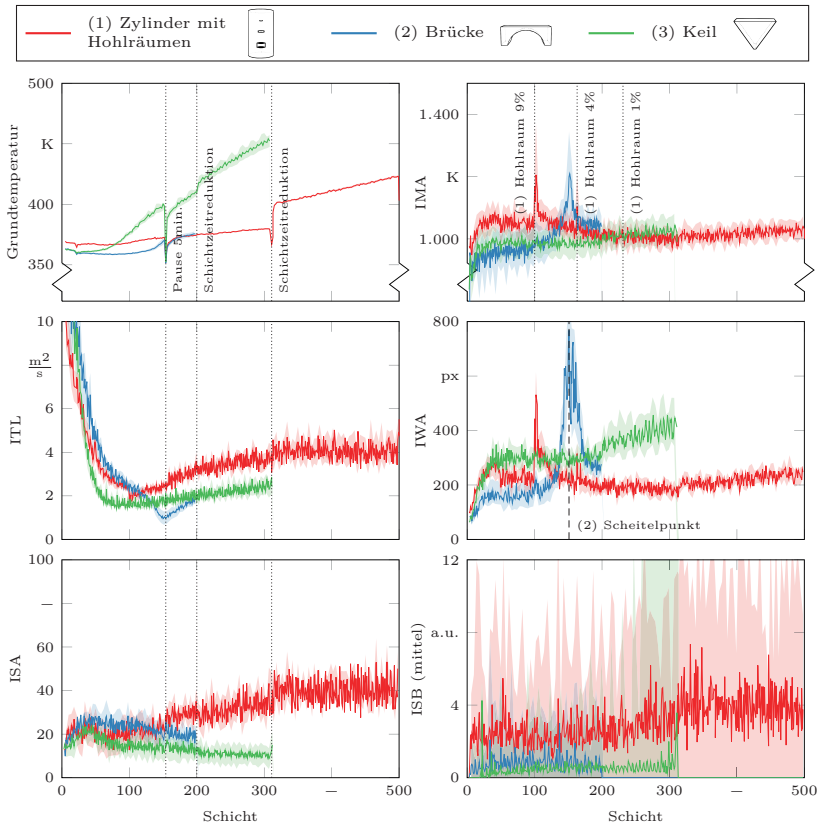


Abbildung 6.21: Mittelwerte und Streuungen ausgewählter Indikatoren für drei unterschiedliche Geometrien in einem Bauauftrag; Positionierung: Zylindergeometrie mittig, Brückengeometrie rechts, Keilgeometrie links. Fehlerangabe: $\pm 0{,}5\sigma$;

nicht notwendigerweise in einem thermischen Gleichgewicht. Dieses wird erst allmählich durch den Energieeintrag im Rahmen der Verfestigung erreicht. Für geringe Bauhöhen wirkt die Substratplatte als große Wärmesenke (hohe Kapazität) und die Abkühlung der Bauteile erfolgt schnell (hohe effektive Wärmeleitfähigkeit). Mit steigender Bauhöhe reduziert sich dieser Einfluss.

- Schichtzeit: Je nach Anzahl der Bauteile im Bauprozess bzw. Größe der zu belichtenden Fläche variiert die Schichtzeit. Dies führt zu einer Änderung der Grundtemperatur und der Maximaltemperatur während

des Prozesses.
- Belichtungsreihenfolge und Positionierung: Grund- und Maximaltemperatur variieren ebenfalls mit der Belichtungsreihenfolge innerhalb einer Schicht. Zudem ist die Belegung mit aufgetroffenen Spritzerpartikeln abhängig von Anzahl, Entfernung und Belichtungsdauer der jeweils davor prozessierten Bauteile. Durch die Schutzgasströmung ergibt sich darüber hinaus eine Positionsabhängigkeit der Spritzerbelegung.
- Geometrie: Variable Wärmeleitungsquerschnitte während des Aufbaus verursachen variable Grund- und Maximaltemperaturen sowie effektive Temperaturleitfähigkeiten.

Die Indikatoren weisen in ihrem Verlauf nicht nur eine geometrische Abhängigkeit, sondern auch eine konfigurationsbedingte Abhängigkeit auf. Für eine statische Klassifikation einzelner Schichten sind die (festen) Schwellwerte bzw. Grenzwerte entsprechend hoch zu wählen, um diese Einflüsse zu berücksichtigen. Lokalisierte Fehler und Abweichungen innerhalb einer Schicht werden dann nicht mehr als solche erkannt bzw. schon vorab verworfen.

Eine Alternative besteht folglich in der Anwendung eines Toleranzbandverfahrens, bei dem die Schwellwerte auf historischen Daten beruhen (vgl. Unterabschnitt 6.5.4). Für den allgemeinen Fall, in dem sich die Baujobkonfiguration von Prozesslauf zu Prozesslauf ändert und keine geometriespezifischen historischen Daten vorliegen, müssen dagegen wissensbasierte, simulative oder adaptive Methoden zum Einsatz kommen. Hierdurch werden die jeweiligen Bauteilhistorien und die aktuellen Prozessrandbedingungen schichtübergreifend berücksichtigt.

6.5.4 Vergleichbarkeit von Prozessen

Aus Unterabschnitt 6.5.3 ist bekannt, dass für eine enge Schwellwertdefinition Prozessrandbedingungen und Geometrieinformationen im allgemeinen Fall vorab berücksichtigt werden müssen.

In Serienanwendungen ist jedoch die Anzahl, Positionierung, Orientierung und Geometrie der herzustellenden Bauteile innerhalb eines Bauauftrags festgelegt, sodass eine Wissensdatenbank aus (nachträglich) geprüften Bauteilen und den aufgenommenen thermischen Profilen aufgebaut werden kann. Die thermischen Profile der Indikatoren (SWA und/oder SAA) dienen dann in einem Toleranzbandverfahren als Vergleichsgrundlage für geometrisch identische Bauteile, die z. B. auf unterschiedlichen Produktionsanlagen, mit unterschiedlichen Prozessparametern oder unter unterschiedlichen Prozessrandbedingungen gefertigt wurden und entsprechend andere Qualitätsausprägungen aufweisen können.

Die Profilerfassung der Indikatoren über den Prozessverlauf kann in diesem Zusammenhang auch als 3D-Qualitätsprotokoll angesehen werden (vgl. Abdel-

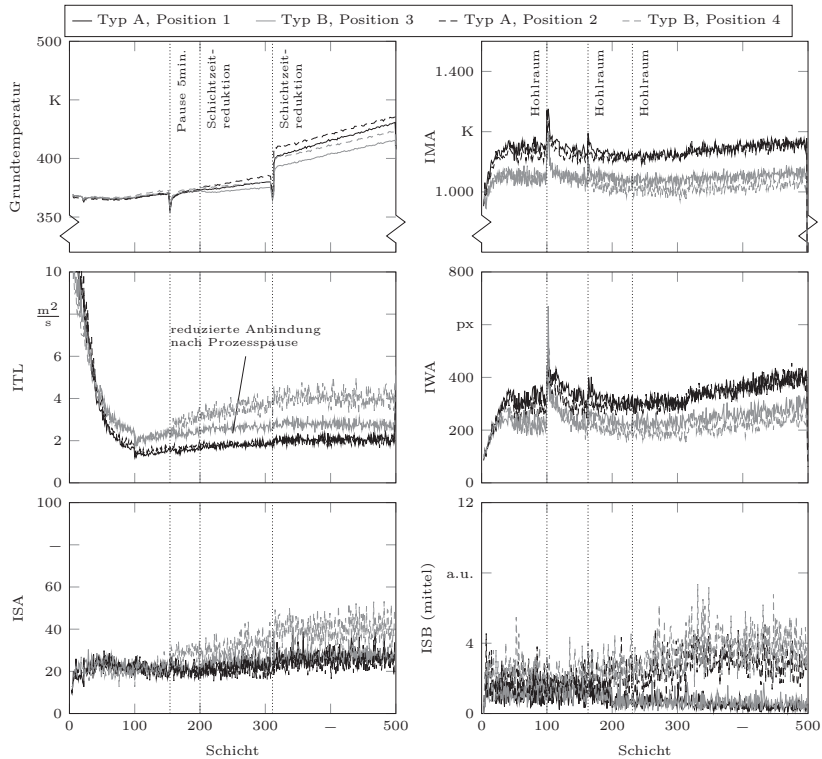
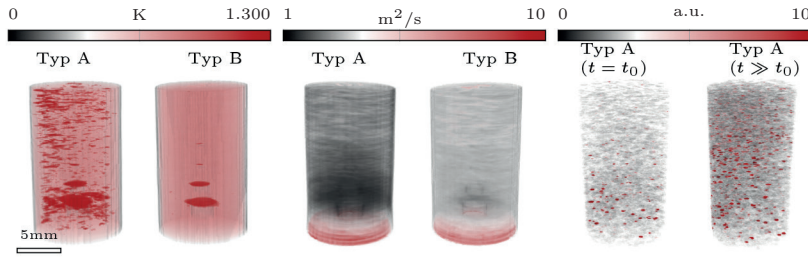


Abbildung 6.22: Thermische 2D-Profilerfassung des Aufbauprozesses für geometrisch identische Bauteile (Zylindergeometrie). Standardbelichtungsparameter; Typ A: $v = 850\,\mathrm{mm/s}$, Typ B: $v = 1200\,\mathrm{mm/s}$). Nach einer Prozesspause ist die Anbindung einer einzelnen Probe reduziert.

RAHMAN & STARR (2014)). Mit den Korrelationen aus Unterabschnitt 6.5.2 ist nicht nur eine reine Klassifizierung des Prozesslaufs in „innerhalb“/„außerhalb“ des Toleranzbandes möglich, sondern auch eine Prognose, in welche Richtung sich die Qualitätsmerkmale bei Über- bzw. Unterschreiten der jeweiligen Schwelle entwickeln. Die Umkehrung des Sachverhalts – eine Festlegung der späteren Qualitätseigenschaften durch Schwellwerte – kann dagegen nur bedingt erfolgen, da nicht notwendigerweise eine Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen diesen Größen vorherrscht. Nach WIESEMANN (2004) ist die Profilierung auch von Nutzen, wenn keine Fehler gefunden werden, nämlich dann, wenn es darum geht, Anforderungen von internationalen QM-Systemen zu erfüllen.



(a) Maximaltemperatur (IMA)

(b) Effektive Temperaturleitfähigkeit (ITL)

(c) Spritzerbelegung (ISB), unterschiedliche Belichtungszeitpunkte

Abbildung 6.23: Thermische 3D-Profilerfassung des Aufbauprozesses geometrisch identischer Bauteile (Zylindergeometrie mit Hohlräumen)

Abbildung 6.22 und Abbildung 6.23 zeigen beispielhaft die thermischen Profile (SWA bzw. SAA) geometrisch identischer Bauteile, die jedoch unter unterschiedlichen Prozessrandbedingungen hergestellt wurden. Je nach gewähltem Parametersatz sind veränderte Maximaltemperaturen und effektive Temperaturleitfähigkeiten unterscheidbar. Wechselseitige Einflüsse der Bauteile sind beispielsweise anhand der Grundtemperaturen und der Spritzerbelegung erkennbar. Mit der Belichtungsreihenfolge und der Anzahl der Bauteile im Bauraum variieren diese Indikatoren. Für die betrachtete Probengeometrie wirkt sich dieser Umstand jedoch nicht unmittelbar auf die Qualitätsmerkmale aus. Anhand konventioneller CT-Untersuchungen sind keine strukturellen Unterschiede in Form eines höheren FFA nachweisbar, sodass die Schwellwerte für eine Fehlererkennung entsprechend hoch gewählt werden können.

6.6 Anwendungsbeispiele

6.6.1 Delamination

Delaminationen und Risse sind auf vorherrschende Eigenspannungen zurückzuführen, die durch den schichtweisen Aufbau und lokale Temperaturgradienten entstehen. Treten diese Delaminationen bzw. Risse während des Aufbauprozesses auf, kann es zu Maß- und Formabweichungen, Beschichtungsproblemen oder Prozessabbrüchen kommen (vgl. Abschnitt 4.4, Unterabschnitt 5.4.3). Abbildung 6.24 zeigt die Erkennung einer verborgenen Delamination, die im Laufe des Fertigungsprozesses an einer Sollbruchstelle entstanden ist.

Als Detektionssignal wurden verschiedene Indikatoren verwendet. Unmittelbar oberhalb der Sollbruchstelle weichen die Indikatoren versuchsbedingt von ihrem Referenzwert ab, erreichen ihr Ausgangsniveau jedoch aufgrund von

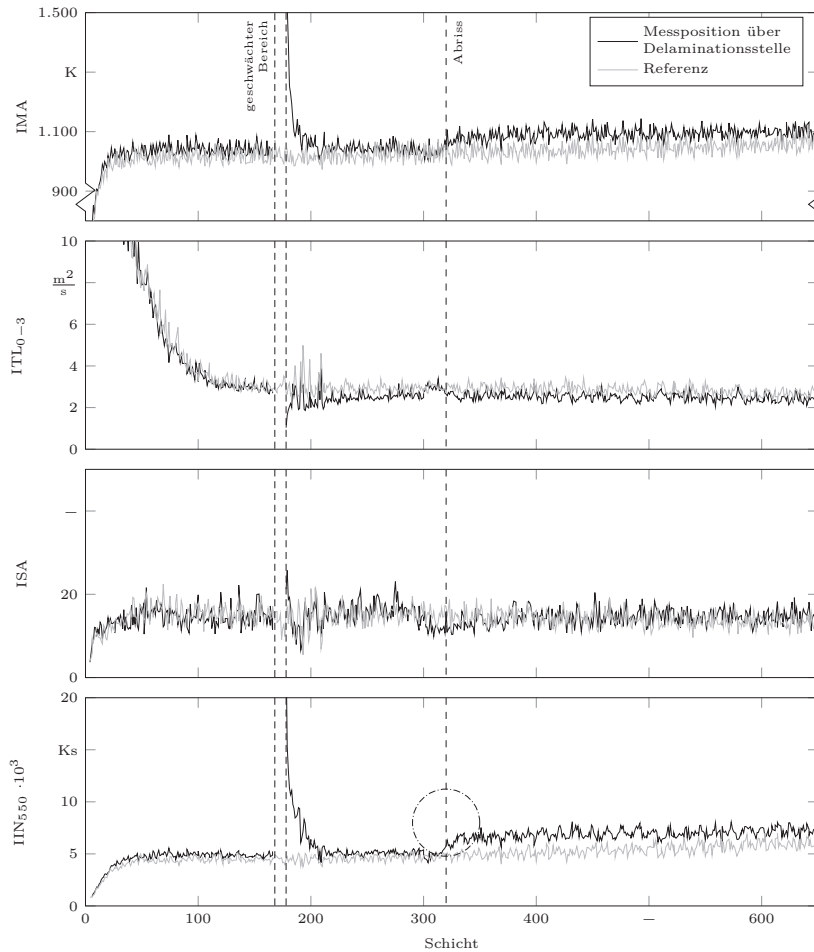


Abbildung 6.24: Verläufe der Indikatoren bei Delamination eines Primitivkörpers an einer Sollbruchstelle während des Bauprozesses. Die Sollbruchstelle bestand aus einer 300 µm hohen Stützstruktur, die in einer Bauhöhe von 5 mm (167 Schichten) eingearbeitet war. Dadurch wurde die Schichtanbindung herabgesetzt und trotzdem eine ausreichende Wärmeleitung gewährleistet.

Homogenisierungseffekten innerhalb weniger Schichten wieder. Durch den Aufbau weiterer Schichten nehmen die Spannungen an der Sollbruchstelle zu. In Schicht 320 – 4,3 mm über der Sollbruchstelle – kommt es dann zu einer schlei-

chenden Ablösung an der verborgenen Sollbruchstelle: Die Maximaltemperatur und das Temperaturintegral steigen an, die effektive Temperaturleitfähigkeit fällt geringfügig ab. Die verborgene Delamination wurde dadurch frühzeitig erkannt. Abbildung 6.25 zeigt den entstandenen Riss an dem untersuchten Primitivkörper.

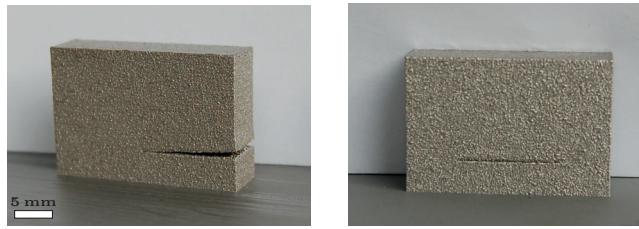


Abbildung 6.25: Primitivkörper mit eingebrachter Sollbruchstelle; links: Randposition der Fehlstelle mit Delamination; rechts: Mittenposition der Fehlstelle ohne Delamination

6.6.2 Fehlerhafte Supportanbindung

Die Supportauslegung beeinflusst nach Kapitel 2 die Wärmeabfuhr im Prozess. Bei ungenügender Anbindung der Supportstruktur an das Bauteil bzw. die Substratplatte kann es zu einem Teil- oder Vollabriss kommen, der den weiteren Aufbauprozess beeinträchtigt oder unmöglich macht. In Abbildung 6.26 sind ausgewählte Indikatoren für den Aufbau einer komplexen Geometrie mit unterschiedlicher Supportauslegung im Rahmen der SWA aufgezeigt.

In Bauprozess A bestand der Support aus einzelnen Stützen, die untereinander nicht verbunden sind (Stützensupport), in Prozess B aus dünnen Wänden, die eine feste Verbindung untereinander aufweisen (Wandsupport). Nach anfänglichem Normalprozess riss die Supportstruktur in Prozess A ab und führte in Teilbereichen des Bauteils zu erheblichen Wärmestauungen. Die nachfolgenden Schichten wurden teils angebunden, teils vollständig wieder abgetragen, sodass es zu einer ausgeprägten Variation der Indikatoren kam. Die maximal gemessene Temperatur stieg in diesem Bereich um bis zu 800 °C an, während die effektive Temperaturleitfähigkeit auf die Hälfte im Vergleich zu Prozess B absank. Der Wärmestau in Teilbereichen des Bauteils verursachte zudem eine erhöhte Spritzeraktivität, die sich erst kurz vor Ende des Prozesses an die aus Prozess B annäherte.

Der Indikator *Temperaturintegral* (IIN), der im Wesentlichen der Integration aller Sensordaten pro Schicht entspricht, zeigt den deutlichsten Unterschied der beiden Prozesse auf. In dem Pulverbett herrschten in Prozess A auch in den Belichtungspausen Temperaturen oberhalb der Integrationsschwelle (hier

550 °C) vor, sodass diese kontinuierlich aufsummiert wurden und das Signal entsprechend ansteigen ließen.

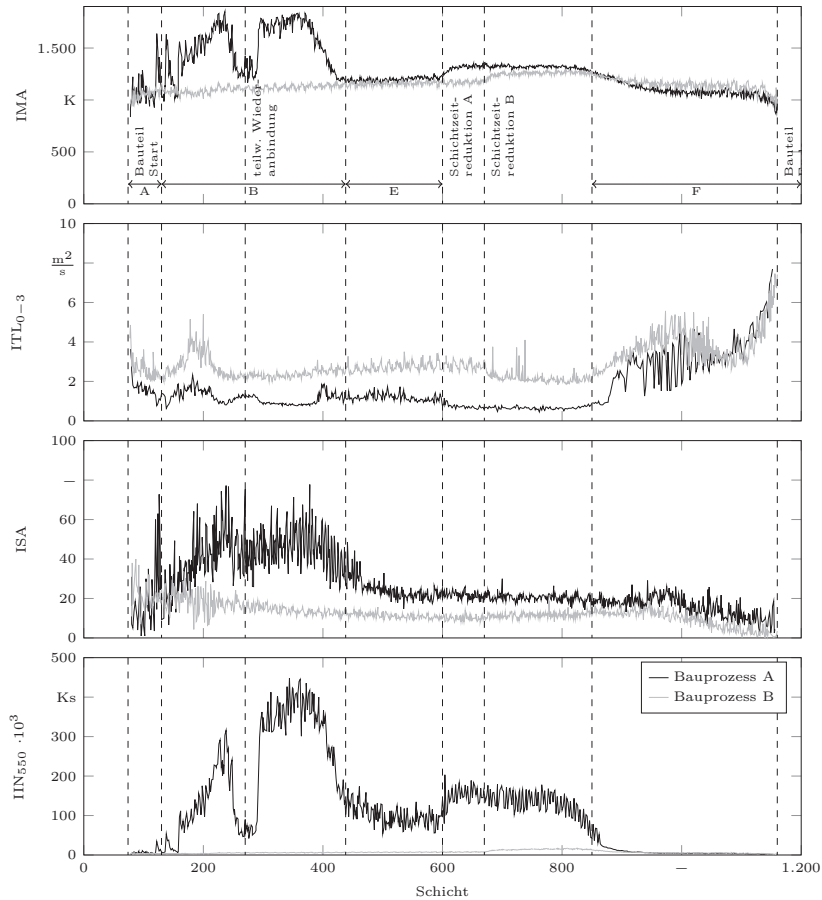
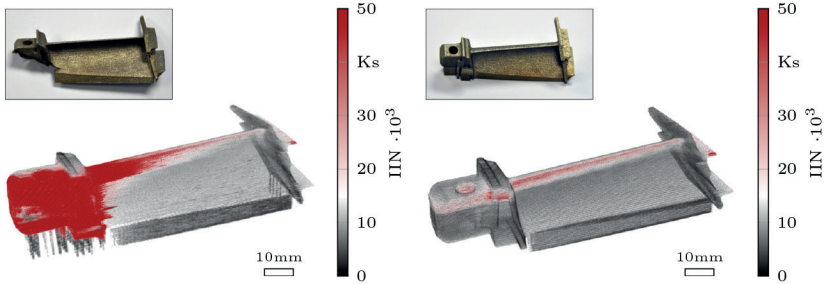


Abbildung 6.26: Thermische 2D-Profilerfassung zweier Bauaufträge für ein identisches Bauteil mit unterschiedlicher Supportauslegung (Schaufelgeometrie) anhand ausgewählter Indikatoren

In Abbildung 6.27 werden die beiden Bauprozesse im Rahmen der SAA verglichen. Anhand des gleichen Indikators lassen sich die Bereiche mit ungenügender Supportanbindung identifizieren. An diesen Stellen weicht die Ist-Geometrie erheblich von der Soll-Geometrie ab.



(a) Prozess A mit Stützensupport

(b) Prozess B mit Wandsupport (nicht dargestellt)

Abbildung 6.27: Thermische 3D-Profilerfassung (Indikator IIN) einer Schaufelgeometrie, die mit unterschiedlichen Stützstrukturen aufgebaut wurde

6.7 Zusammenfassung

Dieses Kapitel hat die Möglichkeiten einer schichtweisen Prozessüberwachung beim SLM durch Thermografie aufgezeigt. Im Vergleich zu einer Betrachtung des Prozesses im sichtbaren Wellenlängenbereich können dadurch zusätzliche Informationen über den Prozesszustand extrahiert werden. In dem vorgestellten Ansatz werden aus den orts- und zeitaufgelösten Sensordaten Schichtbilder abgeleitet, die im Grunde eine Landkarte mit Indikatorwerten darstellen. Die Auswahl und Validierung geeigneter Indikatoren ist wesentlich durch die Oberflächeneigenschaften der verfestigten Flächen bedingt, da es zu variablen Emissionseigenschaften und Orientierungsabhängigkeiten kommt, die das nutzbare Signal beeinträchtigen.

Zur Erkennung von globalen Prozessabweichungen bzw. zur thermischen Profilierung wurden daher mehrere Indikatoren betrachtet, die teilweise auf unterschiedlichen physikalischen Aspekten gründen. Anhand des kurzzeitigen Temperaturanstieges sind auch lokale/eng begrenzte Fehler und Unregelmäßigkeiten für die thermografische Überwachung zugänglich. In beiden Fällen (schichtaufgelöste Auswertung – SAA bzw. schichtweise Auswertung – SWA) ist für eine eindeutige Unterscheidung jedoch immer die Bauteilgeometrie mit einzubeziehen. Inwiefern durch die erkannten Abweichungen der Indikatorwerte auf die resultierende Bauteilqualität geschlossen werden kann, ist nicht allgemein zu beantworten. Aus Korrelationsanalysen sind zwar grundlegende Abhängigkeiten und Tendenzen erkennbar, eine Quantifizierung der zu erwartenden Qualitätsmerkmale muss jedoch geometriespezifisch untersucht werden.

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

7.1 Überblick

In Kapitel 6 wurden die technischen Potenziale eines schichtweisen Überwachungssystems für den SLM-Prozess diskutiert. Die wirtschaftlichen Gesichtspunkte des Einsatzes einer Prozessüberwachung sollen im Folgenden betrachtet werden. Anhand zweier Anwendungsszenarien werden die Nutzeneffekte und Aufwände abgeschätzt, die sich durch den Einsatz einer schichtweisen In-Process-Überwachungslösung ergeben.

Die Betrachtungsweise berücksichtigt den allgemeinen Fall einer optischen, schichtweisen Überwachung nach der Methode aus Abschnitt 6.2. Die in den Abschnitten 6.3 ff. bzw. Anhang A.2 beschriebene thermografische Umsetzung stellt eine mögliche Realisierung davon dar, die über die Bewertung der Leistungsfähigkeit mit anderen Umsetzungen verglichen werden kann.

7.2 Wirtschaftliche Potenziale

Ziel einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist es, Investitionsentscheidungen zu beurteilen und die Wirkungen von Investitionsvorhaben zu überprüfen (Wöhe & Döring 2010). Während die grundlegenden Produktionskosten für additiv hergestellte Bauteile bei diversen Autoren eingehend diskutiert werden (vgl. Atzeni et al. (2010) und Zäh (2006)), bleiben die wirtschaftlichen Aspekte einer Prozessüberwachung beim SLM und deren Auswirkung auf die Produktionskosten in der Literatur weitgehend unbeachtet. Ein Grund dafür ist, dass sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum aktuelle Zeitpunkt noch auf die technische Realisierung von Prozessüberwachungssystemen konzentrieren, ihr produktiver Einsatz in der Additiven Fertigung ist dementsprechend gering[1].

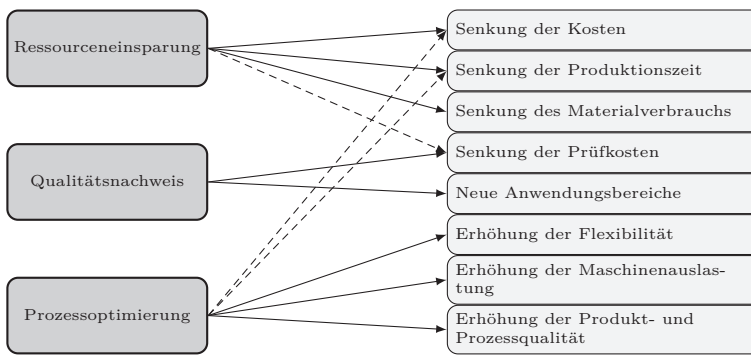


Abbildung 7.1: Potenziale einer In-Process-Überwachung beim SLM

[1] Anwenderbefragung im Rahmen einer Abschlussarbeit, vgl. Waldmann (2014)

Die wirtschaftlichen Effekte, die sich aus dem Einsatz einer In-Process-Überwachung ergeben, können unter folgenden drei Potenzialen zusammengefasst werden (Abbildung 7.1):

- Ressourceneinsparung: Bedingt durch den schichtweisen Aufbau beim SLM können Fehler und Unregelmäßigkeiten frühzeitig im Prozessverlauf erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Ein frühzeitiger Abbruch des gesamten Bauauftrags oder einzelner Teile davon reduziert in diesem Fall den unnötigen Ressourcenverbrauch und spart Material- und Maschinenkosten ein. Des Weiteren fallen für die betroffenen Aufträge/Teile keine Nacharbeits- oder Prüfkosten im Post-Process an, da die Fehler schon während des Herstellprozesses entdeckt werden. Handelt es sich dagegen um „i.O“-Bauteile bzw. -Bauaufträge, wird der nachgelagerte Prüfaufwand reduziert, da in einem gewissen Maße Vorwissen aus der In-Process-Überwachung bereits vorhanden ist.
- Qualitätsnachweis und Dokumentation: Je nach Branche und Anwendungsfeld werden Qualitätsnachweise und Dokumentationen für Bauteile vorgeschrieben oder von dem Kunden eingefordert. Dies trifft im besonderen Maße auf die Bereiche Luft- und Raumfahrttechnik und Medizintechnik zu, in denen die additive Fertigungstechnik zunehmend verbreitet ist (vgl. Kapitel 2). Mit einer In-Process-Überwachung wird ein detaillierter Qualitätsnachweis schon während des Prozesses etabliert. Auf diese Weise können durch den Anwender neue Märkte erschlossen und bestehende Märkte besser durchdrungen werden.
- Prozessoptimierung: Die optische In-Process-Überwachung und im Speziellen die thermografische Überwachung besitzen das Potenzial, den Aufwand für die Prozessentwicklung und Prozessoptimierung zu verringern. Dies ist zum einen vor dem Hintergrund einer Material- und/oder Prozessparameterentwicklung zu sehen und zum anderen vor dem Hintergrund einer Einzelteilfertigung. Für Letztere ist die bauteilspezifische Orientierung und Supportauslegung oftmals durch ein iteratives Vorgehen gekennzeichnet, das mit einem hohen Ressourcen- und Zeitaufwand einhergeht. Durch die kontinuierliche Überwachung und das erhöhte Prozessverständnis können diese Aufwände reduziert und eine geringere Markteinführungszeit erzielt werden.

7.3 Kostenbetrachtung

Nachfolgend werden diese Potenziale im Rahmen von zwei Anwendungsszenarien beispielhaft bewertet. Als Grundlage dienen die Annahmen über die Maschinenstundensätze aus Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1: Maschinenstundensatzberechnung für eine Additive Fertigungsanlage (FA) und ein thermografisches Überwachungssystem (ÜS) in Anlehnung an VDI 3258-1

Bezeichnung	**Formel (-zeichen)**	**Einheit**	**FA**	**ÜS**	**Quelle**
Wiederbeschaff.-wert	W_W	€	480 000,00	45 000,00	Hersteller
Nutzungsdauer	d_n	a	5	8	AfA-Tab.[a]
Arbeitszeit/Jahr	t_a	h/a	6000	6000	Annahme
Verfügbarkeit	p_v	%	95	100	Annahme
Abschreibung	$k_A = W_W \cdot 1/(d_n t_a p_v)$	**€/h**	**16,84**	**0,94**	-
Instandhalt.-anteil	p_i	%	5	2	Annahme
Instandhaltung	$k_I = W_W \cdot p_i/(d_n t_a)$	**€/h**	**0,80**	**0,02**	-
Flächenbedarf	F_a	m^2	18	-	Hersteller
Betriebskosten/Fläche	K_a	€/m^2	200,00	-	Annahme
Raumkosten	$k_R = F_a K_a / t_a$	**€/h**	**0,60**	**0,00**	-
kalk. Zinssatz	z_k	%	3	3	Annahme
kalk. Zinskosten	$k_Z = W_W \cdot z_k/(2 d_n t_a)$	**€/h**	**0,60**	**0,01**	-
Nennleistung	P_n	kW	3	0,2	Annahme
Strompreis	K_s	€/kWh	0,19	0,19	Annahme
Nutzungsfaktor	p_n	%	90	90	Annahme
Energiekosten	$k_E = P_n K_s p_n$	**€/h**	**0,51**	**0,03**	-
Schutzgaspreis	K_g	€/m^3	0,40	-	Annahme
Gasverbrauch	V_g	m^3/h	3	-	Annahme
Betriebsstoffe	$k_B = K_g V_g$	**€/h**	**1,20**	**-**	-
Maschinen-stundensatz	$k_{MA/MU} = k_A + k_I + k_R + k_Z + k_E + k_B$	**€/h**	**20,20**	**1,00**	-

[a] Bundesministerium für Finanzen (2012)

Tabelle 7.2: Rahmenbedingungen für die betrachteten Szenarien. Es wird jeweils von einer Produktionsanlage ausgegangen.

Bezeichnung	**Formel (-zeichen)**	**Einheit**	**Wert**
Materialdichte	ρ	g/cm^3	8,19
Bauteilmasse	m_{BT}	g	800
Bauteile/Baujob	N_B	St.	5
Materialkosten	K_p	€/kg	120,00
Kostensatz Wärmebehandlung (WB)	k_{WB}	€/h	15,00
Kostensatz Nachbearbeitung (NB)	k_{NB}	€/h	60,00
Kostensatz Qualitätssicherung (QS)	k_{QS}	€/h	80,00

In einem ersten Szenario wird von einem Industrieunternehmen in der Luftfahrtbranche ausgegangen, das als Zulieferer für Triebwerkskomponenten die additive Fertigung im Serienbetrieb einsetzt. Bei dem zweiten Szenario handelt es sich dagegen um einen Dienstleistungsbetrieb, der täglich mit neuen Bauteilgeometrien und Baujobkonfigurationen konfrontiert ist. Zum Vergleich werden die Materialdaten und Rahmenbedingungen aus Tabelle 7.2 zugrunde gelegt.

Serienfertigung Für die Serienfertigung in dem Luftfahrtunternehmen seien die Bauaufträge festgelegt und auf der vorhandenen Produktionsanlage erprobt, sodass von einer geringen Ausschussquote ausgegangen werden kann. Die Prozesskette zur Herstellung der Teile umfasse den additiven Aufbau, eine Wärmebehandlung, die Nacharbeit zur Herstellung geometrischer Merkmale und eine abschließende Qualitätssicherung. Durch den Einsatz einer schichtweisen In-Process-Überwachung kann ein Teil des Qualitätsnachweises schon während des Bauprozesses erbracht werden und der Aufwand für die Qualitätssicherung reduziert werden. Durch die Fehlerfrüherkennung können zudem ganze Prozessschritte für die fehlerhaften Teile eingespart werden. Tabelle 7.3 zeigt eine entsprechende Überschlagsrechnung.

Unter diesen Annahmen werden die Ausschussteile mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % schon während des Prozesses erkannt. Den wesentlichen Beitrag zu

Tabelle 7.3: Serienfertigung: Der Ausschuss erfolgt nach der Qualitätssicherung bzw. in der Mitte des Bauprozesses bei frühzeitiger Fehlererkennung

Bezeichnung	**Formel(-zeichen)**	**Einheit**	**ohne ÜS**	**mit ÜS**
Produktionsmenge	M_P	St.	200	200
Ausschussquote	p_a	%	5	5
Früherkennungsquote	p_f	%	0	50
Baurate	r_B	cm^3/h	15	15
Dauer WB	t_{WB}	h/Los	6	6
Dauer NB	t_{NB}	h/St.	2	2
Dauer QS	t_{QS}	h/St.	3	1,5
Bauzeit/Baujob	$t_{BJ}=(1-\frac{1}{2}p_A p_F)m_{BT}N_B/(\rho r_B)$	h/Bauj.	32,56	32,15
Fertigteile	$N_T=1/(M_P(1-p_A))$	St.	190	190
Kosten add. Fertig.	$K_A=M_P t_{BJ}/(N_B N_T)\cdot(k_{MA}+(k_{MU}))$	€/St.	138,43	143,50
Kosten Material	$K_M=(1-\frac{1}{2}p_a p_f)M_p m_{BT}/N_t\cdot K_p$	€/St.	101,05	99,79
Kosten WB	$K_{WB}=(1-p_a p_f)M_p t_{WB}/(N_B N_T)\cdot k_{WB}$	€/St.	18,95	18,47
Kosten NB	$K_{NB}=(1-p_a p_f)M_p t_{NB}/N_t\cdot k_{NB}$	€/St.	126,32	123,16
Kosten QS	$K_{QS}=(1-p_a p_f)M_p t_{QS}/N_t\cdot k_{QS}$	€/St.	252,63	123,16
Stückkosten	$\boldsymbol{K=K_A+K_M+K_{WB}+K_{NB}+K_{QS}}$	**€/St.**	**637,38**	**508,08**

der Stückkostenreduktion von 20 % leistet in diesem Fall jedoch der reduzierte Aufwand zur nachgelagerten Qualitätssicherung.

Dienstleister Bei dem Dienstleister wird von der gleichen Grundkonfiguration ausgegangen, ein Unterschied bestehe jedoch in der Prozesskette. Nach dem additiven Aufbau erfolge eine Wärmebehandlung zur Spannungsreduktion, die Abtrennung der Bauteile von dem Bauträger und eine Sichtprüfung der Bauteile. Vor jedem Bauprozess werden die Bauteile individuell im Bauraum positioniert, eine geeignete Stützstruktur ausgelegt und die Aufbauparameter angepasst. Dieser manuelle, erfahrungsbasierte Vorgang erfordert mehrere Anläufe, um die Bauteile prozesssicher herzustellen (höhere Ausschussquote).

Mit dem Einsatz eines schichtweisen In-Process-Überwachungssystems kann dieser Aufwand reduziert werden, indem Prozesswissen z. B. über geometriebedingte Wärmestauungen und erhöhte Spritzeraktivität in die Prozessauslegung für nachfolgende Prozesse eingeht. Zum einen ist dadurch eine Reduktion der Iterationsschleifen möglich, zum anderen können die Prozessparameter weiter optimiert werden. Tabelle 7.4 zeigt eine entsprechende Überschlagsrechnung.

Die Reduktion der Iterationsschleifen äußert sich in einer geringeren Ausschussquote. Einen wesentlichen Beitrag zur Senkung der Stückkosten um insgesamt 9 % leistet zudem die Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit durch optimierte Parameter. Darüber hinaus erhöht der Dienstleister durch einen

Tabelle 7.4: Dienstleistungsbetrieb: Durch das Überwachungssystem werden der Absatz und die Baurate gesteigert

Bezeichnung	**Formel(-zeichen)**	**Einheit**	**ohne ÜS**	**mit ÜS**
Produktionsmenge	M_P	St.	200	220
Ausschussquote	p_a	%	10	5
Früherkennungsquote	p_f	%	0	50
Baurate	r_B	cm^3/h	15	16,5
Dauer WB	t_{WB}	h/Los	3	3
Dauer NB	t_{NB}	h/St.	0,2	0,2
Dauer QS	t_{QS}	h/St.	0,1	0,1
Bauzeit/Baujob	$t_{BJ}=(1-\frac{1}{2}p_a p_f)\times\ m_{BT}N_B/(\rho r_B)$	h/Bauj.	32,56	29,23
Fertigteile	$N_T=1/(M_P(1-p_a))$	St.	180	209
Kosten add. Fertig.	$K_a=M_P t_{BJ}/(N_B N_T)\cdot(k_{MA}+(k_{MU}))$	€/St.	146,12	130,46
Kosten Material	$K_M=(1-\frac{1}{2}p_a p_f)M_P m_{BT}/N_T\cdot K_p$	€/St.	106,67	99,79
Kosten WB	$K_{WB}=(1-p_a p_f)M_p t_{WB}/(N_B N_T)\cdot k_{WB}$	€/St.	10,00	9,24
Kosten NB	$K_{NB}=(1-p_a p_f)M_p t_{NB}/N_T\cdot k_{NB}$	€/St.	13,33	12,32
Kosten QS	$K_{QS}=(1-p_a p_f)M_P t_{QS}/N_T\cdot k_{QS}$	€/St.	8,89	8,21
Stückkosten	$K=K_A+K_M+K_{WB}+K_{NB}+K_{QS}$	**€/St.**	**285,01**	**260,01**

Qualitätsnachweis seine Marktdurchdringung und kann neue Marktsegmente bedienen.

Aus der Betrachtung der beiden Szenarien lässt sich festhalten, dass je nach Prozesskette und Produktionsumgebung eine Reduktion der Produktionskosten realisierbar ist. Die Amortisation der Investition in eine In-Process-Überwachung muss jedoch anwendungsspezifisch betrachtet werden.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Qualitätssicherung des SLM-Prozesses durch eine schichtweise Überwachung. Anhand von Prozessanalysen werden die Haupteinflussgrößen charakterisiert und das thermische Verhalten im Prozess studiert. Die Untersuchungen dienten als Grundlage für die Konzeption und Integration einer Off-axis-Überwachung, mit der das Baufeld zu jedem Zeitpunkt aus einer festen Position erfasst wird. Es wird eine Methode zur Datenableitung, Indikatorbildung und -bewertung vorgestellt, die für die Verwendung optischer Sensoren geeignet ist. In der konkreten Umsetzung fokussiert die Arbeit eine thermografische Überwachung im LWIR-Bereich und geht dabei auf die sich ergebenden Randbedingungen hinsichtlich Auflösung, Detektionsfähigkeit und Temperaturbestimmung ein.

Durch die thermografische Überwachung sind diverse Prozessphänomene zugänglich, die mit der Prozessstabilität und der erzeugten Bauteilqualität in Verbindung gebracht werden können. Das thermische Verhalten im SLM-Prozess wird im Wesentlichen von der Bauteilgeometrie und der Belichtungsstrategie dominiert. Es stellte sich heraus, dass die qualitätsrelevanten Aspekte durch eine verzögerte Wärmeabfuhr gekennzeichnet sind, wie sie beispielsweise an Fehlstellen und überhängenden Bauteilbereichen oder bei lokal überhöhten Schichtdicken auftritt.

Um die Thematik umfänglich zu erfassen, gibt die Dissertation zunächst einen grundlegenden Einblick in den aktuellen Stand der Forschung und Technik im Bereich des Laserstrahlschmelzens (vgl. Kapitel 2). Mit ergänzenden Prozessanalysen in Kapitel 4 werden darauf aufbauend Qualitätsmerkmale und deren Abhängigkeiten von diversen Prozessparametern untersucht. Die Ableitung und Einteilung von prozessspezifischen Fehlerbildern diente schließlich als Basis für die Umsetzung einer In-Process-Überwachung. In Kapitel 5 werden hierzu diverse thermische Effekte betrachtet und deren Einfluss auf die resultierende Bauteilqualität erörtert. Durch vereinfachte thermische Modelle des Prozesses wird darüber hinaus ein Bezug zwischen der theoretischen Temperaturentwicklung und der real messbaren Temperatur hergestellt.

Für eine kontinuierliche Überwachung globaler Prozessparameter und lokaler Unregelmäßigkeiten werden in Kapitel 6 unterschiedliche Indikatoren, die aus den Rohdaten des Überwachungssystems in einem schichtweisen Ansatz abgeleitet werden, herangezogen. Es entstehen sog. kumulierte Schichtbilder, die die thermischen Informationen einer prozessierten Schicht verdichten. Für die Analyse und Interpretation dieser Daten wird zwischen einer schichtweisen und einer schichtaufgelösten Auswertung unterschieden. Der erste Fall (SWA) ermöglicht im Wesentlichen eine Überwachung nach dem Prinzip der Qualitätsregelkarten, indem die Indikatorwerte pro Schicht und Bauteil gemittelt werden. Das so entstehende thermische Profil erlaubt die Definition

von Schwellwerten, die bei Über- oder Unterschreitung auf eine unzureichende Qualität der betrachteten Schicht hinweisen. Der thermische Haushalt wird somit laufend erfasst und dient der Vergleichbarkeit von einzelnen Bauteilen bzw. ganzen Bauaufträgen.

Eine höhere Detaillierungsebene wird durch die Betrachtung der schichtaufgelösten Daten im Rahmen der SAA erreicht. Der Schwellwertvergleich erfolgt dann pixelweise und nicht schicht- bzw- bauteilweise. Es entsteht eine thermische Tomografie des hergestellten Bauteils, die Auskunft darüber gibt, an welchen Stellen Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten aufgetreten sind.

Die untersuchten Indikatoren und Auswerteschritte stellen eine Auswahl dar, die systemabhängig und nutzerspezifisch erweitert werden kann. Für die in dieser Arbeit diskutierten Indikatoren lassen sich mehrere Randbedingungen ausmachen, die auf die Indikatorbildung und -bewertung Einfluss nehmen. Eine zentrale Rolle kommt hierbei der raupenförmigen Oberflächenstruktur von verfestigten Flächen zu. Sie führt zu richtungsabhängigen Messwerten und erschwert die genaue Temperaturbestimmung vor allem bei tiefen Temperaturen. Das Signal-Rausch-Verhältnis für thermografisch ermittelte Indikatoren fällt u. a. aus diesem Grund gering aus (Faktor 5 bis 10). Auf der anderen Seite können die variablen Emissionseigenschaften der Oberfläche genutzt werden, um verborgene Fehler und Unregelmäßigkeiten direkt anhand der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen sichtbar zu machen.

Die Arbeit schließt mit einer Betrachtung der unmittelbaren wirtschaftlichen Potenziale der In-Process-Überwachung. Zum einen lässt sich durch die Überwachung der nachgelagerte Qualitätssicherungsaufwand reduzieren, zum anderen können Material- und Prozesskosten eingespart werden. Die monetäre Bewertung dieser und weiterer Potenziale erfolgte am Beispiel eines hypothetischen Dienstleistungsunternehmens und eines ebenfalls hypothetischen Serienproduzenten.

8.2 Ausblick

Für eine thermische Überwachung des Prozesses zeichnen sich diverse Indikatoren, darunter die Temperaturintegration (IIN) und die Spritzeraktivität (ISA), als praktikabel aus. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich dabei hauptsächlich mit der Fehlererkennung im Orts- bzw. Zeitbereich. Für eine automatisierte und frühzeitige Erkennung lokaler Fehler im Rahmen der SWA können zukünftig intelligente Algorithmen (z. B. im Frequenzraum) und wissensbasierte Systeme zum Einsatz kommen, die die Detektionsgrenzen weiter reduzieren und die Erkennungssicherheit steigern.

Zu einem längerfristigen Ausblick zählt die Überführung des vorliegenden schichtweisen Überwachungssystems in ein Prozessregelsystem. Auf Basis der

ermittelten Indikatorwerte gilt es dann, geeignete Regelstrecken und Stellgrößen zu identifizieren, die die Qualität schichtweise bzw. bereichsweise sicherstellen. Die Entwicklung muss jedoch immer vor dem Hintergrund des späteren Einsatzgebietes gesehen werden. In Serienanwendungen kann die Anpassung von Prozessparametern im laufenden Betrieb aus Zulassungsgründen untersagt sein. In allen anderen Fällen, z. B. Entwicklungs- und Vorserienanwendungen, stellt die Regelung dagegen einen Wettberwerbsvorteil dar, da der Ausschuss reduziert wird und die Produktionszeit weiter gesenkt werden kann.

Abdelrahman & Starr 2014
Abdelrahman, M.; Starr, T. L.: Layerwise Monitoring of Polymer Laser Sintering Using Thermal Imaging. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 25th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 4.–6. Aug. 2014. University of Texas at Austin 2014.

Abele & Reinhart 2011
Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag 2011. ISBN: 978-3-446-42805-8.

Abt et al. 2008
Abt, F.; Nicolosi, L.; Carl, D.; Blug, A.; Geese, M.; Dausinger, F.; Deininger, C.; Höfler, H.; Tetzlaff, R.: Closed loop control of laser welding processes with cellular neural network (CNN) cameras. In: Laser Institute of America (Hrsg.): ICALEO 2008: 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics. Orlando, FL: Laser Institute of America 2008. ISBN: 978-0-912035-12-3.

Alkahari et al. 2012
Alkahari, M. R.; Furumoto, T.; Ueda, T.; Hosokawa, A.; Tanaka, R.; Abdul Aziz, Mohd Sanusi: Thermal Conductivity of Metal Powder and Consolidated Material Fabricated via Selective Laser Melting. Key Engineering Materials 523-524 (2012) o. Nr., S. 244–249.

Allmen & Blatter 1998
Allmen, M. v.; Blatter, A.: Laser beam interactions with materials: Physical principles and applications. 2., updated ed., updated print. Berlin u. a.: Springer 1998. ISBN: 978-3-540-59401-7. (Springer Series in Materials Science 2).

Amato et al. 2012
Amato, K.; Gaytan, S.; Murr, L.; Martinez, E.; Shindo, P.; Hernandez, J.; Collins, S.; Medina, F.: Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. Acta Materialia 60 (2012) 5, S. 2229–2239.

Anam et al. 2013
Anam, M. A.; Pal, D.; Stucker, B.: Modeling and Experimantal validation of Nickel-based super alloy (Inconel 625) made using Selectie Laser Melting. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

Antonsson & Fredriksson 2005
Antonsson, T.; Fredriksson, H.: The effect of cooling rate on the solidification of INCONEL 718. Metallurgical and Materials Transactions B 36 (2005) 1, S. 85–96.

Appa Rao et al. 2004
Appa Rao, G.; Srinivas, M.; Sarma, D.: Effect of thermomechanical working on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718. Materials Science and Engineering: A 383 (2004) 2, S. 201–212.

Askeland & Fulay 2006
Askeland, D. R.; Fulay, P. P.: The science and engineering of materials. 5th ed. Southbank, Victoria, Australia: Thomson 2006. ISBN: 978-0-534-55396-8.

Atzeni et al. 2010
Atzeni, E.; Iuliano, L.; Minetola, P.; Salmi, A.: Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. Rapid Prototyping Journal 16 (2010) 5, S. 308–317.

Aubry et al. 2008
Aubry, P.; Guiraud, M.; Fabbro, R.: Process Control on Laser Cladding for Direct Manufacturing: Control of the Width and Height of the Deposited Material by Coaxial Vision. In: Laser Institute of America (Hrsg.): ICALEO 2008: 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics. Orlando, FL: Laser Institute of America 2008. ISBN: 978-0-912035-12-3.

Averyanova et al. 2012
Averyanova, M.; Cicala, E.; Bertrand, P.; Grevey, D.: Experimental design approach to optimize selective laser melting of martensitic 17-4 PH powder: part I – single laser tracks and first layer. Rapid Prototyping Journal 18 (2012) 1, S. 28–37.

Bargel & G. Schulze 2012
Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. 11., bearb. Aufl. 2012. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-17717-0. (Springer-Lehrbuch).

Bartkowiak 2010
Bartkowiak, K.: Direct laser deposition process within spectrographic analysis in situ. Physics Procedia 5 (2010) o. Nr., S. 623–629.

Barua et al. 2014
Barua, S.; Liou, F.; Newkirk, J.; Sparks, T.: Vision-based defect detection in laser metal deposition process. Rapid Prototyping Journal 20 (2014) 1, S. 77–85.

Bayle & Doubenskaia 2008
Bayle, F.; Doubenskaia, M.: Selective laser melting process monitoring with high speed infra-red camera and pyrometer. In: Proceedings of SPIE 6985: Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies. SPIE 2008, S. 698505–698508.

Bechmann et al. 2012
Bechmann, F.; Berumen, S.; Craeghs, T.; Clijsters, S.: Prozessüberwachung und Qualitätssicherung generativ gefertigter Bauteile. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2012: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 8.–9. Mai 2012.

Becker 2013
Becker, M.: Kamerabasierte Überwachung gepulster Prozess beim Laserfügen. In: Schmidt, M.; Roth, S.; Amend, P. (Hrsg.): Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik: Tagungsband des 16. Seminars LEF 2013, Fürth, 05.-06. März 2013. Bamberg: Meisenbach 2013. ISBN: 978-3-87525-343-6.

Benn & Salva 2010
Benn, R. C.; Salva, R. P.: Additively Manufactured INCONEL® Alloy 718. In: Superalloy 718 and Derivatives. John Wiley & Sons 2010, S. 455–469. ISBN: 978-1-118-49522-3.

Berger et al. 2013
Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 1. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel 2013. ISBN: 978-3-8085-5033-5. (Bibliothek des technischen Wissens).

Berumen & Bechmann 2012
Berumen, S.; Bechmann, F.: Quality Control System for the Coating Process in Laser- and Powder Bed-Based Additive Manufacturing Technologies. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

Berumen et al. 2010
Berumen, S.; Bechmann, F.; Lindner, S.; Kruth, J.-P.; Craeghs, T.: Quality control of laser- and powder bed-based Additive Manufacturing (AM) technologies. Physics Procedia 5 (2010) o. Nr., S. 617–622.

Bi et al. 2006
Bi, G.; Gasser, A.; Wissenbach, K.; Drenker, A.; Poprawe, R.: Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition. Surface and Coatings Technology 201 (2006) 6, S. 2676–2683.

Bontha et al. 2006
Bontha, S.; Klingbeil, N. W.; Kobryn, P. A.; Fraser, H. L.: Thermal process maps for predicting solidification microstructure in laser fabrication of thin-wall structures. Journal of Materials Processing Technology 178 (2006) 1-3, S. 135–142.

Borkowski & Lucas 1997
Borkowski, J. J.; Lucas, J. M.: Designs of mixed resolution for process robustness studies. Technometrics 39 (1997) 1, S. 63–70.

Brandl et al. 2008
Brandl, E.; Leyens, C.; Palm, F.; Schoberth, A.; Onteniente, P.: Wire instead of powder? Properties of additive manufactured Ti-6Al-4V for aerospace applications. In: Meyer, R. (Hrsg.): Euro-uRapid 2008: High-tech solutions and concepts; International User's Conference on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing; Proceedings; Berlin: September 23-24, 2008. Magdeburg: Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping 2008, S. 155–161. ISBN: 978-3-8167-7784-7.

Branner 2011
Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Diss. Technische Universität München (2011). München: Utz 2011. ISBN: 978-3-8316-4071-3. (Forschungsberichte iwb 246).

Brinkmann 1998
Brinkmann, J.: Beitrag zur prozeßintegrierten Qualitätsprüfung mittels Thermographie für den Aluminiumkokillenguß. Düsseldorf: VDI Verlag 1998. ISBN: 978-3-18-348302-0. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 483).

Brooke 2014
Brooke, R.: 3D printing materials report predicts 20% yearly growth to 2018. Hrsg. von TCT Magazine. ⟨`http://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/3d-printing-materials-report-predicts-20-yearly-grow/`⟩ - 20. 12. 2014.

Buchbinder et al. 2011
Buchbinder, D.; Schleifenbaum, H.; Heidrich, S.; Meiners, W.; Bültmann, J.: High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. Physics Procedia 12 (2011) o. Nr., S. 271–278.

Budzier & Gerlach 2011
Budzier, H.; Gerlach, G.: Thermische Infrarot-Sensoren für die Thermografie - Stand und Tendenzen. LIFIS ONLINE (2011) 22.03.11.

Budzier et al. 2011
Budzier, H.; Gerlach, G.; Müller, D.: Thermal infrared sensors: Theory, optimization, and practice. Chichester, U.K., West Sussex, U.K. und Hoboken, N.J.: Wiley 2011. ISBN: 978-0-470-87192-8.

Budzier et al. 2013
Budzier, H.; Krause, V.; Böhmer, S.; Gerlach, G.; Hoffmann, U.: Fast microbolometer-based infrared camera system. Hrsg. von DIAS Infrared GmbH. ⟨http://www.dias-infrared.de/pdf/p020.pdf⟩ - 13. 03. 2013.

Bugeda et al. 1999
Bugeda, G.; Cervera, M.; Lombera, G.: Numerical prediction of temperature and density distributions in selective laser sintering processes. Rapid Prototyping Journal 5 (1999) 1, S. 21–26.

Buls et al. 2014
Buls, S.; Clijsters, S.; Kruth, J.-P.: Homogenizing the melt pool intensity distribution in the SLM process through system identification and feedback control. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 25th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 4.–6. Aug. 2014. University of Texas at Austin 2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2012
Bundesministerium für Bildung und Forschung: Bundesbericht Forschung und Innovation 2012. Hrsg. von Bundesministerium für Bildung und Forschung. Bonn, Berlin. ⟨http://www.bmbf.de/pub/bufi_2012.pdf⟩ - 12. 02. 2015.

Bundesministerium für Finanzen 2012
Bundesministerium für Finanzen: AfA-Tabellen. Hrsg. von Bundesministerium für Finanzen. ⟨http://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA_Tabellen/afa_tabellen.html⟩ - 26. 03. 2015.

Bürgel 2006
Bürgel, R.: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen. 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2006. ISBN: 978-3-528-23107-1. (Studium und Praxis).

Cardaropoli et al. 2012
Cardaropoli, F.; Alfieri, V.; Caiazzo, F.; Sergi, V.: Dimensional analysis for the definition of the influence of process parameters in selective laser melting of Ti-6Al-4V alloy. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226 (2012) 7, S. 1136–1142.

Carslaw & J. C. Jaeger 1986
Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids. 2nd ed. Oxford und New York: Clarendon Press und Oxford University Press 1986. ISBN: 978-0-19-853368-9.

Chandrasekhar 1981
Chandrasekhar, S.: Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Dover ed. New York: Dover Publications 1981. ISBN: 978-0-486-64071-6.

Chivel 2013
Chivel, Y.: Optical In-Process Temperature Monitoring of Selective Laser Melting. Physics Procedia 41 (2013) o. Nr., S. 904–910.

Chivel & Smurov 2007
Chivel, Y.; Smurov, I.: SLS-process monitoring and adaptive control. In: Vollertsen, F. (Hrsg.): Lasers in manufacturing 2007: Proceedings of the Fourth International WLT-Conference Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, June 18th - 22nd, 2007. Stuttgart: AT-Fachverl. 2007, S. 553–556. ISBN: 978-3-00-021449-3.

Chivel & Smurov 2010
Chivel, Y.; Smurov, I.: On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting. Physics Procedia 5, Part B (2010) o. Nr., S. 515–521.

Chivel & Smurov 2011
Chivel, Y.; Smurov, I.: Temperature Monitoring and Overhang Layers Problem. Physics Procedia 12 (2011) o. Nr., S. 691–696.

Chivel et al. 2007
Chivel, Y.; Inyutin, A.; Vatkin, M.; Uzunbadgakov, A.; Zatiagin, D.; Orlovich, V. A.; Panchenko, V.; Scherbakov, I. A.: The system of laser sintering process monitoring and adaptive control. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Advanced Lasers and Systems 6731 (2007) 1, S. 673125.

Chung 2011
Schutzrecht: EP 1466718B1 Patent (15. 06. 2011). 3D Systems Inc. Pr.: US 41068603 A 20030409. Chung, M.: Sintering method and apparatus using thermal image feedback.

Cieslak et al. 1989
Cieslak, M. J.; Knorovsky, G. A.; Headley, T. J.; Romig, A. D. J.: The Solidification Metallurgy of Alloy 718 and Other Nb-Containing Superalloys. In: Loria, E. A. (Hrsg.): Superalloy 718: Metallurgy and applications: International symposium on the metallurgy and applications of superalloy 718: Papers. Warrendale, PA: Minerals, Metals & Materials Society 1989. ISBN: 978-0-87339-097-2.

Clijsters et al. 2012
Clijsters, S.; Craeghs, T.; Moesen, M.; Kruth, J.-P.: Optimization of thin wall structures in SLM. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

Clijsters et al. 2014
Clijsters, S.; Craeghs, T.; Buls, S.; Kempen, K.; Kruth, J.-P.: In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 75 (2014) 5-8, S. 1089–1101.

Cline & Anthony 1977
Cline, H. E.; Anthony, T. R.: Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam. Journal of Applied Physics 48 (1977) 9, S. 3895.

Concept Laser GmbH 2014
Concept Laser GmbH: QM-Module zur kontinuierlichen Überwachung des LaserCUSING® Prozesses. Hrsg. von Concept Laser GmbH. Lichtenfels. ⟨`http://concept-laser.hofmann-innovation.com/de/branchen/aerospace/qm-system.html`⟩ - 25. 01. 2014.

Craeghs, Clijsters, Yasa, Bechmann et al. 2011
Craeghs, T.; Clijsters, S.; Yasa, E.; Bechmann, F.; Berumen, S.; Kruth, J.-P.: Determination of geometrical factors in Layerwise Laser Melting using optical process monitoring. Optics and Lasers in Engineering 49 (2011) 12, S. 1440–1446.

Craeghs, Clijsters, Yasa & Kruth 2011
Craeghs, T.; Clijsters, S.; Yasa, E.; Kruth, J.-P.: Online quality control of selective laser melting. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 8.–10. Aug. 2011. University of Texas at Austin 2011.

Craeghs et al. 2010
Craeghs, T.; Bechmann, F.; Berumen, S.; Kruth, J.-P.: Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors. Physics Procedia 5 (2010) o. Nr., S. 505–514.

Craeghs et al. 2012
Craeghs, T.; Clijsters, S.; Kruth, J.-P.; Bechmann, F.; Ebert, M.-C.: Detection of Process Failures in Layerwise Laser Melting with Optical Process Monitoring. Physics Procedia 39 (2012) o. Nr., S. 753–759.

Dadbakhsh et al. 2012
Dadbakhsh, S.; Hao, L.; Sewell, N.: Effect of selective laser melting layout on the quality of stainless steel parts. Rapid Prototyping Journal 18 (2012) 3, S. 241–249.

Danjou 2010
Danjou, S.: Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Göttingen: Cuvillier 2010. ISBN: 978-3-86955-534-8.

Das 2003
Das, S.: Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals. Advanced Engineering Materials 5 (2003) 10, S. 701–711.

Davis & Klingbeil 2010
Davis, J.; Klingbeil, N. W.: Effect of Free-Edges on Melt Pool Geometry and Solidification Microstructure in Beam-Based Fabrication of Bulky 3-D Structures. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 21st Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 9.–11. Aug. 2010. University of Texas at Austin 2010.

De et al. 2003
De, A.; Walsh, C. A.; Maiti, S. K.; Bhadeshia, H. K. D. H.: Prediction of cooling rate and microstructure in laser spot welds. Science and Technology of Welding and Joining 8 (2003) 6, S. 391–399.

Delgado et al. 2012
Delgado, J.; Ciurana, J.; Rodríguez, C. A.: Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 60 (2012) 5-8, S. 601–610.

Demant et al. 2002
Demant, C.; Streicher-Abel, B.; Waszkewitz, P.: Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. 2. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 978-3-540-41977-8.

Department of Defense 2009
Department of Defense: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment: MIL-HDBK-1823A: Handbook. Hrsg. von Department of Defense. ⟨http://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A(2009).pdf⟩ - 03. 01. 2015.

E. Dietrich et al. 2007
Dietrich, E.; Schulze, A.; Weber, S.: Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion: Q-DAS Camera Konzept. München: Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-41053-4.

S. Dietrich 2009
Dietrich, S.: Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2009). Bamberg: Meisenbach 2009. ISBN: 978-3-87525-292-7. (Fertigungstechnik Erlangen 204).

Dietz et al. 1998
Dietz, C.; Jurca, M.; Schlichtermann, L.; Kogel-Hollacher, M.; Breitschwerdt, S.; Schmid, C.; Rowold, L.: Closed-loop control system for laser welding of transmission parts. In: Laser Institute of America (Hrsg.): ICALEO 1998: Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Orlando, FL: Laser Institute of America 1998.

Dilba 2011
Dilba, D.: Schnelle Schichtarbeit. MTU Report (2011) 1, S. 20–25.

DIN 5031-7
DIN 5031-7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Benennung der Wellenlängenbereiche. Berlin: Beuth 1984.

DIN ISO 2768-1
DIN ISO 2768-1: Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung. Berlin: Beuth 1991.

DIN EN ISO 8402
DIN EN ISO 8402: Qualitätsmanagement - Begriffe. Berlin: Beuth 1995.

DIN EN ISO 13919
DIN EN ISO 13919: Schweißen - Elektronen- und Laserstrahl- Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten. Berlin: Beuth 1996.

DIN 8580
DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN ISO 6507-1
DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth 2006.

DIN ISO 21747
DIN ISO 21747: Statistische Verfahren - Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen für kontinuierliche Qualitätsmerkmale. Berlin: Beuth 2007.

DIN EN 10302
DIN EN 10302: Warmfeste Stähle, Nickel- und Cobaltlegierungen. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 6892-1
DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth 2009.

Dinwiddie et al. 2013
Dinwiddie, R. B.; Dehoff, R. R.; Lloyd, P. D.; Lowe, L. E.; Ulrich, J. B.; Stockton, G. R.; Colbert, F. P.: Thermographic in-situ process monitoring of the electron-beam melting technology used in additive manufacturing. Proceedings of SPIE 8705: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV. SPIE 2013. (SPIE Proceedings 8705).

Doubenskaia et al. 2010
Doubenskaia, M.; Pavlov, M.; Chivel, Y.: Optical System for On-Line Monitoring and Temperature Control in Selective Laser Melting Technology. Key Engineering Materials 437 (2010) o. Nr., S. 458–461.

Dowden 2001
Dowden, J. M.: The mathematics of thermal modeling: An introduction to the theory of laser material processing. Boca Raton: Chapman & Hall 2001. ISBN: 978-1-58488-230-5.

Dudeck 2013
Dudeck, S. G.: Kamerabasierte In-situ-Überwachung gepulster Laserschweißprozesse. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2013). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2013. ISBN: 978-3-7315-0019-3. (Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik 6).

Duley 1983
Duley, W. W.: Laser Processing and Analysis of Materials. Boston, MA: Springer US 1983. ISBN: 978-1-4757-0195-1.

Eisen 2009
Eisen, M. A.: Optimierte Parameterfindung und prozessorientiertes Qualitätsmanagement für das Selective-Laser-Melting-Verfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen (2009). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-8827-3. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

Emmelmann et al. 2012
Emmelmann, C.; Wycisk, E.; Kranz, J.: Influence of Surface Properties on Fatigue Strength of Light Weight Structures Produced by Laser Additive Manufacturing in TiAl6V4. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

EOS GmbH 2011
EOS GmbH: EOS NickelAlloy IN718 for EOSINT M 270 Systems: Material data sheet. Hrsg. von EOS GmbH. ⟨http://www.lasersintering.com/data/Ni-IN718-M270_Material_data_sheet_11-09_en_.pdf⟩ - 05. 05. 2015.

EOS GmbH 2012
EOS GmbH: Quality Assurance for Laser Power. Hrsg. von EOS GmbH. ⟨http://www.eos.info/fileadmin/user_upload/newsletter/Bilder_9_2012/QA_Laser_Power_V1.0.pdf⟩ - 04. 05. 2015.

Eschey 2013
Eschey, C.: Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung. Diss. Technische Universität München (2013). München: Utz. ISBN: 978-3-8316-4270-0. (Forschungsberichte iwb 274).

Eschey et al. 2011
Eschey, C.; Westhäuser, S.; Zäh, M. F.: Superposed Closed-Control Loop for the Polymer Based Laser Sintering Technology. In: Spath, D.; Ilg, R.; Krause, T. (Hrsg.): International Conference on Production Research (ICPR 21): Innovation in Product and Production. Stuttgart, 31. Juli–4. Aug. 2011. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2011. ISBN: 978-3-8396-0293-5.

Ezugwu et al. 1999
Ezugwu, E. O.; Wang, Z. M.; Machado, A. R.: The machinability of nickel-based alloys: a review. Journal of Materials Processing Technology 86 (1999) 1-3, S. 1–16.

Ferrar et al. 2012
Ferrar, B.; Mullen, L.; Jones, E.; Stamp, R.; Sutcliffe, C.: Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 2, S. 355–364.

Fischer et al. 2003
Fischer, P.; Romano, V.; Weber, H. P.; Karapatis, N. P.; Boillat, E.; Glardon, R.: Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source. Acta Materialia 51 (2003) 6, S. 1651–1662.

Fulcher & Leigh 2013
Fulcher, B.; Leigh, D. K.: Effects of Laser Window Degradation on Laser Power and Distribution in Laser Sintering. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

Gaussorgues 1994
Gaussorgues, G.: Infrared thermography. English language ed. London und New York: Chapman & Hall 1994. ISBN: 978-0-412-47900-7. (Microwave technology series 5).

GE Aviation 2014
GE Aviation: GE Aviation Selects Auburn, AL for High Volume Additive Manufacturing Facility. Auburn, AL. ⟨http://www.geaviation.com/press/other/other_20140715.html⟩ - 20. 12. 2014.

Gebhardt 2007
Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. 3. Aufl. München: Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-22666-1.

Gebhardt 2012
Gebhardt, A.: Understanding additive manufacturing: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. Munich und Cincinnati: Hanser Publishers 2012. ISBN: 978-1-56990-507-4.

M. Geiger & Hohenstein 2009
Geiger, M.; Hohenstein, R.: Near-field 3D position sensing using optical fibers. Production Engineering 3 (2009) 1, S. 73–80.

W. Geiger & Kotte 2008
Geiger, W.; Kotte, W.: Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven. 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg 2008. ISBN: 978-3-8348-9429-8. (Praxis und Studium).

Glardon et al. 2001
Glardon, R.; Karapatis, N. P.; Romano, V.; Levy, G.: Influence of Nd:YAG Parameters on the Selective Laser Sintering of Metallic Powders. CIRP Annals - Manufacturing Technology 50 (2001) 1, S. 133–136.

Glückert 1992
Glückert, U.: Erfassung und Messung von Wärmestrahlung: Eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie. München: Franzis 1992. ISBN: 978-3-7723-6292-7. (Franzis-Einführung).

Göbenli 2005
Göbenli, G.: Werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen zum ein- und mehrachsigen Kriechverhalten der Nickelbasis-Superlegierungen CMSX-4 und LEK 94 oberhalb 1000 C. Diss. Ruhr-Universität Bochum (2005). ⟨`http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/GoebenliGuelcan/diss.pdf`⟩ - 03. 03. 2014.

Gong et al. 2014
Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H.; Starr, T. L.; Stucker, B.: Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. Additive Manufacturing 1-4 (2014) o. Nr., S. 87–98.

Grong 1994
Grong, Ø.: Metallurgical modelling of welding. London: Institute of Materials 1994. ISBN: 978-0-901716-37-8. (Materials modelling series no. 557).

Grünberger & Domröse 2014
Grünberger, T.; Domröse, R.: Optical In-Process Monitoring of Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Laser Technik Journal 11 (2014) 2, S. 40–42.

Grünberger et al. 2013
Grünberger, T.; Wöber, W.; Seemann, R.: Optische Prozessüberwachung bei selektiven Laserschmelzverfahren. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2013: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 14.–15. Mai 2013.

Gusarov & Kruth 2005
Gusarov, A. V.; Kruth, J.-P.: Modelling of radiation transfer in metallic powders at laser treatment. International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 16, S. 3423–3434.

Gusarov & Smurov 2010
Gusarov, A. V.; Smurov, I.: Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting. Physics Procedia 5 (2010) o. Nr., S. 381–394.

Gusarov et al. 2007
Gusarov, A. V.; Yadroitsev, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. Applied Surface Science 254 (2007) 4, S. 975–979.

Haist & Fromm 1991
Haist, F.; Fromm, H.: Qualität im Unternehmen: Prinzipien - Methoden - Techniken. 2., durchges. Aufl. München und Wien: Hanser 1991. ISBN: 978-3-446-16410-9.

Hartmann et al. 2012
Hartmann, W.; Hausotte, T.; Drummer, D.; Wudy, K.: Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 9 (2012) 1.

Hasse & Brunhuber 2001
Hasse, S.; Brunhuber, E.: Giesserei Lexikon. Ausg. 2001, 18. Aufl. Berlin: Schiele & Schön 2001. ISBN: 978-3-7949-0655-0.

Hauser et al. 1999
Hauser, C.; Childs, T. H. C.; Dalgarno, K. W.; Eane, R. B.: Atmospheric control during direct selective laser sintering of stainless steel 314S powder. In: Bourell, D. L.; Beaman, J. J.; Crawford, R. H.; Marcus, H. L.; Barlow, J. W. (Hrsg.): Proceedings of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 9.–11. Aug. 1999. University of Texas at Austin 1999.

Hauser et al. 2002
Hauser, C.; Childs, T. H. C.; Taylor, C. M.; Badrossamay, M.; Akhtar, S.; Wright, C. S.; Youseffi, M.; Xie, J.; Fox, P.; O'Neill, W.: Direct selective laser sintering of tool steel powders to high density, Part A: Effects of laser beam width and scan strategy. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 5.–7. Aug. 2002. University of Texas at Austin 2002.

Haynes 1991
Haynes, R.: Effects of porosity on the tensile strengths of sintered irons. Metal Powder Report 46 (1991) 2, S. 49–51.

Herrmann 2007
Herrmann, K.: Härteprüfung an Metallen und Kunststoffen: Grundlagen und Überblick zu modernen Verfahren. Renningen: Expert-Verl. 2007. ISBN: 978-3-8169-2550-7. (Reihe Technik).

Herwig & Moschallski 2006
Herwig, H.; Moschallski, A.: Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen, illustrierte Beispiele, Übungsaufgaben mit Musterlösungen. Wiesbaden: Vieweg 2006. ISBN: 978-3-8348-0060-2. (Studium Technik).

Hoeren & Witt 2012
Hoeren, K. P.; Witt, G.: Konstruktive Möglichkeiten und verfahrensspezifische Grenzen in der additiven Fertigung. In: Paul, L.; Stanke, G.; Heuwold, N. (Hrsg.): 3D-NordOst 2012: 15. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten. Berlin: Gesellschaft z. Förderung angewandter Informatik 2012. ISBN: 978-3-942709-07-1.

Hoffmeister 2010
Hoffmeister, J.: Beschreibung des Eigenspannungsabbaus in kugelgestrahltem Inconel 718 bei thermischer, quasistatischer und zyklischer Beanspruchung. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-8966-9. (Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik 055).

Huber 2014
Huber, S.: In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen. Diss. Technische Universität München (2014). München: Utz 2014. ISBN: 978-3-8316-4370-7. (Forschungsberichte iwb 286).

Ilschner & Singer 2010
Ilschner, B.; Singer, R. F. (Hrsg.): *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-01733-9.

Infratec GmbH 2004
Infratec GmbH: Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie. Hrsg. von Infratec GmbH. ⟨`www.thermografie.co.at/files/infratec.pdf`⟩ - 07. 07. 2015.

ISO/DIS 17296-1
ISO/DIS 17296-1: Additive manufacturing - General principles - Part 1: Terminology. Berlin: Beuth 2014.

ISO 20473
ISO 20473: Optik und Photonik - Wellenlängenbereiche. Berlin: Beuth 2007.

J. Jaeger et al. 2012
Jaeger, J.; Solas, D.; Baudin, T.; Fandeur, O.; Schmitt, J.-H.; Rey, C. et al. Inconel 718 single and multipass modelling of hot forging. In: Huron, E. S.; Reed, R. C.; Hardy, M. C.; Mills, M. J.; Montero, R. E.; Portella, P. D.; Telesman, J. (Hrsg.): Superallloys 2021: 12th international symposium on super alloys. TMS 2012.

Kar & Mazumder 1989
Kar, A.; Mazumder, J.: Three–dimensional transient thermal analysis for laser chemical vapor deposition on uniformly moving finite slabs. Journal of Applied Physics 65 (1989) 8, S. 2923–2934.

Kaufman & Rooy 2004
Kaufman, J. G.; Rooy, E. L.: Aluminum alloy castings properties: Properties, processes and applications. Materials Park, OH: ASM International 2004. ISBN: 978-0-87170-803-8.

Kelbassa et al. 2008
Kelbassa, I.; Albus, P.; Dietrich, J.; Wilkes, J.: Manufacture and repair of aero engine components using laser technology. In: Zhong, M. (Hrsg.): Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics Conference proceedings 2008. Orlando, Florida: Laser Institute of America 2008, S. 208–212. ISBN: 978-0-912035-89-5.

Keller & Ploshikhin 2014
Keller, N.; Ploshikhin, V.: New Method for Fast Predictions of Residual Stress and Deformation of AM Parts. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 25th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 4.–6. Aug. 2014. University of Texas at Austin 2014.

Kellerer & Werner 2011
Kellerer, C.; Werner, E.: Gefüge von lasergeschmolzenen Proben aus einer Ni-Basis Superlegierung. In: Schwarz, C. (Hrsg.): 1. Tag der Ingenieurin der Fakultät für Maschinenwesen der TUM 2011. Garching, 27. Okt. 2011. Garching: Technische Universität München 2011.

Kempen et al. 2013
Kempen, K.; Thijs, L.; Buls, S.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: Lowering Thermal Gradients in Selective Laser Melting by Pre-Heating the Baseplate. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

King 2013
King, W. E.: Observation of "Keyhole Mode" Laser Melting in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

King et al. 2014
King, W. E.; Barth, H. D.; Castillo, V. M.; Gallegos, G. F.; Gibbs, J. W.; Hahn, D. E.; Kamath, C.; Rubenchik, A. M.: Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 12, S. 2915–2925.

Klemens 1976
Klemens, P. G.: Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding. Journal of Applied Physics 47 (1976) 5, S. 2165–2174.

Kleppmann 2009
Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 6., überarb. Aufl. München [u.a.]: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-42033-5. (Praxisreihe Qualitätswissen).

Kleszczynski & Zur Jacobsmühlen 2013
Kleszczynski, S.; Zur Jacobsmühlen, J.: Einfluss von Prozessfehlern auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften strahlgeschmolzener Bauteile. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2013: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 14.–15. Mai 2013.

Kleszczynski et al. 2012
Kleszczynski, S.; Zur Jacobsmühlen, J.; Sehrt, J. T.; Witt, G.: Error Detection in Laser Beam Melting Systems by High Resolution Imaging. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2012. University of Texas at Austin 2012.

Kleszczynski et al. 2014
Kleszczynski, S.; Zur Jacobsmühlen, J.; Reinarz, B.; Sehrt, J. T.; Witt, G.; Merhof, D.: Improving Process Stability of Laser Beam Melting Systems. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2014), 12.–13. März 2014. Aachen: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

Klocke & Wagner 2003
Klocke, F.; Wagner, C.: Coalescence Behaviour of Two Metallic Particles as Base Mechanism of Selective Laser Sintering. CIRP Annals - Manufacturing Technology 52 (2003) 1, S. 177–180.

Klocke & Wagner 2002
Klocke, F.; Wagner, C.: Direct Selective Laser Sintering of Superalloys. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 5.–7. Aug. 2002. University of Texas at Austin 2002.

Kogel-Hollacher 2008
Kogel-Hollacher, M.: Sensorik und Datenauswertung zur industriellen Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. Diss. Technische Universität Berlin (2008). ⟨http://www.worldcat.org/title/sensorik-und-datenauswertung-zur-industriellen-prozessuberwachung-beim-laserstrahlschweissen/oclc/297552799⟩ - 05. 09. 2015.

Kolossov et al. 2004
Kolossov, S.; Boillat, E.; Glardon, R.; Fischer, P.; Locher, M.: 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process. International Journal of Machine Tools and Manufacture 44 (2004) 2-3, S. 117–123.

Krauss & Zäh 2013a
Krauss, H.; Zäh, M. F.: Investigations on Manufacturability and Process Reliability of Selective Laser Melting. Physics Procedia 41 (2013) o. Nr., S. 815–822.

Krauss et al. 2011
Krauss, H.; Eschey, C.; Götzfried, A.; Teufelhart, S.; Westhäuser, S.; Zäh, M. F.; Reinhart, G.: Modellgestützte und hierarchische Prozesskettenbetrachtung für die additive Fertigung. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1.

Krauss et al. 2012
Krauss, H.; Eschey, C.; Zäh, M. F.: Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2012. University of Texas at Austin 2012.

Krauss et al. 2013
Krauss, H.; Schilp, J.; Zäh, M. F.: Reduktion der Oberflächenrauheit und oberflächennaher Fehlstellen bei Hochleistungs-SLM-Bauteilen. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2013: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 14.–15. Mai 2013.

Krauss et al. 2014a
Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Detecting Process Irregularities in Selective Laser Melting by Thermography. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2014), 12.–13. März 2014. Aachen: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

Krauss et al. 2014b
Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Layerwise Monitoring of the Selective Laser Melting Process by Thermography. Physics Procedia 56 (2014) o. Nr., S. 64–71.

Krauss et al. 2015
Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Thermographic process monitoring in powderbed based additive manufacturing. In: Chimenti, D. E.; Bond, L. J. (Hrsg.): 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Boise, ID, 20.–25. Juli 2014. Melville, NY: AIP Publishing 2015. ISBN: 978-0-7354-1292-7. (AIP conference proceedings 1650).

Kruse 2001
Kruse, P. W.: Uncooled thermal imaging: Arrays, systems, and applications. Bellingham, WA: SPIE Press 2001. ISBN: 978-0-8194-4122-5. (Tutorial texts in optical engineering 51).

Kruth 2007
Kruth, J.-P.: On-line monitoring and process control in selective laser melting and laser cutting. In: Geiger, M.; Otto, A.; Schmidt, M. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering 5: Proceedings of the 5th LANE 2007. Bamberg: Meisenbach 2007, S. 23–37. ISBN: 978-3-87525-261-3.

Kruth & Mercelis 2009
Schutzrecht: EP 2032345 A1 Patent (11. 03. 2009). Katholieke Universiteit Leuven. Pr.: WO2007BE00061 20070620. Kruth, J.-P.; Mercelis, P.: Procedure and apparatus for in-situ monitoring and feedback control of selective laser powder processing.

Kruth et al. 2004
Kruth, J.-P.; Froyen, L.; van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.; Rombouts, M.; Lauwers, B.: Selective laser melting of iron-based powder. Journal of Materials Processing Technology 149 (2004) 1-3, S. 616–622.

Kruth et al. 2007
Kruth, J.-P.; Levy, G.; Klocke, F.; Childs, T. H. C.: Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 730–759.

Kruth et al. 2008
Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; van Vaerenbergh, J.; Craeghs, T.: Feedback control of selective laser melting. In: Bártolo, P. J. (Hrsg.): Virtual and rapid manufacturing: Proceedings of the 3nd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 24-29 September 2007. London: Taylor & Francis 2008, S. 521–527. ISBN: 978-0-415-41602-3.

Kruth et al. 2010
Kruth, J.-P.; Badrossamay, M.; Yasa, E.; Deckers, J.; Thijs, L.; Humbeeck, J. V.: Part and material properties in selective laser melting of metals. Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining (ISEM XVI) (2010) o. Nr., S. 1–12.

Kruth et al. 2012
Kruth, J.-P.; Deckers, J.; Yasa, E.; Wauthle, R.: Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226 (2012) 6, S. 980–991.

Kühnle et al. 2012
Kühnle, T.; Pertes, K.; Vollertsen, F.: Characterization of Thermal Focus Shift in a Selective Laser Melting Machine. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

Kushnarenko 2009
Kushnarenko, O. M.: Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2009). Aachen: Shaker 2009. ISBN: 978-3-8322-8121-2. (Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Magdeburg 14).

Küsters et al. 2011
Küsters, Y.; Schäfer, M.; Witt, G.: Robuster Strahlschmelzprozess durch methodische Parameterfindung. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1.

Laoui et al. 2000
Laoui, T.; Wang, X.; Childs, T. H. C.; Kruth, J.-P.; Froyen, L.: Laser Penetration in a Powder Bed during Selective Laser Sintering of Metal Powders: Simulations versus Experiments. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 11th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 8.–10. Aug. 2000. University of Texas at Austin 2000.

Leischnig 2009
Leischnig, S.: Entwicklung standardisierter Abläufe zur Verbesserung der Prozesszuverlässigkeit von Fertigungsanlagen. Diss. Technische Universität Chemnitz (2009). ISBN: 978-3-00-026915-8. (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 74).

Leuders et al. 2014
Leuders, S.; Lieneke, T.; Lammers, S.; Tröster, T.; Niendorf, T.: On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting – The role of ductility. Journal of Materials Research 29 (2014) 17, S. 1911–1919.

L. Li 1989
Li, L.: Intelligent Laser Cladding Control System Design and Construction. Diss. University of London (1989).

L. Li et al. 1991
Li, L.; Qi, N.; Brookfield, D. J.; Steen, W. M.: On-line laser weld sensing for quality control. In: Dibble, R. W.; Fourguette, D.; Ketterle, W. (Hrsg.): ICALEO 1990: Optical methods in flow and particle diagnostics. Bellingham, WA: SPIE the International Society for Optical Engineering und Laser Institute of America 1991, S. 411–420. ISBN: 978-0-912035-43-7.

L. Li et al. 1996
Li, L.; Brookfield, D. J.; Steen, W. M.: Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process. Measurement Science and Technology 7 (1996) 4, S. 615–626.

R. Li et al. 2012
Li, R.; Liu, J.; Shi, Y.; Wang, L.; Jiang, W.: Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 59 (2012) 9-12, S. 1025–1035.

Liao & Shie 2007
Liao, H.-T.; Shie, J.-R.: Optimization on selective laser sintering of metallic powder via design of experiments method. Rapid Prototyping Journal 13 (2007) 3, S. 156–162.

Ljungblad 2012
Ljungblad, U.: Process Surveillance in Electron Beam Melting for Cost-Efficient Production of Complex Parts. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

Ljungblad et al. 2014
Ljungblad, U.; Ohldin, P.; Thundal, S.: Additive Manufacturing with EBM - The Route to Production. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2014), 12.–13. März 2014. Aachen: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

Lohrmann et al. 2013
Lohrmann, D.; Littleton, R.; Reese, C.; Murphy, D.; Vizgaitis, J.: Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges. Optical Engineering 52 (2013) 6, S. 061305.

Lott et al. 2011
Lott, P.; Schleifenbaum, H.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Hinke, C.; Bültmann, J.: Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM). Physics Procedia 12 (2011) o. Nr., S. 683–690.

Lyons 2012
Lyons, B.: Additive Manufacturing in Aerospace: Examples and Research Outlook. The Bridge 42 (2012) 1.

Meier & Haberland 2008
Meier, H.; Haberland, C.: Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 39 (2008) 9, S. 665–670.

Meindl 2005
Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. Diss. Technische Universität München (2005). München: Utz 2005. ISBN: 978-3-8316-0465-4. (Forschungsberichte iwb 187).

Meiners 1999
Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Diss. RWTH Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-8265-6571-1. (Berichte aus der Lasertechnik).

Meixlsperger 2010
Meixlsperger, M.: Qualitätssichernde In-Prozessprotokollierung im Strahlschmelzverfahren. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2010: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 18.–19. Mai 2010.

Mercelis & Kruth 2006
Mercelis, P.; Kruth, J.-P.: Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal 12 (2006) 5, S. 254–265.

Ming-Kuei Hu 1962
Ming-Kuei Hu: Visual pattern recognition by moment invariants. IEEE Transactions on Information Theory 8 (1962) 2, S. 179–187.

Minkina & Dudzik 2009
Minkina, W.; Dudzik, S.: Infrared thermography: Errors and uncertainties. Chichester u. a.: J. Wiley 2009. ISBN: 978-0-470-74718-6.

Mireles et al. 2013
Mireles, J.; Terrazas, C.; Medina, F.; Wicker, R. B.: Automatic Feedback Control in Electron Beam Melting Using Infrared Thermography. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

Montgomery 1997
Montgomery, D. C.: Design and analysis of experiments. 4. Aufl. New York: Wiley 1997. ISBN: 978-0-471-15746-5.

Moylan et al. 2014
Moylan, S. P.; Whitenton, E.; Lane, B.; Slotwinski, J.: Infrared thermography for laser-based powder bed fusion additive manufacturing processes. In: Chimenti, D. E.; Bond, L. J.; Thompson, D. O. (Hrsg.): 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Baltimore, MD, 21.–26. Juli 2013. Melville, NY: AIP Publishing 2014. ISBN: 978-7354-1211-8. (AIP conference proceedings 1581).

MTU Aero Engines AG 2014
MTU Aero Engines AG: Trailblazing technology: MTU Aero Engines produces parts by additive manufacturing. ⟨`http://www.mtu.de/news-media/press/latest-press-releases/press-release-detail/?tx_news_pi1[news]=24&cHash=7fabd1d381ebb5ab509b8009f31cce61`⟩ - 20. 12. 2014.

Müller-Borhanian 2009
Müller-Borhanian, J.: Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. Diss. Universität Stuttgart (2009). München: Utz 2009. ISBN: 978-3-8316-0890-4. (Laser in der Materialbearbeitung).

Nalbant et al. 2007
Nalbant, M.; Altın, A.; Gökkaya, H.: The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys. Materials & Design 28 (2007) 4, S. 1334–1338.

Nassar et al. 2014
Nassar, A. R.; Spurgeon, T. J.; Reutzel, E. W.: Sensing defects during directed-energy additive manufacturing of metal parts using optical emissions spectroscopy. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 25th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 4.–6. Aug. 2014. University of Texas at Austin 2014.

Neef et al. 2014
Neef, A.; Seyda, V.; Herzog, D.; Emmelmann, C.; Schönleber, M.; Kogel-Hollacher, M.: Low Coherence Interferometry in Selective Laser Melting. Physics Procedia 56 (2014) o. Nr., S. 82–89.

Niang et al. 2010
Niang, A.; Viguier, B.; Lacaze, J.: Some features of anisothermal solid-state transformations in alloy 718. Materials Characterization 61 (2010) 5, S. 525–534.

Norman et al. 2008
Norman, P.; Engström, H.; Kaplan, A. F. H.: Theoretical analysis of photodiode monitoring of laser welding defects by imaging combined with modelling. Journal of Physics D: Applied Physics 41 (2008) 19, S. 195502.

Nunes 1983
Nunes, A. J.: An Extended Rosenthal Weld Model. Welding Journal 62 (1983) 6, S. 165–170.

Okunkova et al. 2014
Okunkova, A.; Volosova, M.; Peretyagin, P.; Vladimirov, Y.; Zhirnov, I.; Gusarov, A. V.: Experimental Approbation of Selective Laser Melting of Powders by the Use of Non-Gaussian Power Density Distributions. Physics Procedia 56 (2014) o. Nr., S. 48–57.

Olsen et al. 1992
Olsen, F. O.; Jorgensen, H.; Bagger, C.; Kristensen, T.; Gregerson, O.: Recent investigations in sensorics for adaptive control of laser cutting and welding. In: Matsunawa, A. (Hrsg.): Proceedings of International Conference on Laser Advanced Materials Processing. Nagaoka, 7.–12. Juni 1992. Osaka: High Temperature Society of Japan 1992.

Oradei-Basile & Radavich 1991
Oradei-Basile, A.; Radavich, J. F.: A current TTT diagram for wrought alloy 718. Superalloys 718 (1991) 625, S. 325–335.

Ott 2012
Ott, M.: Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbett-basierten Fertigung. Diss. Technische Universität München (2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4201-4. (Forschungsberichte iwb 264).

Over 2003
Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit "Selective Laser Melting". Diss. RWTH Aachen (2003). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 978-3-8322-2245-1. (Lasertechnik).

Park & Rhee 1999
Park, H.; Rhee, S.: Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO2 laser welding of galvanized steel. Optics & Laser Technology 31 (1999) 2, S. 119–126.

Patil & Yadava 2007
Patil, R. B.; Yadava, V.: Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2007) 7-8, S. 1069–1080.

Pavlov et al. 2010
Pavlov, M.; Doubenskaia, M.; Smurov, I.: Pyrometric analysis of thermal processes in SLM technology. Physics Procedia 5 (2010) o. Nr., S. 523–531.

Philippi & Mattes 2009
Schutzrecht: DE102007056984A1 Patent (28. 05. 2009). EOS Electro Optical Systems GmbH. Pr.: DE20071056984 20071127. Philippi, J.; Mattes, T.: Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objektes mittels Lasersintern.

Pittner 2012
Pittner, A.: A contribution to the solution of the inverse heat conduction problem in welding simulation. Diss. Technische Universität Berlin (2012). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung 2012. ISBN: 978-3-9814634-9-1. (BAM-Dissertationsreihe 85).

Polifke & Kopitz 2009
Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden. 2., aktualis. Aufl. München: Pearson 2009. ISBN: 978-3-8273-7349-6. (Ing - Maschinenbau).

Poprawe 2004
Poprawe, R.: Development of New Beam Sources - Fiber, Slab, Disc and Rod. In: Geiger, M. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering 4: Proceedings of the 4th LANE 2004, Erlangen, September 21-24, 2004. Bamberg: Meisenbach 2004. ISBN: 978-3-87525-202-6.

Pottlacher et al. 2002
Pottlacher, G.; Hosaeus, H.; Wilthan, B.; Kaschnitz, E.; Seifter, A.: Thermophysikalische Eigenschaften von festem und flüssigem Inconel 718. Thermochimica Acta 382 (2002) 1-2, S. 255–267.

Price et al. 2012
Price, S.; Cooper, K.; Chou, K.: Evaluations of Temperature Measurements by Ner-Infrared Thermography in Powderbed-based Electron-beam Additive Manufacturing. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2012. University of Texas at Austin 2012.

Price et al. 2013
Price, S.; Lydon, J.; Cooper, K.; Chou, K.: Experimental Temperature Analysis of Powderbed-Based Electron Beam Additive Manufacturing. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

Ramos et al. 2002
Ramos, J. A.; Murphy, J.; Lappo, K.; Wood, K.; Bourell, D. L.; Beaman, J. J.: Single-Layer Deposits of Nickel Base Superalloy by Means of Selective Laser Sintering. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 13th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 5.–7. Aug. 2002. University of Texas at Austin 2002.

Rayleigh 1892
Rayleigh: XVI. On the instability of a cylinder of viscous liquid under capillary force. Philosophical Magazine Series 5 34 (1892) 207, S. 145–154.

Ready 1965
Ready, J. F.: Effects Due to Absorption of Laser Radiation. Journal of Applied Physics 36 (1965) 2, S. 462.

Rehme 2009
Rehme, O.: Cellular design for laser freeform fabrication. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg (2009). Göttingen: Cuvillier 2010. ISBN: 978-3-86955-273-6.

Rehme & Emmelmann 2005
Rehme, O.; Emmelmann, C.: Reproducibility for properties of Selective Laser Melting products. In: Beyer, E. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2005: Proceedings of the Third International WLT Conference Lasers in Manufacturing, LIM 2005, Munich, Germany, June 13th - 16th, 2005. Stuttgart: AT-Fachverl. 2005. ISBN: 978-3-00-016402-6.

Reinarz & Witt 2012
Reinarz, B.; Witt, G.: Process Monitoring in the Laser Beam Melting Process - Reduction of Process Breakdowns and Defective Parts. In: Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2012 (MS&T 12): Pittsburgh, PA 7-11 October 2012. [S.l.]: John Wiley 2012. ISBN: 978-0-87339-761-2.

Reinhardt & Witt 2012
Reinhardt, T.; Witt, G.: Ansätze zur Qualitätsbewertung von generativen Fertigungsverfahren durch die Einführung eines Kennzahlensystems. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 2012 (2012) 1.

Renhof 2007
Renhof, L.: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Nickellegierung IN 718. Diss. Technische Universität München (2007). ⟨`https://mediatum.ub.tum.de/doc/622870/622870.pdf`⟩ - 24. 04. 2015.

Repper 2010
Repper, J. N.: Einfluss mikroskopischer Eigenspannungen auf die makroskopische Eigenspannungsanalyse mittels Neutronenbeugung. Diss. Technische Universität München (2010). ⟨`https://mediatum.ub.tum.de/download/966090/966090.pdf`⟩ - 01. 12. 2014.

Repper et al. 2010
Repper, J. N.; Link, P.; Hofmann, M.; Krempaszky, C.; Petry, W.; Werner, E.: Interphase microstress measurements in IN 718 by cold neutron diffraction. Applied Physics A 99 (2010) 3, S. 565–569.

Rickenbacher et al. 2013
Rickenbacher, L.; Etter, T.; Hövel, S.; Wegener, K.: High temperature material properties of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) technology. Rapid Prototyping Journal 19 (2013) 4, S. 282–290.

Ridwan et al. 2014
Ridwan, S.; Mireles, J.; Gaytan, S.; Espalin, D.; Wicker, R. B.: Automatic Layerwise Acquisition of Thermal and Geometric Data of the Electron Beam Melting Process Using Infrared Thermography. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 25th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 4.–6. Aug. 2014. University of Texas at Austin 2014.

Rieder et al. 2014
Rieder, H.; Dillhöfer, A.; Spies, M.; Bamberg, J.; Hess, T.: Online monitoring of additive manufacturing processes using ultrasound. In: Prevorovsky, Z. (Hrsg.): 11th European Conference on Nondestructive Testing: Conference proceedings. Prague 2014. ISBN: 978-80-214-5018-9.

Risse et al. 2013
Risse, J.; Golebiewski, C.; Meiners, W.; Wissenbach, K.: Einfluss der Prozessführung auf die Rissbildung in mittels SLM hergestellten Bauteilen aus der Nickelbasislegierung IN738LC. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2013: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 14.–15. Mai 2013.

Roberts et al. 2009
Roberts, I. A.; Wang, C. J.; Esterlein, R.; Stanford, M.; Mynors, D. J.: A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (2009) 12-13, S. 916–923.

Roberts et al. 2010
Roberts, I. A.; Wang, C. J.; Stanford, M.; Kibble, K. A.; Mynors, D. J.: Experimental and Numerical Analysis of Residual Stresses in Additive Layer Manufacturing by Laser Melting of Metal Powders. Key Engineering Materials 450 (2010) o. Nr., S. 461–465.

Rockstroh & Mazumder 1987
Rockstroh, T. J.; Mazumder, J.: Spectroscopic studies of plasma during cw laser materials interaction. Journal of Applied Physics 61 (1987) 3, S. 917.

Rodriguez et al. 2012
Rodriguez, E.; Medina, F.; Espalin, D.; Terrazas, C.; Muse, D.; Henry, C.; MacDonald, E.; Wicker, R. B.: Integration of a Thermal Imaging Feedback Control System in Electron Beam Melting. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2012. University of Texas at Austin 2012.

Rogalski 2003
Rogalski, A.: Infrared detectors: status and trends. Progress in Quantum Electronics 27 (2003) 2-3, S. 59–210.

Rombouts, Froyen, Bourell et al. 2005
Rombouts, M.; Froyen, L.; Bourell, D. L.; Kruth, J.-P.: Roughness after laser melting of iron based powders. Proceedings 2nd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP). Leiria, Portugal, 28. Sep.–1. Okt. 2005.

Rombouts, Froyen, Gusarov et al. 2005
Rombouts, M.; Froyen, L.; Gusarov, A. V.; Bentefour, E. H.; Glorieux, C.: Photopyroelectric measurement of thermal conductivity of metallic powders. Journal of Applied Physics 97 (2005) 2, S. 024905.

Rombouts et al. 2006
Rombouts, M.; Kruth, J.-P.; Froyen, L.; Mercelis, P.: Fundamentals of Selective Laser Melting of alloyed steel powders. CIRP Annals - Manufacturing Technology 55 (2006) 1, S. 187–192.

Rosenthal 1946
Rosenthal, D.: The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments. Cambridge: ASME 1946.

Rykalin et al. 1978
Rykalin, N. N.; Uglov, A. A.; Kokora, A.: Laser machining and welding. 1st ed. Oxford und New York: Pergamon Press 1978. ISBN: 978-0-08-022724-5.

Sackewitz 2011
Sackewitz, M. (Hrsg.): *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie: Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2011. ISBN: 978-3-8396-0234-8.

Schatt 1996
Schatt, W.: Werkstoffwissenschaft. 8., neu bearb. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie 1996. ISBN: 978-3-342-00675-6.

Schmid & Levy 2012
Schmid, M.; Levy, G.: Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

A. Schulze & E. Dietrich 2008
Schulze, A.; Dietrich, E.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 6., vollst. überarb. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41525-6.

Schuster 2004
Schuster, N.: Infrarotthermographie. 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2004. ISBN: 978-3-527-40509-1.

Schweier et al. 2013
Schweier, M.; Heins, J.; Haubold, M.; Zäh, M. F.: Spatter Formation in Laser Welding with Beam Oscillation. Physics Procedia 41 (2013) o. Nr., S. 20–30.

Schwerdtfeger et al. 2012
Schwerdtfeger, J. V.; Singer, R. F.; Körner, C.: In situ flaw detection by IR-imaging during electron beam melting. Rapid Prototyping Journal 18 (2012) 4, S. 259–263.

Sears 2012
Sears, J. W.: Applications in Direct Metal Laser Manufacturing. In: Laser Institute of America (Hrsg.): Laser Additive Manufacturing Workshop. Houston, 29. Feb.–1. März 2012. ⟨https://de356l4tocdyu.cloudfront.net/pdf/LAM 2012%20Presentation%202.pdf⟩ - 21. 03. 2015.

Sehrt 2010
Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9229-4. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

Seidel et al. 2013
Seidel, C.; Zäh, M. F.; Weirather, J.; Wunderer, M.; Krol, T. A.; Schilp, J.; Groth, C.; Stroebele, B. S.: Simulation of the laser beam melting process–an approach for an efficient geometry modelling of complex lightweight parts. In: Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. (Hrsg.): Proceedings LightMAT. Bremen, 3.–5. Sep. 2013.

Shellabear & Nyrhilä 2007
Shellabear, M.; Nyrhilä, O.: Advances in materials and properties of direct metal laser-sintered parts. In: Geiger, M.; Otto, A.; Schmidt, M. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering 5: Proceedings of the 5th LANE 2007. Bamberg: Meisenbach 2007. ISBN: 978-3-87525-261-3.

Shiomi et al. 2004
Shiomi, M.; Osakada, K.; Nakamura, K.; Yamashita, T.; Abe, F.: Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process. CIRP Annals - Manufacturing Technology 53 (2004) 1, S. 195–198.

Sih & Barlow 1994
Sih, S. S.; Barlow, J. W.: Measurement and Prediction of the Thermal Conductivity of Powders at High Temperatures 321. In: Marcus, H. L.; Beaman, J. J.; Bourell, D. L.; Crawford, R. H. (Hrsg.): Proceedings of the 5th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 8.–10. Aug. 1994. University of Texas at Austin 1994.

Simchi & Pohl 2004
Simchi, A.; Pohl, H.: Direct laser sintering of iron–graphite powder mixture. Materials Science and Engineering: A 383 (2004) 2, S. 191–200.

Skrynecki 2010
Skrynecki, N.: Kundenorientierte Optimierung des generativen Strahlschmelzprozesses. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9217-1. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

SLM Solutions GmbH 2012
SLM Solutions GmbH: Wissen Sie alles über SLM? Hrsg. von SLM Solutions GmbH. ⟨http://www.slm-solutions.com/cms/upload/pdf/120923_SLM_Gesamt.pdf⟩ - 05. 03. 2013.

Smurov 2007
Smurov, I.: Laser process optical sensing and control. In: Vollertsen, F. (Hrsg.): Lasers in manufacturing 2007: Proceedings of the Fourth International WLT-Conference Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, June 18th - 22nd, 2007. Stuttgart: AT-Fachverl. 2007, S. 537–546. ISBN: 978-3-00-021449-3.

Sonntag & Bergmann 1997
Sonntag, K.; Bergmann, B.: Störungsmanagement und Diagnosekompetenz: Leistungskritisches Denken und Handeln in komplexen technischen Systemen. Zürich: Vdf, Hochschulverl. an der ETH Zürich 1997. ISBN: 978-3-7281-2228-5. (Mensch, Technik, Organisation Bd. 13).

Special Metals Corporation 2007
Special Metals Corporation: INCONEL® alloy 718: Technical Bulletin. Huntington, WV. ⟨http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf⟩ - 07. 01. 2015.

Spierings et al. 2010
Spierings, A.; Herres, N.; Levy, G.: Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in additive manufactured stainless steel parts. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 21st Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 9.–11. Aug. 2010. University of Texas at Austin 2010.

Spierings et al. 2011
Spierings, A.; Schneider, M.; Eggenberger, R.: Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. Rapid Prototyping Journal 17 (2011) 5, S. 380–386.

Stache et al. 2007
Stache, N. C.; Zimmer, H.; Gedicke, J.; Olowinsky, A.; Aach, T.: Robust high-speed melt pool measurements for laser welding with sputter detection capability. In: Hamprecht, F. A.; Schnörr, C.; Jähne, B. (Hrsg.): Pattern recognition: 29th DAGM symposium, Heidelberg, Germany, September 12-14, 2007 : proceedings. Berlin, New York: Springer 2007, S. 476–485. ISBN: 978-3-540-74933-2.

Stache et al. 2008
Stache, N. C.; Gedicke, J.; Dieckelmann, J.; Firnich, R.; Olowinsky, A.; Abels, P.; Aach, T.: High Speed Video-based Melt Pool Surveillance in Laser Spot Welding. In: Laser Institute of America (Hrsg.): ICALEO 2008: 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics. Orlando, FL: Laser Institute of America 2008. ISBN: 978-0-912035-12-3.

Statistisches Bundesamt 2014
Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch Deutschland 2014. 1., Auflage. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2014. ISBN: 978-3-8246-1029-7.

Steen & Mazumder 2010
Steen, W. M.; Mazumder, J.: Laser material processing. 4th ed. London und New York: Springer 2010. ISBN: 978-1-84996-061-8.

Streek et al. 2013
Streek, A.; Regenfuss, P.; Exner, H.: Fundamentals of Energy Conversion and Dissipation in Powder Layers during Laser Micro Sintering. Physics Procedia 41 (2013) o. Nr., S. 858–869.

Strondl et al. 2015
Strondl, A.; Lyckfeldt, O.; Brodin, H.; Ackelid, U.: Characterization and Control of Powder Properties for Additive Manufacturing. JOM 67 (2015) 3.

Sturm & Förster 1990
Sturm, A.; Förster, R.: Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung. Stuttgart: B.G. Teubner 1990. ISBN: 978-3-519-06333-9.

Sun et al. 1999
Sun, A.; Kannatey-Asibu, E.; Gartner, M.: Sensor systems for real-time monitoring of laser weld quality. Journal of Laser Applications 11 (1999) 4, S. 153.

Tang & Landers 2010
Tang, L.; Landers, R. G.: Melt Pool Temperature Control for Laser Metal Deposition Processes—Part I: Online Temperature Control. Journal of Manufacturing Science and Engineering 132 (2010) 1, S. 011010.

Thombansen & Diatlov 2013
Thombansen, U.; Diatlov, A.: Sensor system for spatially resolved observation of the melt pool in Selective Laser Melting. In: Laser Institute of America (Hrsg.): ICALEO 2013: 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Orlando, FL: Laser Institute of America 2013, S. 262–267. ISBN: 978-0-912035-98-7.

Thombansen et al. 2014
Thombansen, U.; Gatej, A.; Pereira, M.: Tracking the course of the manufacturing process in selective laser melting. In: Dorsch, F. (Hrsg.): Proceedings of SPIE 8963: High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications III. SPIE 2014, 89630O.

Tolochko et al. 2000
Tolochko, N. K.; Khlopkov, Y. V.; Mozzharov, S. E.; Ignatiev, M. B.; Laoui, T.; Titov, V. I.: Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. Rapid Prototyping Journal 6 (2000) 3, S. 155–161.

Tolochko et al. 2004
Tolochko, N. K.; Mozzharov, S. E.; Yadroitsev, I.; Laoui, T.; Froyen, L.; Titov, V. I.; Ignatiev, M. B.: Balling processes during selective laser treatment of powders. Rapid Prototyping Journal 10 (2004) 2, S. 78–87.

Uckelmann 2012
Uckelmann, I.: Additive Manufacturing von Zahnersatz – Status quo und zukünftige Anforderungen an die Anlagentechnik. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung ; Augsburg, 19. Juni 2012. München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4188-8.

Vallés 2014
Vallés, J. L.: Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020: Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014. Hrsg. von European Commission. ⟨`http://www.econolyst.co.uk/resources/documents/files/EC_AM_Workshop_Report.pdf`⟩ - 22. 12. 2014.

van Elsen 2007
van Elsen, M.: Complexity of Selective Laser Melting: a new optimisation approach. Diss. Katholieke Universiteit Leuven (2007).

van Elsen et al. 2007
van Elsen, M.; Baelmans, M.; Mercelis, P.; Kruth, J.-P.: Solutions for modelling moving heat sources in a semi-infinite medium and applications to laser material processing. International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 23-24, S. 4872–4882.

Vasinonta et al. 2001
Vasinonta, A.; Beuth, J.; Ong, R.: Melt Pool Size Control in Thin-Walled and Bulky Parts via Process Maps. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2001. University of Texas at Austin 2001.

VDI 3258-1
VDI 3258 Blatt 1: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen; Begriffe, Bezeichnungen, Zusammenhänge. Berlin: Beuth 1962.

VDI 3404
VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren - Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) - Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Berlin: Beuth 2009.

VDI 3405-1
VDI 3405 Blatt 1: Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Güteüberwachung. Berlin: Beuth 2013.

VDI 3405-2
VDI 3405 Blatt 2: Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Berlin: Beuth 2013.

VDI 3405
VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth 2014.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2014
Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Statusreport Additive Fertigungsverfahren. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure e.V. ⟨`www.vdi.de/statusadditiv`⟩ - 10. 01. 2015.

Waldmann 2014
Waldmann, J.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung thermischer In-Process-Überwachung beim Laserstrahlschmelzen. Bachelorarbeit. Technische Universität München (2014).

Wang et al. 2012
Wang, Z.; Guan, K.; Gao, M.; Li, X.; Chen, X.; Zeng, X.: The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting. Journal of Alloys and Compounds 513 (2012) o. Nr., S. 518–523.

Wegner & Witt 2011
Wegner, A.; Witt, G.: Process Monitoring in Laser Sintering using Thermal Imaging. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 8.–10. Aug. 2011. University of Texas at Austin 2011.

Weilhammer 2014
Weilhammer, J.: Development of Direct Metal Laser Sintering Systems for Industrial Use. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2014), 12.–13. März 2014. Aachen: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

Wieland & Marcus Wallenburg 2012
Wieland, A.; Marcus Wallenburg, C.: Dealing with supply chain risks. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 42 (2012) 10, S. 887–905.

Wiesemann 2004
Wiesemann, W.: Process monitoring and closed-loop control. In: Poprawe, R.; Weber, H.; Herziger, G. (Hrsg.): Laser Applications. Berlin, Heidelberg: Springer 2004, S. 243–275. ISBN: 978-3-540-00105-8.

Wiesner & Schwarze 2014
Wiesner, A.; Schwarze, D.: Multi-Laser Selective Laser Melting: Industrial Paper. Hrsg. von 8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. ⟨http://lane-conference.org/downloads/IndustrialContributions/LANE2014_Wiesner_Multi-Laser_Selective_Laser.pdf⟩ - 07. 01. 2015.

Wildemann 1996
Wildemann, H.: Controlling im TQM: Methoden und Instrumente zur Verbesserung der Unternehmensqualität. Berlin [u.a.]: Springer 1996. ISBN: 978-3-540-60969-8. (Qualitätsmanagement).

Withers & Bhadeshia 2001
Withers, P. J.; Bhadeshia, H. K. D. H.: Residual stress. Part 2 – Nature and origins. Materials Science and Technology 17 (2001) 4, S. 366–375.

Wöhe & Döring 2010
Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 24., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Vahlen 2010. ISBN: 3-8006-3795-2. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

Wohlers 2011
Wohlers, T. T. (Hrsg.): *Wohlers report 2011: Additive manufacturing and 3D printing state of the industry annual worldwide progress report.* Fort Collins und Col: Wohlers Associates 2011. ISBN: 978-0-9754429-7-5.

Wohlers 2012
Wohlers, T. T.: Wohlers report 2012: Additive manufacturing and 3D printing state of the inudstry : annual worldwide progress report. Fort Collins, Col: Wohlers Associates 2012. ISBN: 0-9754429-8-8.

Wohlers 2014
Wohlers, T. T.: Wohlers report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Fort Collins, Col: Wohlers Associates 2014. ISBN: 978-0-9913332-0-2.

Xiao & Y. Zhang 2007
Xiao, B.; Zhang, Y.: Laser sintering of metal powders on top of sintered layers under multiple-line laser scanning. Journal of Physics D: Applied Physics 40 (2007) 21, S. 6725–6734.

Yadroitsev 2009
Yadroitsev, I.: Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Diss. National Academy of Sciences of Belarus (2009). Saarbrücken: Lambert Academic Publishing. ISBN: 978-3-8383-1794-6.

Yadroitsev & Smurov 2011
Yadroitsev, I.; Smurov, I.: Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders. Physics Procedia 12 (2011) o. Nr., S. 264–270.

Yadroitsev et al. 2010
Yadroitsev, I.; Gusarov, A. V.; Yadroitsava, I.; Smurov, I.: Single track formation in selective laser melting of metal powders. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 12, S. 1624–1631.

Yadroitsev et al. 2012
Yadroitsev, I.; Yadroitsava, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks. Rapid Prototyping Journal 18 (2012) 3, S. 201–208.

Yasa et al. 2009
Yasa, E.; Craeghs, T.; Badrossamay, M.; Kruth, J.-P.: Investigation on occurrence of elevated edges in selective laser melting. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 20th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 3.–5. Aug. 2009. University of Texas at Austin 2009.

Yasa et al. 2011
Yasa, E.; Kruth, J.-P.; Deckers, J.: Manufacturing by combining Selective Laser Melting and Selective Laser Erosion/laser re-melting. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 263–266.

Zacharia et al. 1989
Zacharia, T.; David, S. A.; Vitek, J. M.; Debroy, T.: Heat transfer during Nd: Yag pulsed laser welding and its effect on solidification structure of austenitic stainless steels. Metallurgical Transactions A 20 (1989) 5, S. 957–967.

Zäh 2006
Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-446-22854-2.

Zäh, Lindemann et al. 2011
Zäh, M. F.; Lindemann, U.; Lüth, T.: Qualitätsmanagement - Qualität im Produktlebenszyklus: Vorlesungsmanuskript Techn. Univ. München 2011.

Zäh & Lutzmann 2010
Zäh, M. F.; Lutzmann, S.: Modelling and simulation of electron beam melting. Production Engineering 4 (2010) 1, S. 15–23.

Zehner & Schlünder 1970
Zehner, P.; Schlünder, E. U.: Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei mäßigen Temperaturen. Chemie Ingenieur Technik 42 (1970) 14, S. 933–941.

Zeng et al. 2012
Zeng, K.; Pal, D.; Stucker, B.: A review of thermal analysis methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2012. University of Texas at Austin 2012.

Zenzinger et al. 2014
Zenzinger, G.; Bamberg, J.; Henkel, B.; Hess, T.; Ladwig, A.: Online-Prozesskontrolle bei der additiven Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen. DGZfP Zeitung (2014) 140, S. 51–54.

K. Zhang et al. 2007
Zhang, K.; Liu, W.; Shang, X.: Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. Optics & Laser Technology 39 (2007) 3, S. 549–557.

Zhao et al. 2008
Zhao, X.; Chen, J.; Lin, X.; Huang, W.: Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718. Materials Science and Engineering: A 478 (2008) 1-2, S. 119–124.

Zur Jacobsmühlen et al. 2013
Zur Jacobsmühlen, J.; Kleszczynski, S.; Schneider, D.; Witt, G.: High Resolution Imaging for Inspection of Laser Beam Melting Systems. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Minneapolis, MN, 21.–26. Mai 2013.

Anhang

A.1 Prozessanalyse

A.1.1 Gut-Schlecht-Vergleich zur Identifikation von Haupteinflussgrößen

Die Haupteinflussgrößen auf den SLM-Prozess können anhand eines Gut-Schlecht-Vergleichs identifiziert werden, indem für jeden zu untersuchenden Faktor zwei Faktorstufen variiert werden. Der Aufwand skaliert mit 2^n, wobei n die Anzahl der Faktoren ist. Tabelle A.1 zeigt die gewählten Faktoren und Stufen für die Prozessanalyse aus Kapitel 4.

Tabelle A.1: Parameter und deren Einstellungen für den Gut-Schlecht-Vergleich

Faktor	Gut-Level	Schlecht-Level
Hatch-Abstand	90 µm	110 µm
Schichtdicke	20 µm	40 µm
Scangschwindigkeit	1200 mm/s	1500 mm/s
Laserleistung	195 W	170 W
Scanvektorlänge	5 mm	15 mm
Belichtungsstrategie	Streifen	Schachbrett
Scanfeldüberlapp	120 µm	90 µm
Hatch-Rotation	ja	nein
Hatch-Richtung	x- und y-Richtung	nur x-Richtung
Sky-Writing	ja	nein

A.1.2 Realbauteil zur Untersuchung der Maßhaltigkeit

Die in Kapitel 4 beschriebene Prozessanalyse basiert u. a. auf dem additiven Aufbau eines Realbauteils. Es handelt sich um eine Haltergeometrie für einen Aktuator im Hochdruckverdichter eines Strahltriebwerks.

Positionierung und Supportauslegung Schließt eine Oberfläche des Bauteils einen Winkel kleiner 45° mit dem Bauträger ein, wurde diese im Allgemeinen mit einem Gittersupport (Maschenweite ca. 500 µm) gestützt (vgl. Abbildung A.1). Überhängende Kanten wurden mit festen Stegen der Breite 500 µm an den Bauträger angebunden. Die orientierungsabhängige Supportauslegung ändert die Wärmeableitung und beeinflusst damit den Eigenspannungszustand bzw. die auftretenden Verzüge. Um die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Orientierungen zu erhöhen, wurde das Stützstrukturvolumen so gering wie möglich gewählt und ein delaminationsfreier Aufbau sichergestellt. Des Weiteren wurde das Bauteil für alle Versuche mittig auf dem Bauträger positioniert.

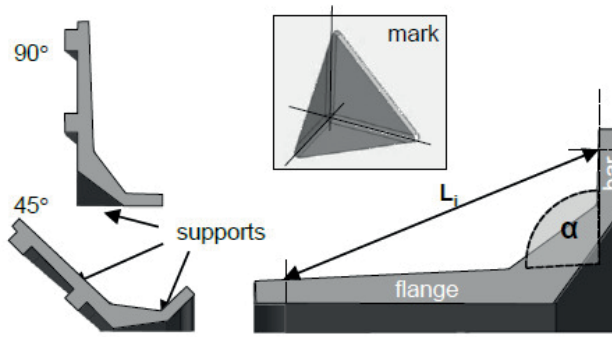


Abbildung A.1: Auslegung der Stützstruktur, Markierungsgeometrie nach Krauss & Zäh (2013b)

Bestimmung charakteristischer Bauteilmaße Die Bestimmung der Maßhaltigkeit bzw. der geometrischen Veränderung erfolgte anhand charakteristischer Längen- und Winkelmaße, die mittels eines 3D-Scansytems aufgenommen werden. Nach Gleichung A.1 wurde eine gemittelte relative Abweichung zwischen Soll- und Istmaß bestimmt, die als Qualitätsindikator diente. Die Winkelabweichung wurde auf Basis eines Referenzwinkels (Abbildung A.1) zwischen zwei Funktionsflächen des Bauteils abgeleitet.

$$\Delta l = \sqrt{\sum_i \left(\frac{L_{i0}}{L_{10}+L_{20}+L_{30}} \frac{L_i - L_{i0}}{L_{i0}} \right)^2} = \frac{1}{L_{10}+L_{20}+L_{30}} \sqrt{\sum \left(L_i - L_{i0}\right)^2} \tag{A.1}$$

A.1.3 Versuchsplanung zur Prozessanalyse und -optimierung

Aufgrund experimenteller Beschränkungen wichen die eingestellten Faktorstufen geringfügig von dem theoretischen Optimum ab. Die Schichtdicke kann beispielsweise nicht signifikant unterhalb des mittleren Partikeldurchmessers liegen, wenn eine kontinuierliche, homogene Pulverschicht aufgetragen werden soll. Weiterhin stellte der Belichtungstyp einen kategorialen und keinen kontinuierlichen Parameter dar. Um den Einfluss unterschiedlicher Belichtungstypen dennoch zu untersuchen, wurde den Belichtungstypen ein numerischer Wert (+1, -1) zugeordnet. Diese Vorgehensweise und sämtliche Einschränkungen der Faktorstufen führen zu einer Korrelation der Eingangsgrößen in der Größenordnung von 5 %. Das Versuchslayout ist aus Abbildung 4.7 ersichtlich, die einzelnen Versuche und Parametervariationen gehen aus Tabelle A.2 hervor.

Tabelle A.2: Versuchsparameter für die statistische Versuchsplanung in Kapitel 4

Versuch	**Hatch-Abstand** in µm	**Scangeschwindigkeit** in mm/s	**Orientierung** in °	**Schichtdicke** in µm	**Belichtungstyp** —
LR14	80	1000	0	20	Streifen
LR11	80	1000	0	40	Schachbrett
LR15	80	1000	90	20	Schachbrett
LR13	80	1000	90	40	Streifen
LR09	80	1400	0	20	Schachbrett
LR02	80	1400	0	40	Streifen
LR04	80	1400	90	20	Streifen
LR17	80	1400	90	40	Schachbrett
LR18	100	1000	0	20	Schachbrett
LR03	100	1000	0	40	Streifen
LR12	100	1000	90	20	Streifen
LR08	100	1000	90	40	Schachbrett
LR06	100	1400	0	20	Streifen
LR16	100	1400	0	40	Schachbrett
LR05	100	1400	90	20	Schachbrett
LR07	100	1400	90	40	Streifen
LR25	73	1200	45	30	Streifen
LR19	107	1200	45	30	Streifen
LR21	90	865	45	30	Streifen
LR29	90	1544	45	30	Streifen
LR23	90	1200	0	30	Streifen
LR26	90	1200	90	30	Streifen
LR27	90	1200	45	20	Streifen
LR30	90	1200	45	50	Streifen
LR24	90	1200	45	30	Schachbrett
LR20	90	1200	45	30	Streifen
LR01	90	1200	45	30	Streifen
LR10	90	1200	45	30	Streifen
LR22	90	1200	45	30	Streifen
LR28	90	1200	45	30	Streifen

A.1.4 Regressionsanalyse

Anhand des Versuchsplans aus Anhang A.1.3 wurden für die untersuchten Zielgrößen Regressionsmodelle abgeleitet (vgl. Bestimmtheitsmaß in Tabelle A.3). Ein Parameter wurde dann als signifikanter Parameter in das Regressionsmodell aufgenommen, wenn dessen p-Wert oder der p-Wert einer Kombination mit diesem Parameter kleiner als 0,05 ist. Der p-Wert beschreibt die Irrtumswahrscheinlichkeit, mit der es sich bei dem jeweiligen Parameter bzw. der Parameterkombination nicht um einen signifikanten Parameter handelt.

Tabelle A.3: Bestimmtheitsmaß

Modell	FFA	R_{p02}	$R_{\max}$	Bruchd. A	E-Modul	Härte	Δl	$\Delta\alpha$
$\mathbf{R}^2$	0,99	0,84	0,98	0,97	0,79	0,92	0,79	0,71

A.1.5 Strahlprofil der Versuchsanlage

Die Optik zur Strahlformung in der verwendeten Versuchsanlage besteht aus einer Telekopanordnung, die einerseits der Aufweitung des Strahlquerschnitts zur besseren Fokussierung dient und andererseits eine Justage der Fokuslage im Bauraum ermöglicht. Abbildung A.2 zeigt in diesem Zusammenhang den schematischen Aufbau der Laserstrahlformung in der Versuchsanlage. Die Beugungsmaßzahl M^2 beschreibt die Qualität und Fokussierbarkeit des Strahlprofils und beträgt in dem vorliegenden Fall 1,02.

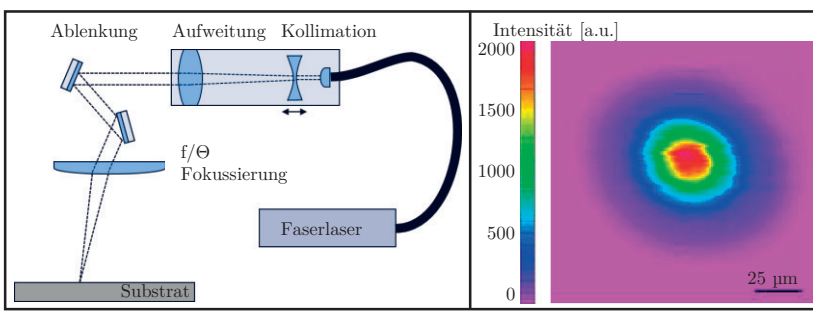


Abbildung A.2: Strahlformung und resultierendes Strahlprofil der verwendeten Versuchsanlage nach Krauss & Zäh (2013a)

A.2 Thermografische Messung beim Laserstrahlschmelzen

A.2.1 Off-Axis-Integration

Für eine In-Process-Überwachung wird in diesem Abschnitt die Off-Axis-Temperaturmessung durch thermische Detektoren diskutiert und es wird auf die sich ergebenden Randbedingungen eingegangen. Das Vorgehen ist in Abbildung A.3 dargestellt.



Abbildung A.3: Vorgehen zur Analyse der Temperaturbestimmung beim SLM

Die Einkopplung der Laserstrahlung in den Bauraum einer additiven Fertigungsanlage erfolgt über ein Spiegelablenksystem und eine Fokussierungsoptik, die die optische Achse des Systems definieren. Bei einer Off-Axis-Integration ist der Winkel zwischen der optischen Achse der Laserstrahlung und der optischen Achse der Beobachtung (Off-Axis-Winkel Θ_0) prinzipbedingt größer Null, da Bauraum- und Zugänglichkeitsbeschränkungen berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der begrenzten Tiefenschärfe der abbildenden Optik ist ein möglichst kleiner Off-Axis-Winkel anzustreben, damit die optische Auflösung und die Abbildungsqualität über den Bauraum weitgehend konstant bleiben.

A.2.1.1 Anforderungen und Randbedingungen

Nachfolgend wird die Off-Axis-Integration von optischen Sensoren diskutiert und anhand eines thermischen Empfängers (Mikrobolometer) konkretisiert. Folgende Aspekte sind von Bedeutung:

- Laserstrahlung: Die Sensoroptik muss vor direkter und gestreuter Laserstrahlung aus dem Prozess geschützt werden, um zu hohe Leistungsdichten auf dem Sensor zu vermeiden. Zu diesem Zweck befindet sich vor der Sensoroptik ein Germanium-Sichtfenster mit Antireflexbeschichtung. Während in dem spektralen Arbeitsbereich des Mikrobolometers damit eine Transmission von $\tau \approx 90\,\%$ erreicht wird, geht diese im Bereich der Laserwellenlänge gegen Null.
- Schutzgasführung: Durch den Einsatz der In-Process-Sensorik soll der ursprüngliche Prozess nicht beeinflusst werden. Da sich das komplexe Strömungsfeld innerhalb der Baukammer durch die Integration von zusätzlichen Komponenten ändert, wurde die Sensorik außerhalb der Kammer angebracht. Das Germanium-Sichtfenster diente der Abdichtung der Baukammeröffnung.

- Prozessemissionen: In dem Prozess entstehen Emissionen in Form von Schmelzbadaustrieben, die sich über Distanzen in der Größenordnung von Zentimeter niederschlagen. Mit dem Sichtfenster wird die Sensoroptik vor dem direkten Kontakt mit Schmelzbadaustrieben und mit beschleunigten Pulverpartikeln geschützt. Nach Park & Rhee (1999) gehen Schmelzbadaustriebe mit einer erhöhten Emission von Plasmastrahlung im UV-Bereich (UV) einher. Die Sensoroptik wird durch die Filterwirkung des Sichtfensters vor dieser Strahlung geschützt.
- Transmission: Durch lokale Druck- und Temperaturunterschiede werden unverfestigte Pulverpartikel und Schmelzbadaustriebe beschleunigt und durch die Schutzgasführung im Bauraum verteilt. Damit die Transmission des Sichtfensters nicht beeinträchtigt wird, muss dieses außerhalb des Schutzgasstromes angebracht bzw. regelmäßig gereinigt werden. Zudem ist auf eine konstante Temperatur des Germanium-Sichtfensters zu achten, da die Transmission von Germanium mit steigender Temperatur abnimmt (vgl. Edmund Optics GmbH (2015)).

Abbildung A.4 zeigt die realisierte Sensorintegration. Zugunsten der Modularität waren bei dem gewählten Konzept keine baulichen Änderungen der Prozesskammer notwendig. Lediglich die Baukammertüre wurde ersetzt. Über einen Adapter wurde das Germanium-Sichtfenster unmittelbar vor der Detektoroptik angeordnet. Um eine möglichst geringe Beeinflussung der Schutzgasströmung zu gewährleisten, wurde die Öffnung des Adapters nur so groß gewählt, dass das FOV des Detektors nicht beeinträchtigt werden musste.

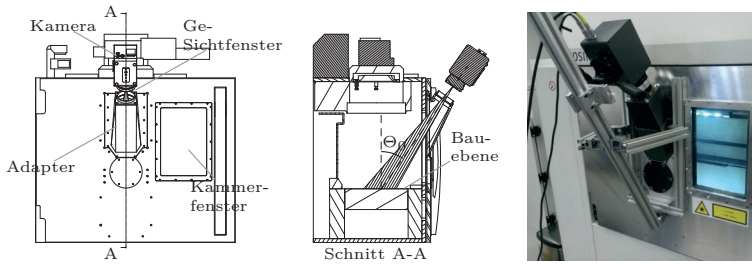


Abbildung A.4: Off-Axis-Integration einer Thermografiekamera mit Neugestaltung der Baukammertüre (Anlage *EOS EOSINT M270Xt*), minimaler Beobachtungswinkel ohne bauliche Veränderung der Baukammer: $\Theta_0 = 35°$, Arbeitsabstand $a \approx 0{,}5\,\mathrm{m}$

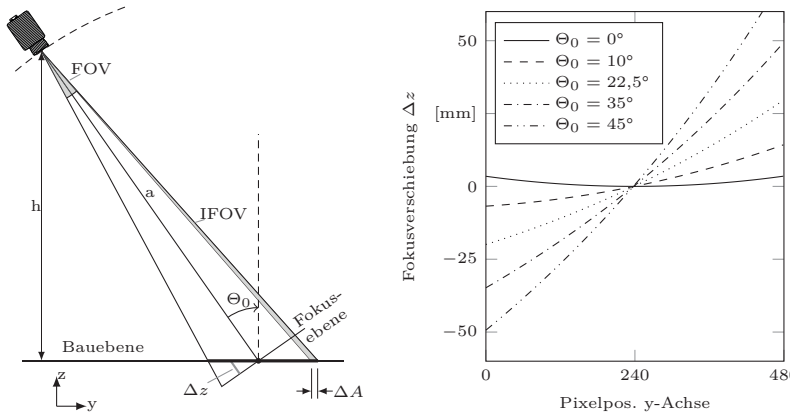
A.2.1.2 Verwendete Kameratechnik

Für die Prozessüberwachung kam eine Mikrobolometer-Kamera vom Typ *VarioCAM hr head* des Herstellers *Infratec* zum Einsatz. Das FPA besitzt 640

× 480 Bildpunkte, der spektrale Arbeitsbereich reicht von 7,5 µm bis 14 µm. Die resultierende Pixelauflösung in dieser Konfiguration (50-mm-Teleobjektiv mit Nahfokussierung, Arbeitsabstand 500 mm, Blendenzahl $F = 1$) beträgt ≈ 250 µm/px und es wurde ein Teilbereich von 38 % der gesamten Bauebene (250×250 mm) abgedeckt. Aktuelle Entwicklungen zeigen eine Kommerzialisierung von Megapixel-Detektoren auf, mit denen eine großflächige Überwachung der gesamten Bauebene bei vergleichbarer Pixelauflösung möglich ist. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sind demnach auf die Überwachung größerer Bereiche übertragbar.

A.2.1.3 Geometrie der Off-Axis-Abbildung

Bei der Off-Axis-Integration kommt es zu diversen optischen Effekten: einer perspektivischen Verzerrung, einer über das Baufeld variierenden Ortsauflösung und einer variierenden Abbildungsschärfe. Abbildung A.5 veranschaulicht die Geometrie der Abbildung und die sich ergebende positionsabhängige Fokuslagenverschiebung Δz. Mit zunehmendem Abstand zum Bildmittelpunkt führt dies zu einer unscharfen Abbildung.



(a) Geometrie der Off-Axis-Abbildung **(b)** Fokusverschiebung Δz im Bildbereich für unterschiedliche Off-Axis-Winkel

Abbildung A.5: Off-Axis-Anordnung und Fokuslagenverschiebung der Bauebene auf der Empfängermatrix (640 × 480 Pixel) für unterschiedliche Off-Axis-Winkel, FOV=18°

In dieser Anordnung werden Bereiche der Bauebene, die näher an der Optik liegen, feiner, Bereiche die weiter entfernt sind, gröber aufgelöst. Abbildung A.6 verdeutlicht diesen Zusammenhang für unterschiedliche Off-Axis-Winkel anhand der relativen Integrationsfläche ΔA pro Pixel für einen Matrixdetektor.

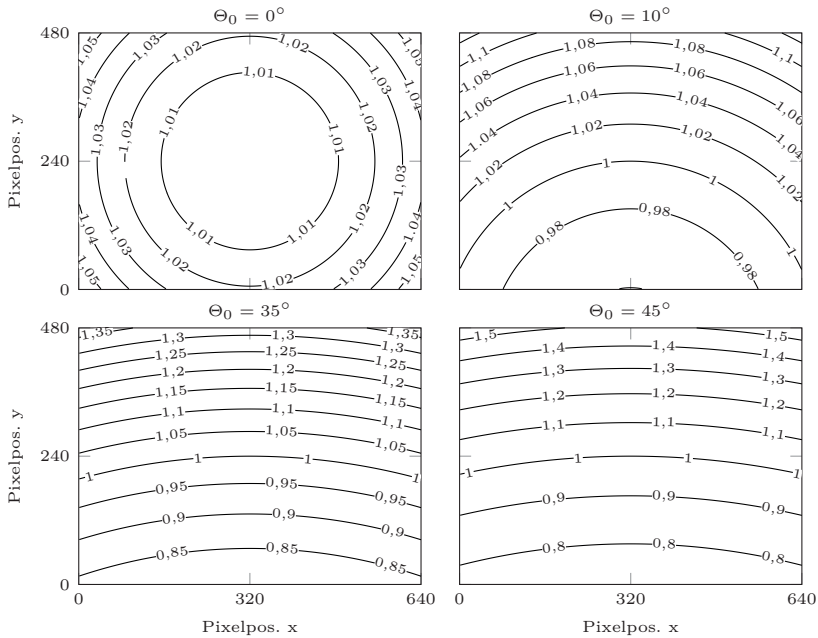


Abbildung A.6: Variable Integrationsflächen ΔA für unterschiedliche Off-Axis-Winkel (bezogen auf Bildmittelpunkt), (640 × 480 Pixel)-Empfängermatrix, FOV=18°

A.2.1.4 Geometrische Kalibrierung und Abbildungsfehler

Für die Temperaturbestimmung bei der Off-Axis-Anordnung ist der in Anhang A.2.1.3 beschriebene Sachverhalt wie folgt von Bedeutung. Unter der Annahme einer diffusen Ausstrahlung aus der Prozessebene mit der Strahldichte[1] L ist die Strahlintensität um den Cosinus des Beobachtungswinkels Θ reduziert (vgl. Unterabschnitt 2.6.1). Demgegenüber ist die Fläche, die ein einzelnes Sensorelement bei der Off-Axis-Integration beobachtet, um den gleichen Faktor erhöht (vgl. Abbildung A.7). Die zur Detektion zur Verfügung stehende Strahlungsleistung ist damit die gleiche wie bei einem Beobachtungswinkel von 0°, vorausgesetzt die betrachteten Flächenelemente weisen eine homogene Temperaturverteilung auf. Ist dies nicht gegeben, z. B. bei der Abbildung von kleinen Objekten, erscheinen diese kälter und unschärfer. Es kommt zu einer ortsabhängigen Auflösung (vgl. Anhang A.2.2).

[1] Aufgrund der oberflächen- und winkelabhängigen Emission stellt der diffuse Strahler nur eine grobe Näherung dar.

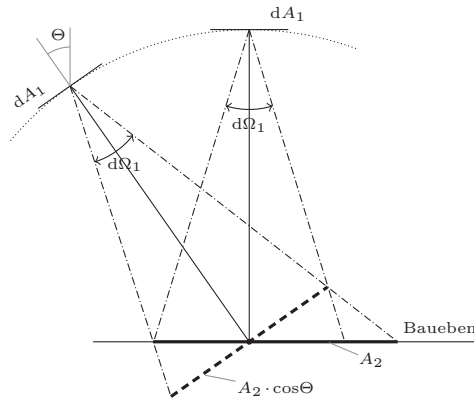


Abbildung A.7: Einfluss des Off-Axis-Winkels Θ auf die gemessene Strahlungsleistung bei diffusen Strahlern (Lambert-Kosinus-Gesetz); dA_1: Flächenelement Empfänger, $d\Omega_1$: Feldwinkel

Die optische Abbildung $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ von einer Objektszene auf eine zweidimensionale Ebene (Kamerabild) wird durch eine perspektivische Transformation beschrieben. Die Transformationsmatrix P (Projektionsmatrix) setzt sich aus Einzeltransformationen zusammen, die sowohl die intrinsischen Parameter (K) als auch die extrinsischen Parameter (R, C) der optischen Abbildung berücksichtigen:

$$u = PU = KR[I|-C]U \tag{A.2}$$

$P : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$: Projektionsmatrix[2], $u : (3 \times 1)$-Vektor der homogenen Koordinaten im Bildraum, $U : (4 \times 1)$-Vektor der homogenen Koordinaten im Ortsraum, $R : (3 \times 3)$-Rotationsmatrix, $C : (3 \times 1)$-Vektor der Kameraposition, $K : (3 \times 3)$-Kalibrierungsmatrix der Kamera.

Die Darstellung erfolgt anhand von homogenen Koordinaten, die gegenüber den kartesischen Koordinaten um eine Dimension erweitert sind. Die Lösungsmenge der entstehenden homogenen Gleichungen ändert sich nicht, wenn jede Gleichungsvariable durch ihr w-Faches ersetzt wird. Dieses Vorgehen ermöglicht eine skaleninvariante Darstellung (Bloomenthal & Rokne 1994). Die intrinsischen Parameter modellieren die optischen Eigenschaften des Linsensystems in der Kamera, die extrinsischen Parameter beschreiben die relative Lage des Weltkoordinatensystems zu dem Kamerakoordinatensystem.

[2]Die Projektionsmatrix dient der Abbildung vom Ortsraum $\mathbb{R}^3$ in den Bildraum $\mathbb{R}^2$. Im Formalismus der homogenen Koordinaten entspricht dies einer (3×4)-Matrix.

Kompensation von Abbildungsfehlern Die Bestimmung von K erlaubt die Kompensation von intrinsischen Abbildungsfehlern[3] der Kameraoptik. Zu diesem Zweck wird das mathematische Kameramodell nach Brown (1971) zugrunde gelegt. Für Thermografiekameras ist nach Yahyanejad et al. (2011) die Thematik der Verzeichnungskorrektur nicht etabliert, einige Ansätze sind jedoch in Maierhofer (2010) zu finden.

Die Verzerrung lässt sich in eine radiale Komponente V_R und eine tangentiale Komponente V_T separieren (Gleichung A.3). Die tangentiale Verzerrung ist von Bedeutung, wenn der Kamerasensor nicht ideal parallel zur theoretischen Bildebene angebracht ist. Die radiale Verzerrung dagegen ist die Folge einer geometrischen Abweichung der Linsen von ihrer Sollform. Die Matrizen V_T und V_R sind Funktionen von insgesamt fünf Parametern $(k_{c_1} \dots k_{c_5})$, die über ein Kalibrierungsverfahren bestimmt werden (Bouguet 2014):

$$\begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} + V_R(\tilde{u}, \tilde{v}) + V_T(\tilde{u}, \tilde{v}) \quad , \quad \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} u^* \\ v^* \end{pmatrix} \tag{A.3}$$

$\hat{u}_v, \hat{v}_v$: Bildkoordinaten (verzerrt) u^*, v^*: Weltkoordinaten (normalisiert), $\tilde{u}, \tilde{v}$: Bildkoordinaten (Lochkamera-Modell), z: Abstand Weltkoordinatensystem zu Kamerablende

Zur vollständigen Beschreibung der intrinsischen Abbildungseigenschaften der Kamera sind darüber hinaus weitere Parameter von Bedeutung. Mit dem Scherungsfaktor α_c wird ein nicht ideal rechtwinkliges Koordinatensystem, mit den Faktoren cc_x, cc_y die Abweichung der Sensormitte von der optischen Achse und mit den Brennweiten f_{cx}, f_{cy} eine Abweichung der Kamerapixel von der quadratischen Form berücksichtigt:

$$\begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f_{cx} & f_{cx}\alpha_c & cc_x \\ 0 & f_{cy} & cc_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u}_v \\ \hat{v}_v \\ 1 \end{pmatrix} \tag{A.4}$$

In Abbildung A.8 ist das Verzeichnungsmodell für die vorliegende Konfiguration dargestellt. Als Grundlage dienen die thermografischen Aufnahmen eines ebenen Schachbrettmusters unter verschiedenen Blickwinkeln.

Aus dem Modell ist ersichtlich, dass sich die maximalen Verzeichnungen am Bildrand ergeben. Die Verschiebung der Bildpunkte erreicht hier ca. 1,4 px und wird durch die radiale Verzeichnung dominiert (vgl. Tabelle A.4). Um das Modell zu verifizieren, zeigt Abbildung A.8 (rechts) die Ergebnisse aus der Rückprojektion aller Messpunkte nach der Kalibrierung. Der Großteil der

[3] z. B. sphärische Aberration, Bildfeldwölbung, Verzeichnung

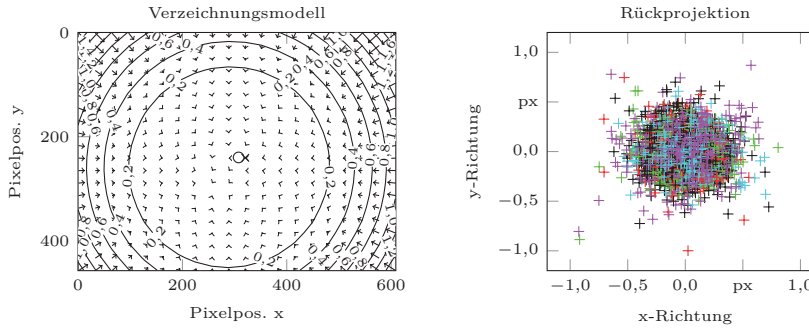


Abbildung A.8: Links: Verzeichnungsmodell *Infratec VarioCAM hr head* / 50-mm-Teleobjektiv / Nahfokussierungsoption (Datenbasis 54 Aufnahmen). Zur Herstellung des thermischen Kontrastes wurde ein vorgeheiztes, eloxiertes Aluminiumblech verwendet, bei dem die Eloxalschicht stellenweise abgetragen ist; rechts: Verbleibender Fehler bei Rückprojektion nach Korrektur.

Tabelle A.4: Verzeichnungsmodell *Infratec VarioCAM hr head* / 50-mm-Teleobjektiv / Nahfokussierungsoption

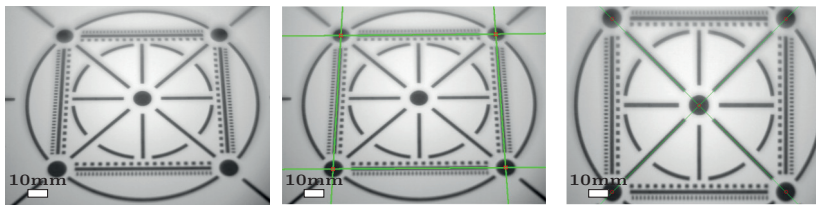
Kalibrierparameter	**Werte**	**Fehler**
Pixel Fehler [px]	0,171; 0,158	
Brennweite f_{cx}, f_{cy} [px]	2091,27; 2090,23	$\pm[5,74; 5,73]$
Bildhauptpunkt cc_x, cc_y [px]	306,73 ; 238,75	$\pm[4,541; 3.471]$
Radialkoeffizienten: k_{c1}, k_{c2}, k_{c5}	$(-0,124; -0,259; 0)$	$\pm[0,024; 0,839; 0]$
Tangentialkoeffizienten: k_{c3}, k_{c4}	$(0,001; -0,001)$	$\pm[4\times10^{-4}; 5\times10^{-4}]$

sog. *„reprojection errors“* liegt betragsmäßig unterhalb von 0,5 px und kann vernachlässigt werden.

Rektifizierung Die Abbildung der Bauebene auf den Kamerachip bzw. FPA entspricht einer perspektivischen Transformation nach Gleichung A.2. Es entsteht ein perspektivisch verzerrtes Bild der Bauebene. Um Messaufgaben ausführen zu können, muss das Bild durch eine nachfolgende Rektifizierung auf eine einheitliche Achsenskalierung transformiert werden. Zur Berechnung des rektifizierten Bildes ist das Gleichungssystem für eine projektive Transformation H (Homographie H: $\mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^2$) zu lösen, die die Bildkoordinaten aus dem Ursprungsbild P_i auf die perspektivisch entzerrten Koordinaten P_i' überführt (Gleichung A.5). Längen und Winkel sind unter dieser Transformation nicht invariant und parallele Linien werden nicht notwendigerweise parallel abgebildet. Es gilt:

$$P_i' = H\, P_i \tag{A.5}$$

Für die Projektionsvorschrift von H werden nach Hartley & Zisserman (2003) acht Gleichungen benötigt. Dies folgt daraus, dass nur das Verhältnis der Matrixelemente von H signifikant ist. Demnach wird die Homographie über vier Punkte in einer Ebene definiert, deren Koordinaten vor und nach der Projektion bekannt sein müssen[4]. Zur Bestimmung der Homographie wird ein Kalibriermuster auf Basis einer eloxierten Aluminiumplatte in der Einbausituation der Kamera aufgenommen. Die Positionen der Referenzpunkte werden anschließend über Bildverarbeitungsalgorithmen identifiziert (vgl. Abbildung A.9).



(a) Originalaufnahme **(b)** Punkterkennung **(c)** Rücktransformation

Abbildung A.9: Rektifizierung der Thermografieaufnahmen anhand von vier Referenzpunkten auf einem Kalibriermuster

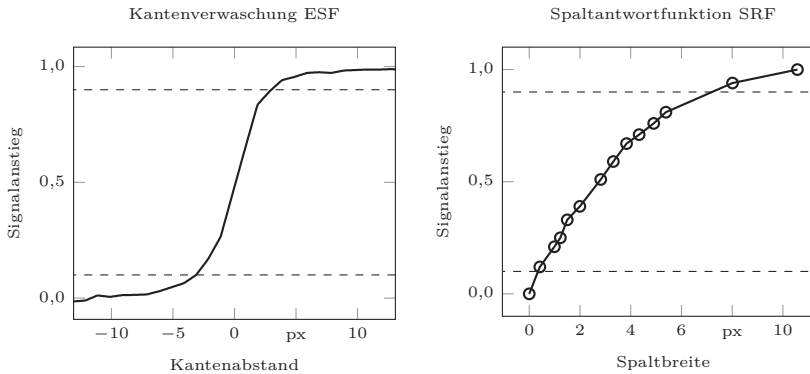
Die begrenzte Schärfentiefe erschwert die genaue Erkennung der Referenzpunkte auf dem Kalibriermuster. Die Punkte werden daher als Schnittpunkte von dünnen Linien ermittelt, deren Lage numerisch anhand von mehreren Messstellen bestimmt wird. Bei den Referenzmarkierungen handelt es sich um ausgedehnte Objekte und es kommt zu projektiven Fehlern bei ihrer Lagebestimmung. Aufgrund der geringen Abmaße können diese Fehler jedoch vernachlässigt werden.

A.2.2 Ortsauflösung

Zur Charakterisierung der Abbildungsqualität und Ortsauflösung wird im Folgenden die sog. *Edge Spread Function* (ESF) betrachtet. Sie beschreibt, wie eine scharfe Kante im Ortsraum durch das Kamerasystem abgebildet wird und kann für die Quantifizierung der Auflösung verwendet werden. Unabhängig von dem Off-Axis-Winkel ist aus Abbildung A.10 zu erkennen, dass die thermografische Abbildung im Fokusbereich eine deutliche Flankenaufweitung bzw. Kantenverwaschung aufweist. Der Übergang von einem stark emittierenden Bereich zu einem schwach emittierenden Bereich erfolgt nicht abrupt, sondern erstreckt sich über mehrere Detektorpixel.

[4] Die rechnerische Bestimmung der Transformationsmatrix erfolgt über den sog. DLT-Algorithmus (Hartley & Zisserman 2003).

Nach Maierhofer (2010) tritt der Effekt unabhängig von der Objektentfernung auf und ist nicht auf eine sphärische Aberration der Linse zurückzuführen. Als Ursache werden chromatische Aberrationen der Optik und ein thermisches Übersprechen der Einzeldetektoren in dem Bolometersensor angenommen. Letzteres ist durch die Wärmeleitung und Wärmestrahlung zwischen einzelnen Detektorelementen bedingt und reduziert den Kontrast bzw. die Modulation (Budzier et al. 2011).



(a) Eine abrupte Emissionsänderung erscheint in der Thermoaufnahme aufgeweitet: Signalanstieg (10 – 90 % nach ca. 6,1 Pixel (≙ 1,5 mm im Ortsraum)

(b) Die Temperatur homogen abstrahlender Objekte kann erst ab einer Größe von $l \approx 10\,\text{px}$ absolut gemessen werden (≙ 2,5 mm im Ortsraum)

Abbildung A.10: Kantenverwaschung und Spaltantwort

In diesem Zusammenhang ist der Einfluss der beobachtbaren Objektgröße von Belang. Wird ein Objekt betrachtet, dessen Fläche theoretisch kleiner als der Integrationsbereich eines Pixels ist (IFOV), so erreicht die gemessene Strahlungsleistung nicht ihren Realwert. Wie sich dieser Sachverhalt auf die praktische Messung auswirkt, wird über die *Slit Response Function* (SRF) bestimmt. Hierbei wird die transmittierte Strahlung eines homogen ausgeleuchteten Spalts bei variablem Spaltabstand gemessen.

Aus Abbildung A.10 ist ersichtlich, dass selbst wenn die Objektgröße bzw. Spaltbreite gleich dem Integrationsbereich eines Pixels (IFOV) ist, die Signalhöhe nur ca. 20 % erreicht hat. Mit 2 bis 3 Pixeln Spaltbreite steigt die Signalhöhe auf ca. 50 % an. Eine absolute Temperaturbestimmung erfordert demnach mindestens 8 bis 10 homogen ausgeleuchtete Pixel (vgl. Anhang A.2.4). Für die räumliche Auflösung kann nach Maierhofer (2010) trotzdem mit dem geometrischen IFOV gerechnet werden, wenn der tatsächliche Temperaturunterschied den Wert übersteigt, der sich aus dem Pixelhub eines Pixels bzgl.

seiner Umgebung ergibt. Dies ist vor allem bei der Erkennung steiler örtlicher Temperaturgradienten vorteilhaft.

Zur objektiven Bewertung der Abbildungsqualität über das gesamte Gesichtsfeld wird die *Modulation Transfer Function* (MTF) herangezogen. Sie beschreibt das Kontrastverhältnis der Abbildung in Abhängigkeit der Ortsfrequenz f einer abzubildenden Struktur. Die MTF ist die Fouriertransformierte der Punktspreizfunktion (PSF), die die Abbildung eines infinitesimalen Punktes durch das optische System charakterisiert:

$$\mathrm{MTF}(f) = \left| \frac{FT\{\mathrm{PSF}(x,y)\})}{FT_{f=0}\{\mathrm{PSF}(x,y)\}} \right| \tag{A.6}$$

Die Bestimmung der MTF erfolgt anhand der Kantenmethode nach Greer & van Doorn (2000) bei der Off-Axis-Abbildung eines Schachbrettmusters. Die gemessene MTF ist die MTF des Gesamtsystems, die sich für lineare Systeme nach Budzier et al. (2011) als Produkt aus der optischen MTF[5] und der geometrischen MTF[6] zusammensetzt (vgl. Abbildung A.11).

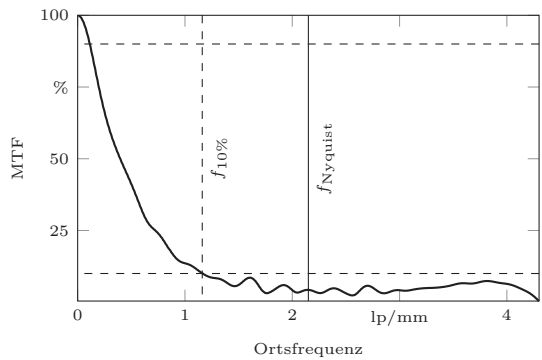


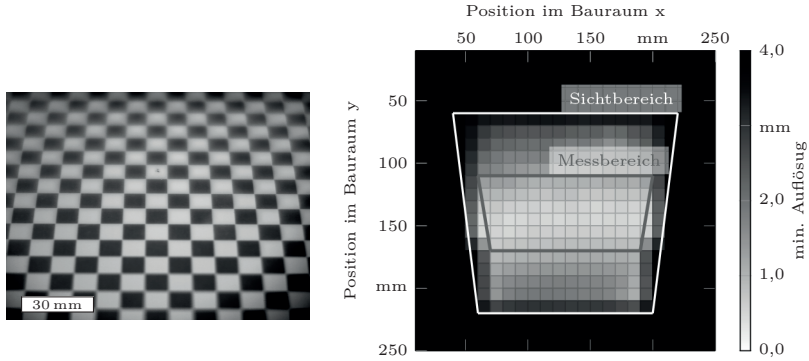
Abbildung A.11: Modulationstransferfunktion in der Fokusebene, aufgenommen anhand einer eloxierten Aluminiumplatte

Mit steigender Ortsfrequenz, angegeben in Linienpaaren pro mm, fällt die MTF der verwendeten Kamera im Vergleich zu hochwertigen optischen Kameras schnell ab. Als praktische Ortsauflösung wird diejenige Ortsfrequenz gewählt, bei der die MTF auf 10 % abgesunken ist. Bei dieser Ortsfrequenz

[5] Die optische MTF wird durch die beugungsbegrenzte Abbildung limitiert und fällt bei einer Ortsfrequenz entsprechend dem Airy-Radius auf ca. 10 % ab.

[6] Die geometrische MTF ist durch die Diskretisierung der Pixel bedingt. Bei der Nyquist-Frequenz fällt sie auf ca. 64 % ab und wirkt als Tiefpass.

bzw. Objektgröße wird demnach nur noch ein Kontrast von 10 % übertragen[7]. Abbildung A.12 veranschaulicht die nach diesem Prinzip ermittelten Ortsauflösungen innerhalb des gesamten Gesichtsfeldes der Kamera.



(a) Thermografieaufnahme eines Schachbrettmusters zur Bestimmung der MTF

(b) Minimale Auflösung und ausgewählter Messbereich (Ortsfrequenz bei MTF_{10}, max. um den Faktor 2 verminderte Auflösung bezogen auf die Bildmitte)

Abbildung A.12: Definition des Messbereichs auf Basis der MTF-Bestimmung für einen Off-Axis-Winkel von $\Theta_0 = 45°$

Für die Ortsauflösung im rektifizierten Bild ist darüber hinaus folgender Aspekt von Bedeutung. Durch die projektive Transformation wird den Strahlungswerten aus der Originalaufnahme ein neuer Strahlungswert auf Basis einer bilinearen Interpolation der benachbarten Umgebung zugeordnet. Diese führt zu einer weiteren Mittelung v. a. bei scharfen Kanten. Die bedeutendste Ursache für die Reduktion der Ortsauflösung außerhalb der Bildmitte liegt jedoch in der geringen Schärfentiefe. Die Defokussierungseffekte haben eine fehlerbehaftete Messung der absoluten Strahlungsleistung außerhalb der Bildmitte zur Folge. Für die Off-Axis-Überwachungsaufgabe wurde daher ein Bereich festgelegt, innerhalb dessen die Ortsauflösung einen festgelegten Wert nicht unterschreitet (vgl. Abbildung A.12b).

A.2.3 Zeitauflösung

Die Zeitauflösung des verwendeten Detektors ist maßgeblich durch die thermische Trägheit der Sensorelemente gegeben. Nach Unterabschnitt 2.6.4 führt die thermische Zeitkonstante τ_{th} zu einem verzögerten Ansteigen der Temperatur T_D des Detektorelements, nachdem sich die Temperatur des Messobjektes

[7] Die Wahl entspricht dem Beugungslimit der optischen MTF.

ändert. Zur Charakterisierung der Detektorträgheit wurde die Antwort des Messsystemes auf einen sprunghaften Anstieg des Eingangssignals (Sprungantwort) untersucht. Aus dem Anstieg des Ausgangssignals kann die thermische Zeitkonstante τ_{th} nach Gleichung A.7 bzw. Gleichung 2.25 abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} \Delta T_{Anstieg}(t) &= (T_1 - T_0)\left(1 - e^{\frac{(-t-t_0)}{\tau_{th}}}\right) \qquad t > t_0 \\ \Delta T_{Abfall}(t) &= (T_1 - T_0)\, e^{\frac{(-t-t_0)}{\tau_{th}}} \qquad t > t_0 \end{aligned} \tag{A.7}$$

Um die Stufen- bzw. Impulsantwort des verwendeten Detektors messtechnisch zu bestimmen, wird ein ausgedehntes Objekt bei bekannter Temperatur T_1 durch eine Blende bei Temperatur T_0 betrachtet. Durch das schnelle Öffnen bzw. Schließen der Blende variiert die am Detektor ankommende Strahlungsleistung sprunghaft. Für die zeitlich hochaufgelöste Messung des damit verbundenen Temperaturanstieges kann der zeilenweise Auslesemodus (*Rolling-Frame*) des Detektorarrays verwendet werden: Die N_z Zeilen des Detektorarrays werden sequentiell ausgelesen, die gesamten Pixel einer Zeile N_s dagegen gleichzeitig.

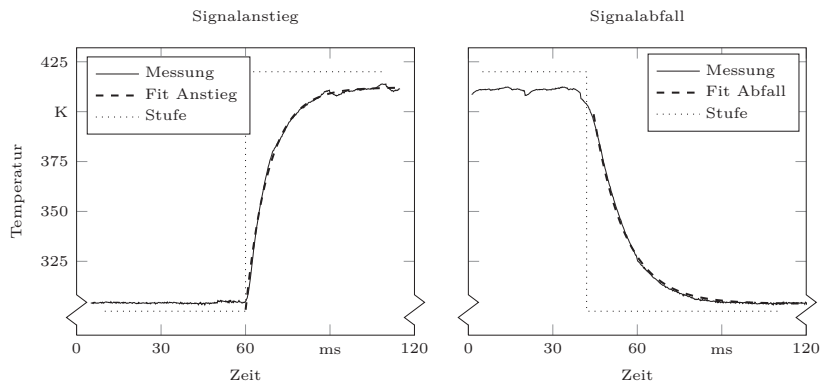


Abbildung A.13: Systemantwort auf eine Stufenfunktion; links: ansteigend, rechts: abfallend

Die max. Auslesezeit (Integrationszeit für die Detektorelektronik) einer Zeile ist durch die Anzahl der Zeilen und die Bildwiederhohlrate f_B bestimmt. Die Pixelwerte einer einzelnen Spalte werden in diesem Modus mit einem zeitlichen Abstand von $1/(f_B \cdot N_z)$ ausgelesen, der typischerweise in der Größenordnung von 40 μs liegt. Demnach befinden sich die einzelnen Pixel einer Spalte zu ihrem jeweiligen Auslesezeitpunkt an einer anderen Stelle ihrer jeweiligen Anstiegs- bzw. Abfallkurve. Wird ein vergleichbares Verhalten der einzelnen Pixel im Detektor angenommen, lässt sich damit eine repräsentative Antwortkurve

stückweise zusammensetzen. Um eine instantane Abschattung bzw. Öffnung des Shutters für eine Detektorspalte zu gewährleisten, muss dessen Bewegung parallel zu den Detektorzeilen erfolgen.

Die thermische Zeitkonstante unterscheidet sich je nach Richtung des Impulses (ansteigend, abfallend) geringfügig und beträgt für den verwendeten Detektor 8,3 ms bzw. 11,6 ms (vgl. Abbildung A.13). Das Übertragungsverhalten des thermischen Detektors ist im Wesentlichen das eines Tiefpasses erster Ordnung (Schuster 2004). Dies hat zur Folge, dass hochfrequente Vorgänge nicht aufgelöst werden können. Die thermische Zeitkonstante beschränkt die Samplingrate, die sinnvollerweise verwendet werden kann, auf $f_B = 50\,\mathrm{Hz}$. Nach einem Samplingintervall von $t_s = 1/50\,\mathrm{Hz} = 20\,\mathrm{ms}$ hat das Signalniveau am Ausgang $1 - \mathrm{e}^{(-t_s/t_{th})} = 91\,\%$ des eigentlichen Temperaturunterschiedes erreicht. Ein Messwert, der mindestens zu 99 % dem des eigentlichen Temperaturunterschiedes entspricht, wird nach frühestens 45 ms bzw. nach mindestens drei Bildern erreicht.

Aus dem bekannten Trägheitsverhalten des Detektors (Stufenantwort $s(t)$, Impulsantwort $g(t)$) kann die vorherrschende Signalamplitude $T_O(t)$ durch die Entfaltung des Messsignals $T_M(t)$ abgeschätzt werden. Die Voraussetzung hierfür ist, dass es sich um ein lineares zeitinvariantes System handelt (Gleichung A.8). Dann gilt:

$$T_M(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_O(t') \cdot g(t - t')\,\mathrm{d}t' \tag{A.8}$$

Abbildung A.14 zeigt die typischen Ausgangssignale bei der Einzelspur- bzw. Hatch-Belichtung und deren Korrektur durch die abgeleitete Übertragungsfunktion. Die gemessene Bestrahlungsstärke bzw. Temperatur ist demnach geringer als ihr Ist-Wert. Eine absolute Bestimmung der Maximaltemperaturen ist aufgrund des Nyquist-Kriteriums daher nicht möglich: Die Prozessgeschwindigkeiten beim SLM liegen in der Größenordnung von $f_{\mathrm{Hatch}} = \frac{v}{l_h} \approx 250\,\mathrm{Hz}$ bzw. $1 \times 10^6\,\mathrm{K/s}$ und übersteigen die Samplingrate von Mikrobolometer-Detektoren um ein Vielfaches. Absolute Temperaturmessungen sind damit nur bei dem verhältnismäßig langsamen Abkühlvorgang – Millisekunden nach dem Energieeintrag – möglich.

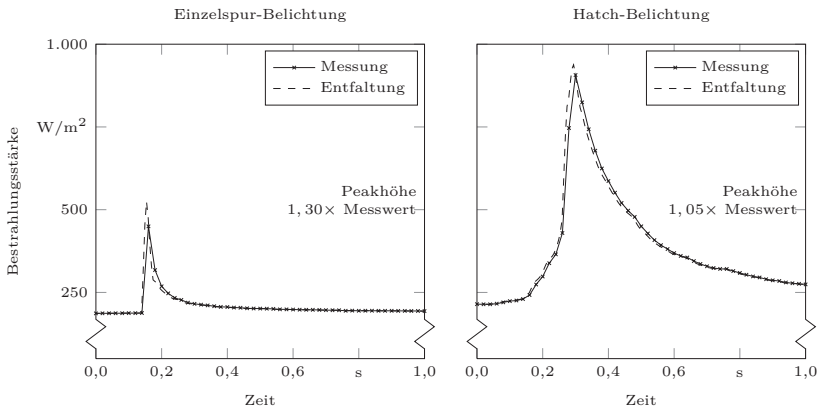


Abbildung A.14: Links: Signalentfaltung bei der Belichtung einer Einzelspur; rechts: Signalentfaltung bei der Hatch-Belichtung. Einzelne Peaks der Hatchlinien werden nicht aufgelöst. Parameter: $P = 195\,\mathrm{W}$, $v = 1200\,\mathrm{mm/s}$, $d_l = 40\,\mu\mathrm{m}$, $a_h = 90\,\mu\mathrm{m}$, $l_h = 5\,\mathrm{mm}$

A.2.4 Temperaturbestimmung beim Strahlschmelzen

Für die Temperaturmessung beim SLM wird im Nachfolgenden auf die konkreten Randbedingungen der in Anhang A.2.1 gewählten Anordnung eingegangen. Der Fokus liegt auf der Messung stationärer Temperaturen bzw. zeitlich sich langsam ändernder Temperaturen.

A.2.4.1 Messmodell

Unter Berücksichtigung des für den Betrieb notwendigen Ge-Sichtfensters muss das Modell der thermografischen Messung aus Gleichung 2.18 erweitert werden (vgl. Abbildung A.15).

Die Strahlungsanteile aus dem Prozess werden durch das Sichtfenster teilweise abgeschwächt, Umgebungsstrahlung der Temperatur T_U wird durch das Fenster in die Kamera reflektiert und es kommt zu einer Emission von Eigenstrahlung bei der Temperatur T_W. Darüber hinaus ist die Eigenemission der Transmissionsstrecke außerhalb der Baukammer zu berücksichtigen. Die am Empfänger ankommenden Strahlungsanteile setzen sich wie folgt zusammen:

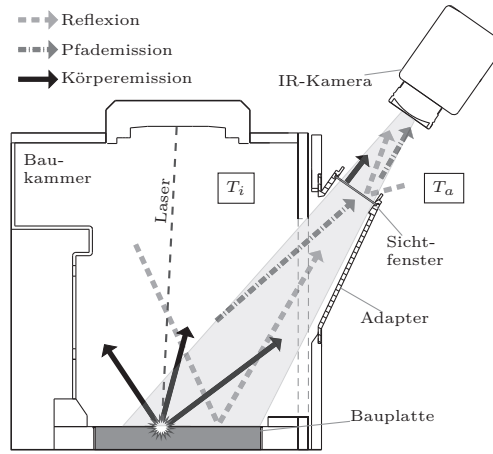


Abbildung A.15: Messmodell sowie Strahlungsanteile aus Prozess und Umgebung

$$\begin{aligned}\Phi_M =& \tau_{A_a}\tau_w\left[\tau_{A_i}\left(\epsilon\cdot\Phi_B(T_O)+(1-\epsilon)\cdot\Phi_B(T_{U_i})\right)+(1-\tau_{A_i})\cdot\Phi_B(T_{A_i})\right]\\ &+\tau_{A_a}\epsilon_w\Phi_B(T_W)\\ &+\tau_{A_a}\rho_w\Phi_B(T_{U_a})\\ &+(1-\tau_{A_a})\Phi_B(T_{A_a})\end{aligned} \tag{A.9}$$

$T_{A_{a,i}}$: Atmosphärentemperatur außerhalb/innerhalb der Prozesskammer, $T_{U_{a,i}}$: Umgebungstemperatur außerhalb/innerhalb der Prozesskammer, $\tau_{A_{a,i}}$: Transmission der Atmosphäre außerhalb/innerhalb der Prozesskammer, $\epsilon_w, \tau_w, \rho_w$: Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrad des Sichtfensters

Die Gleichung kann mit der Annahme vereinfacht werden, dass die Atmosphäre ideal transmittierend ist, d. h. $\tau_{A_{a,i}} = 1$ (vgl. Anhang A.2.4.3). Zudem wird eine einheitliche Umgebungs- und Atmosphärentemperatur innerhalb der Kammer $T_{A_i} = T_{U_i} =: T_i$ bzw. außerhalb der Kammer $T_{A_a} = T_{U_a} = T_W =: T_a$ angenommen. Letztere entspricht gleichzeitig der Temperatur des Sichtfensters. Bei diesen Temperaturen handelt es sich um effektive Temperaturen, die auf Basis von Zusatzmessungen bestimmt werden müssen. Es folgt das hier applizierte Modell der Temperaturbestimmung (Gleichung A.10):

$$\begin{aligned}T_O &= \Phi_B^{-1}\left\{\frac{\frac{\Phi_M-(1-\tau_w)\Phi_B(T_a)}{\tau_w}-(1-\epsilon)\cdot\Phi_B(T_i)}{\epsilon}\right\}\\ T_O &\approx \Phi_B^{-1}\left\{\frac{\Phi_M}{\tau_w\epsilon}-(1/\epsilon-1)\cdot\Phi_B(T_i)\right\}\end{aligned} \tag{A.10}$$

Φ_M ist der Strahlungsfluss, der vom Messgerät in seinem Spektralbereich gemessen wird. $\Phi_B(T_{i,a})$ bezeichnet den Strahlungsfluss eines Schwarzkörpers bei der Innen- bzw. Außentemperatur im effektiven Messbereich des Detektors. Abbildung A.16 zeigt die nach Gleichung A.10 bestimmte Temperatur in Abhängigkeit der gemessenen Bestrahlungsstärke und weiterer Parameter.

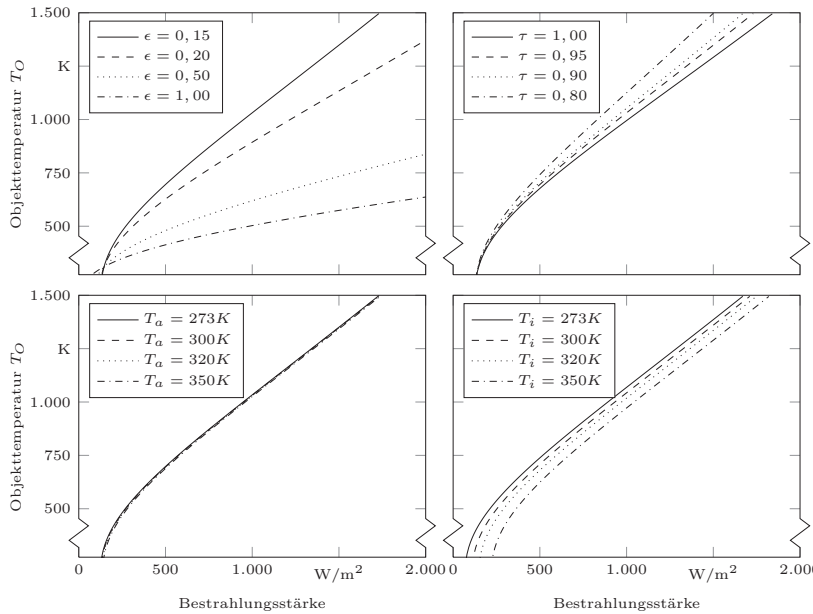


Abbildung A.16: Objekttemperatur nach Gleichung A.10 in Abhängigkeit der gemessenen Bestrahlungsstärke; Parameter (falls nicht anders angegeben): $\epsilon = 0{,}15$, $\tau_w = 0{,}95$, $T_a = 300\,\mathrm{K}$, $T_i = 310\,\mathrm{K}$

Während die Innen- und die Außentemperatur für kleine Objekttemperaturen relevant sind, gehen der Emissionsgrad des Objektes und der Transmissionsgrad des Sichtfensters bei hohen Objekttemperaturen maßgeblich in die Temperaturbestimmung ein.

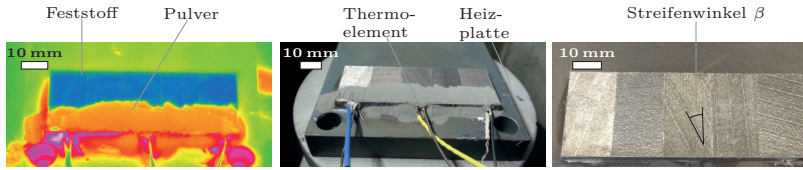
A.2.4.2 Emission

Der Emissionsgrad wird nach Unterabschnitt 2.6.1 von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Für die thermografische Überwachung des SLM-Prozesses kann v. a. die Abhängigkeit von der Temperatur, vom Beobachtungswinkel und von der Oberflächenstruktur von Bedeutung sein. Aus Gleichung A.9 und Gleichung A.10 wird der Emissionsgrad bei bekannter Umgebungstemperatur,

bekannter Transmission des Schutzfensters und bekannter Objekttemperatur T_O nach Gleichung A.11 bestimmt:

$$\epsilon = \frac{1/\tau_w(\Phi_M - (1-\tau_w)\Phi_B(T_a)) - \Phi_B(T_i)}{\Phi_B(T_O) - \Phi_B(T_i)} \tag{A.11}$$

Für eine prozessnahe Ermittlung des Emissionsgrades von Feststoff und Pulverwerkstoff wurden im Rahmen der Arbeit die Strahlungswerte und korrespondierenden Temperaturen im Einbauzustand ($\Theta_0 = 35°$) gemessen und anhand von Ex-situ-Messungen verifiziert (vgl. Abbildung A.17).



(a) Thermographische Aufnahme **(b)** Taktile Temperaturmessung **(c)** Untersuchte Oberflächenstruktur

Abbildung A.17: Emissionsgradbestimmung an IN 718-Probenkörper mit typischen Oberflächenstrukturen: Die Objekttemperatur wurde während eines quasistationären Abkühlvorgangs thermografisch und taktil (Thermoelemente Typ T und K) gemessen. Die Umgebungstemperatur wurde innerhalb der Baukammer aufgenommen (Thermoelement Typ T).

Sowohl für den Festkörper als auch für den Pulverwerkstoff geht die Strahlungs-Temperatur-Kennlinie des Detektors in die Bestimmung des Emissionsgrades ein. Es handelt sich daher in beiden Fällen um einen gemittelten Emissionsgrad in dem Spektralbereich 7,5 µm–14 µm.

Emission des Feststoffes Abbildung A.18 zeigt den Emissionsgrad des Feststoffs im Temperaturbereich von 350 K bis 600 K. Für Temperaturen nahe der Umgebungstemperatur ist der Einfluss der Messunsicherheiten deutlich an dem Rauschverhalten zu erkennen. In dem gemessenen Temperaturbereich ist die Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades jedoch gegenüber anderen Einflüssen vernachlässigbar.

Die im Prozess vorherrschende Oberfläche strahlgeschmolzener Bauteile ist durch die Orientierung der einzelnen Schmelzraupen bzw. Streifen gekennzeichnet. Aus Abbildung A.19 ist eine geringe Abhängigkeit des Emissionsgrades diesbezüglich ersichtlich, die sich in dem untersuchten Winkelbereich auf ±3 % quantifizieren lässt. Aus Ex-situ-Messungen ist zudem eine deutliche Abhängigkeit des Emissionsgrades vom Beobachtungswinkel zu identifizieren (vgl. Abbildung A.19). Für die Messung im Prozess kann diese Abhängigkeit je

nach Off-Axis-Winkel berücksichtigt werden, da der Beobachtungswinkel über das Gesichtsfeld variiert (vgl. Anhang A.2.1).

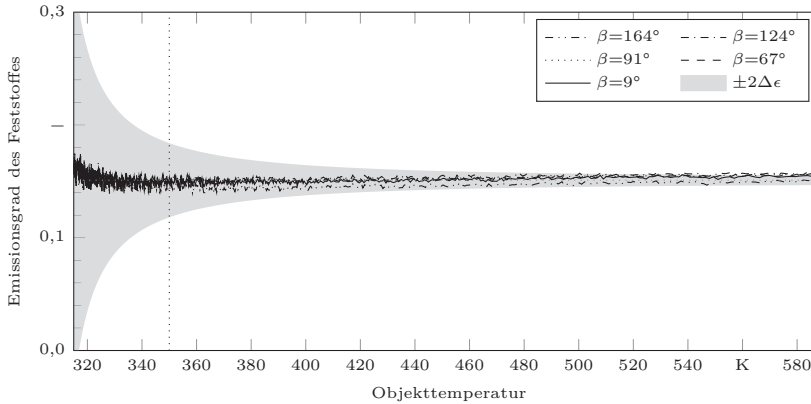


Abbildung A.18: Emissionsgrad des Feststoffs in Abhängigkeit der Temperatur und des Streifenwinkels β, $\epsilon_{\text{Fest}} = 0{,}15 \pm 0{,}01$ (Unsicherheit $\Delta\epsilon$ vgl. weiter unten)

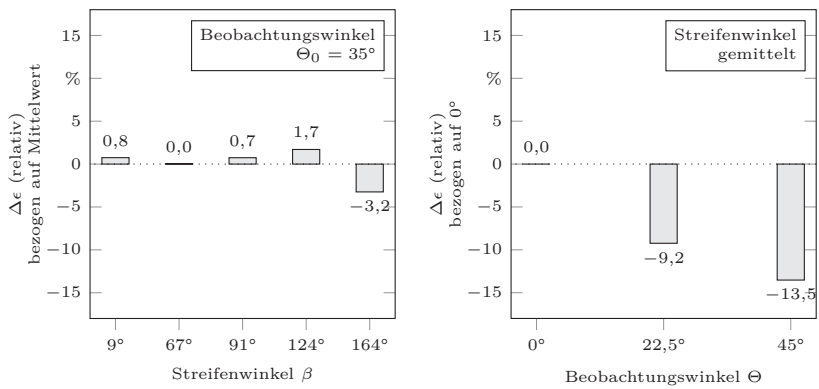


Abbildung A.19: Emissionsgrad des Feststoffes in Abhängigkeit der Oberfläche (Streifenwinkel β) und des Beobachtungswinkels (Θ)

Die aus der Oberflächen-, Winkel- und Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades folgenden Unsicherheiten bei der absoluten Temperaturbestimmung werden nachfolgend über eine konstante Unsicherheit des Emissionsgrades berücksichtigt (vgl. Anhang A.2.4.6).

Emission des Pulverwerkstoffes Abbildung A.20 zeigt den Emissionsgrad des nicht verfestigten Pulverwerkstoffs im Temperaturbereich von 350 K bis 600 K. Für die Prozessüberwachung des Schichtauftrags ist dabei im Wesentlichen der Bereich um die Vorheiztemperatur von ca. 80 °C relevant. Bei der Emissionsgradbestimmung für höhere Temperaturen muss die Oxidation an Luft und der Sintergrad berücksichtigt werden, da diese Effekte einer Veränderung der Oberflächen- bzw. der Emissionseigenschaften zur Folge haben. Bezüglich der Beobachtungsrichtung konnte aus Ex-situ-Messungen im Rahmen der Messgenauigkeit keine Variation des Pulveremissionsgrades im Bereich von 0° bis 45° festgestellt werden.

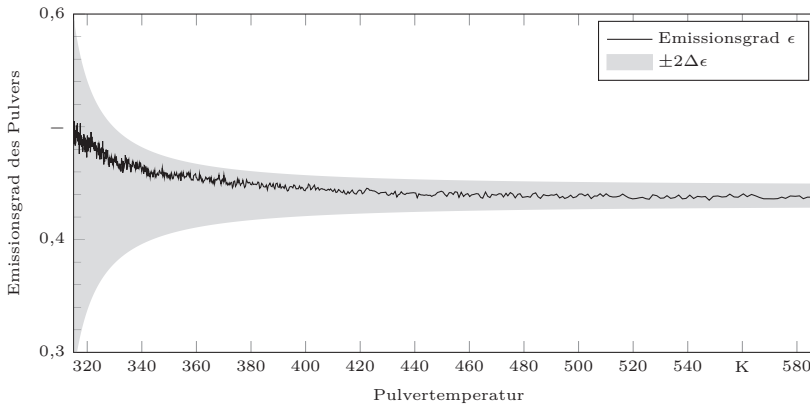


Abbildung A.20: Emissionsgrad des Pulvers in Abhängigkeit der Temperatur, $\epsilon_{\text{Pulver}} \approx 0{,}44 \pm 0{,}01$

Fehlerbetrachtung bei der Emissionsgradbestimmung Da Metalle nach Kapitel 2 sehr geringe Emissionsgrade besitzen können, liegt die Strahlungsleistung aus der Umgebung und die Strahlungsleistung des Messobjekts bei Umgebungstemperatur in der gleichen Größenordnung. Für genaue Messungen des Emissionsgrades in diesem Temperaturbereich müssen die Temperaturen von Umgebung und Objekt hochgenau bekannt sein (vgl. Gleichung A.11). Nachfolgend wird aufgezeigt, dass schon geringe Unsicherheiten in der taktilen Temperaturmessung der Umgebung bzw. des Probekörpers zu erheblichen Unsicherheiten beim Emissionsgrad führen.

Die Fehlerabschätzung für die Bestimmung des Emissionsgrades erfolgt nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gleichung A.12):

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon_{T_B} =& \sqrt{(\frac{\partial\epsilon}{\partial\Phi_M}\Delta\Phi_M)^2+(\frac{\partial\epsilon}{\partial T_a}\Delta T_a)^2+(\frac{\partial\epsilon}{\partial T_i}\Delta T_i)^2+} \\ & \overline{(\frac{\partial\epsilon}{\partial T_O}\Delta T_O)^2+(\frac{\partial\epsilon}{\partial\tau_w}\Delta\tau_M)^2} \\ \frac{\partial\epsilon}{\partial T_{a,i,o}} =& \frac{\partial\epsilon}{\partial\Phi_B(T_{i,a,o})}\frac{\partial\Phi_B}{\partial T}|_{T_{i,a,o}}\end{aligned} \tag{A.12}$$

Die Unsicherheiten der taktilen Temperaturmessung sind neben den intrinsischen Eigenschaften der verwendeten Thermoelemente auf die Position der Thermoelemente und die thermische Verbindung zum Messobjekt (Kontaktstellen) zurückzuführen. Die Baukammertemperatur T_i war zudem inhomogen, sodass sie an mehreren Positionen aufgenommen und anschließend gemittelt wurde.

Wird ein konstanter Emissionsgrad im Bereich der Umgebungstemperaturen angenommen[8], muss für die so ermittelte Baukammertemperatur ein Effektivwert $T_{i,\text{eff}} = T_i + \Delta$ eingeführt werden. Die Korrektur Δ trägt dem Umstand Rechnung, dass die Umgebungs- bzw. Atmosphärentemperatur aufgrund ihrer Ortsabhängigkeit nicht direkt zu erfassen ist und geringfügig von der Temperatur an einer ortsfesten Messstelle abweicht ($\Delta \approx 2K$). Für hohe Objekttemperaturen hat diese Korrektur keine Relevanz. Abbildung A.21 zeigt den nach Gleichung A.12 ermittelten Absolutfehler des Emissionsgrades für unterschiedliche Parameter.

[8] Hier herrschen die höchsten Unsicherheiten in der Emissionsgradbestimmung vor.

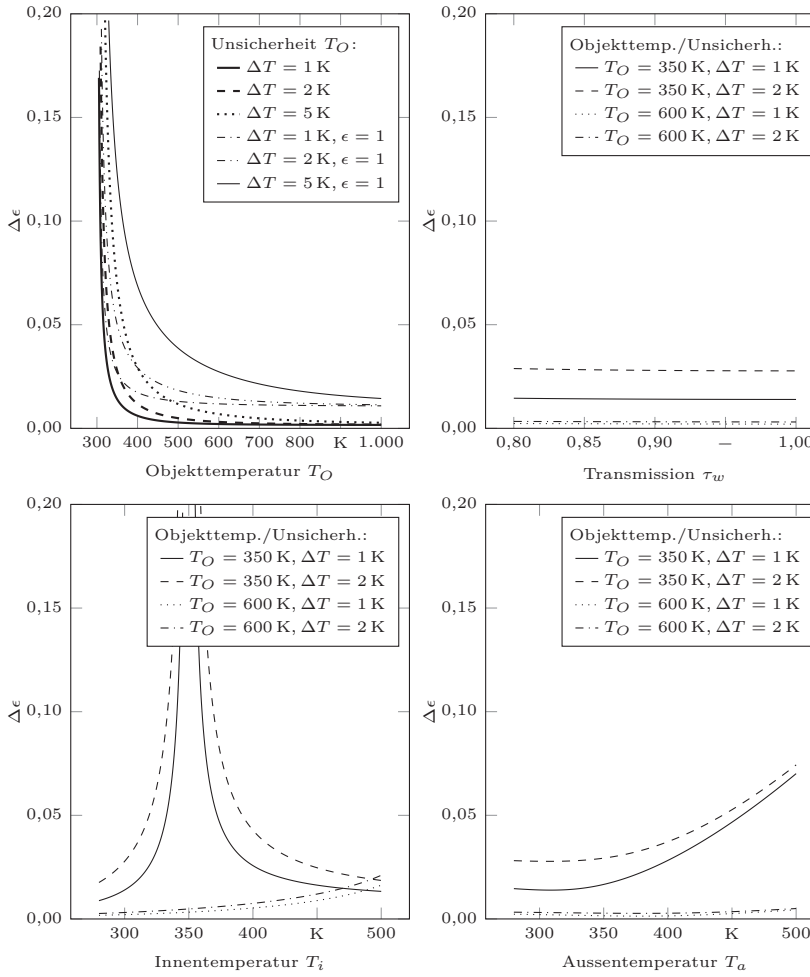


Abbildung A.21: Absolutfehler der ϵ-Bestimmung in Abhängigkeit der Objekttemperatur, der Transmission des Schutzglases, der Innentemperatur und der Außentemperatur; Berechnungsgrundlage, soweit nicht anders angegeben: $\Delta\tau_w = 0{,}02$, $\Delta T_{O,i,a} = 5\,\mathrm{K}$, $\Delta\Phi_M = 0{,}07\,\mathrm{W}$

A.2.4.3 Transmission

Für die Übertragung der emittierten Wärmestrahlung entlang des Transmissionspfades sind folgende Aspekte von Relevanz (vgl. Anhang A.2.1):

- Prozessemissionen: Über der Prozesszone kommt es zu einer schnellen Verdampfung des Materials aus der Schmelze. Der Bereich, über dem die Verdampfung stattfindet, ist in der Größenordnung des Schmelzbades (100 µm) und daher nur für örtlich hochauflösende Messsysteme von Belang. Zudem führt die vorhandene Schutzgasströmung zu einem schnellen Verblasen des Dampfes und der aufgeheizten Gasschichten. Die Absorption durch Materialdampf bzw. Plasma wird für die Temperaturmessung im Prozess vernachlässigt.
- Schutzgasatmosphäre in der Baukammer: Nach Unterabschnitt 2.6.2 ist die Absorption für die relevanten Schutzgase und Transmissionsstrecken zu vernachlässigen.
- Sichtfenster: Die Transmission des Ge-Sichtfensters zeigt nach Abbildung A.22 ein wellenlängenabhängiges Verhalten. Die gemittelte Transmission über den relevanten Wellenlängenbereich beträgt $\tau_w = 0{,}867 \pm 0{,}002$.
- Atmosphäre außerhalb der Baukammer: Aufgrund der kurzen Entfernungen zwischen der Baukammeröffnung und dem Detektor kann die atmosphärische Abschwächung in der Luft vernachlässigt werden. Die Transmission liegt für den langwelligen Infrarotbereich bei über 99 % für Entfernungen unter 1 m (vgl. Unterabschnitt 2.6.2).

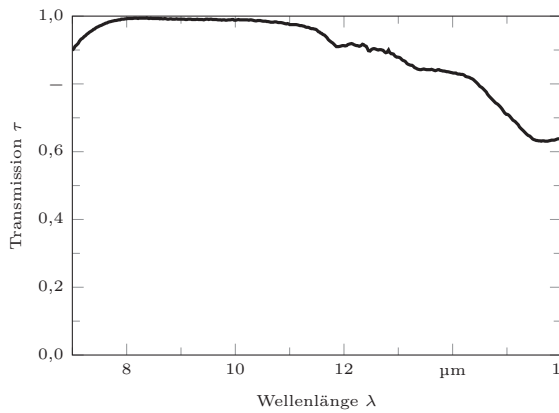


Abbildung A.22: Transmission des GE-Schutzglases, Antireflexbeschichtung 7 µm bis 14 µm, ∅ 76,2 x 3 mm (Infratec GmbH 2011)

A.2.4.4 Detektion

Die Bestrahlungsstärke, die auf einem Sensorelement des Detektors erzeugt wird, ist nach Budzier et al. (2011, S. 124) durch Gleichung A.13 gegeben. Die abbildenden Eigenschaften der Optik werden durch die Blendenzahl $F = \frac{f}{D}$ berücksichtigt. Aus der Bestrahlungsstärke E lässt sich der vorherrschende Strahlungsfluss zum Sensorelement und damit die Objekttemperatur bestimmen:

$$\begin{aligned} E_2 &= \Phi_2 / A_2 = \pi \tau_{opt} L_1 \sin^2 \phi_2 \\ &= \frac{\pi \tau_{opt} L_1}{4F^2 + 1} \end{aligned} \tag{A.13}$$

A_2: Fläche des Detektorelements, ϕ_2: bildseitiger Öffnungswinkel des Objektivs, L_1: Strahldichte der Senderfläche, τ_{opt}: Transmissionsgrad des Objektivs

Für die Temperaturmessung muss sichergestellt werden, dass die zulässige Bestrahlungsstärke des Detektors nicht überschritten wird. Die Folge wäre eine Sättigung bzw. Zerstörung der Detektorelemente. Durch eine einstellbare Transmission τ_{opt} des Detektors können in diesem Zusammenhang unterschiedliche Messbereiche definiert werden. Abbildung A.23 zeigt die entsprechenden Wandlerkennlinien, mit denen die Temperaturbestimmung erfolgt.

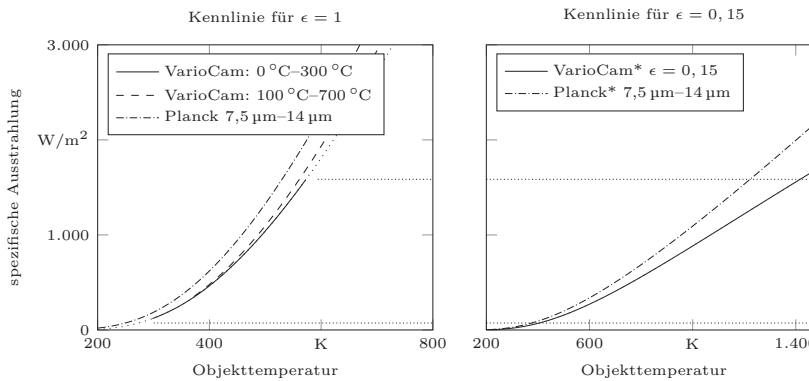


Abbildung A.23: Kennlinie für unterschiedliche Messbereiche: für die Temperaturbestimmung bei geringem Emissionsgrad wurde eine Extrapolation verwendet, die die gemessene Kennlinie im kalibrierten Bereich annähert

Werden Objekte mit Emissionsgraden kleiner eins betrachtet, sind die vorherrschenden Bestrahlungsstärken der Sensorelemente reduziert. Im Umkehrschluss folgt, dass Objekte bei sehr viel höheren Temperaturen im gleichen Arbeitsbereich des Detektors gemessen werden können. Unter Vernachlässigung der

Umgebungseinflüsse[9] und Berücksichtigung des in Anhang A.2.4.2 bestimmten Emissionsgrades eignet sich der verwendete Detektor zur Messung von Temperaturen zwischen 130 °C und 1150 °C (Feststoff) in dem kalibrierten Messbereich von 0 °C bis 300 °C.

A.2.4.5 Störeinflüsse

Die thermografische Messung unterliegt Störeinflüssen, die in der Kameraoptik, der Einbausituation und der Prozessumgebung bzw. Baukammer begründet sind. Abbildung A.24 zeigt die Methode zur Kompensation dieser systematischen Einflüsse bei der Temperaturbestimmung.

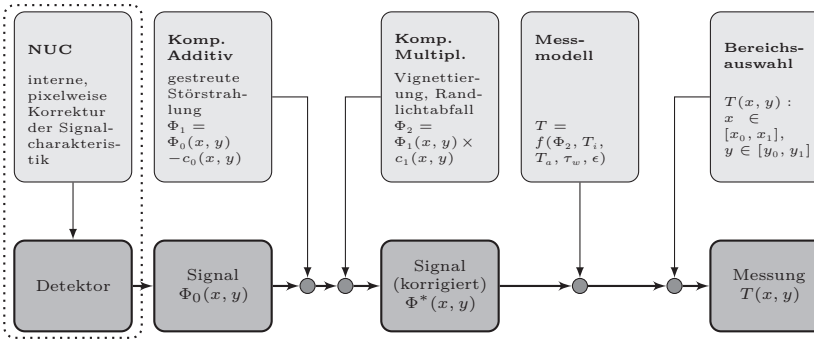


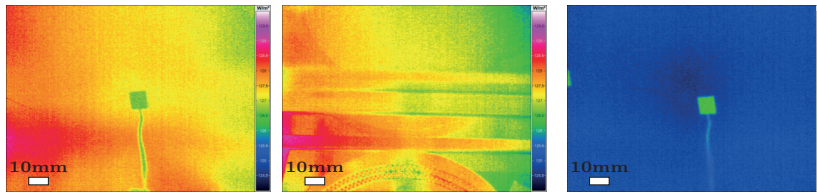
Abbildung A.24: Kompensation von Störeinflüssen für die Temperaturbestimmung: detektorintern wird die Signalcharakteristik der einzelnen Messpunkte (Pixel) durch eine sog. NUC (engl. *Nonuniformity correction*) automatisch kalibriert (vgl. Minkina & Dudzik (2009))

Additive Kompensation Strahlungsanteile, die von der Baukammergeometrie und den Anlagenkomponenten innerhalb der Prozesskammer herrühren und durch Streuung und Reflexion an der Bauebene in die Kamera gelangen, liefern einen konstanten Beitrag zum Messsignal. Der Motor für die Beschichterachse stellte sich in diesem Zusammenhang als erhebliche Störquelle heraus, die dauerhaft abgeschattet werden muss. Zudem geht eine Strahlungsleistung von stromführenden Kabeln aus, die an den Baukammerwänden reflektiert wird. Aufgrund der geringen Schärfentiefe werden die Strahlungsanteile aus dem Hintergrund bei Betrachtung der Bauebene nicht fokussiert und verteilen sich über den Bildbereich (vgl Abbildung A.25).

Die Strahlungsquellen, die innerhalb des Bauraums nicht abgeschattet werden können, werden über eine additive Kompensation berücksichtigt. Hierbei dienen

[9] Unter Berücksichtigung der Strahlungsleistung aus der Umgebung verschiebt sich der messbare Temperaturbereich nach unten.

Referenzbilder mit und ohne vollständige Abschattung der Baukammer als Kompensationsgrundlage. Für die Messung eignen sich metallische Spiegel (z. B. eine Blechplatte) in der Bauebene aufgrund ihrer geringen Eigenemission und hohen Reflexion.



(a) Betrachtung des defokussierten Hintergrundes im Spiegel, Fokus auf Bauebene (Normalzustand)

(b) Betrachtung des Hintergrundes im Spiegel (Fokus auf dem Hintergrund)

(c) Betrachtung des Hintergrundes bei vollständiger Abschattung

Abbildung A.25: Störstrahlung aus der Umgebung bei Betrachtung über einen Spiegel in der Bauebene. Die Temperatur des Spiegels wurde taktil aufgenommen (Bildmitte).

Die Bestrahlungsintensität durch diese Störstrahlung liegt in der Größenordnung von $4\,\mathrm{W/m^2}$ und ist daher nur bei der Messung tiefer Temperaturen relevant (vgl. Abbildung A.26). Für die Messung hoher Temperaturen kann die inhomogene Strahlung aus der Umgebung gegenüber der Strahlungsleistung aus dem Prozess vernachlässigt werden.

Multiplikative Kompensation In der Praxis wirkt der vor der Abbildungsoptik positionierte Adapter als Blende in dem Strahlengang. Es kommt im Falle einer Fehlpositionierung zu einer Abschattung durch die unscharfe Abbildung dieser Öffnung bzw. zu einer Reduktion der ankommenden Strahlungsleistung. Darüber hinaus ist für die Strahlungsmessung der natürliche Randlichtabfall des Objektivs zu beachten (Vignettierung): Die Bestrahlungsstärke verringert sich mit zunehmendem Abstand der Strahlquelle von der optischen Achse des Detektionssystems[10]. Die Auswirkungen werden näherungsweise durch das $\cos^4$-Gesetz (vgl. Kerr (2007)) in Abhängigkeit des bildseitigen Feldwinkels ω beschrieben[11]. Beide Effekte skalieren mit der Bestrahlungsstärke.

Zur Kompensation dieser systematischen Helligkeitsfehler über den Bildbereich kommt eine „Shading“-Korrektur zum Einsatz. Sie basiert auf einer

[10] Die Ursachen dafür sind in der perspektivische Verkürzung, der Vergrößerung des Abstandes zwischen Objekt und Objektiv sowie der Reduktion des Raumwinkels begründet.

[11] ω beträgt in der gewählten Konfiguration ca. 11°. Der Randlichtabfall liegt damit in der Größenordnung von ca. 8 %.

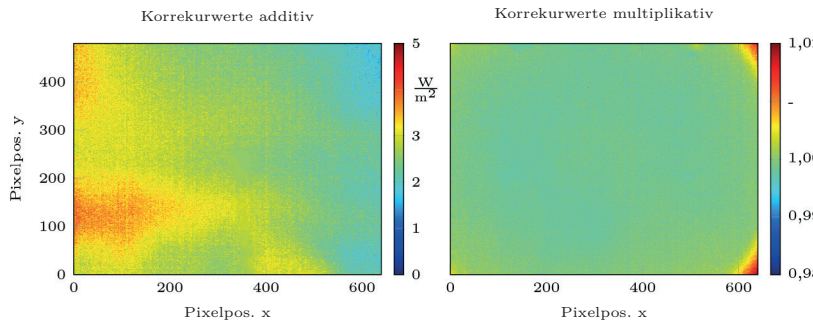


Abbildung A.26: Links: Additive Korrekturwerte bei Raumtemperatur zur Kompensation von Störstrahlung aus der Baukammer; rechts: Multiplikative Korrekturwerte zur Kompensation systematischer Helligkeitsfehler (eine geringe Fehlpositionierung des Adapters führt zu erhöhten Korrekturfaktoren ($c_1 \approx 1,02$) in den Bildecken)

multiplikativen Korrektur[12] des Helligkeitswertes auf Grundlage eines bekannten Zusammenhangs zwischen Soll- und Ist-Temperatur eines Referenzbildes (Demant et al. 2002). Abbildung A.26 zeigt die additiven und multiplikativen Kompensationsfaktoren für die gewählte Konfiguration. Die Bestimmung der multiplikativen Korrekturfaktoren erfolgte durch die Betrachtung einer vorgeheizten, hoch-emittierenden Platte in der Bauebene. Der Einfluss der Umgebungsstrahlung wird damit vernachlässigbar, da die von der Platte ausgehenden Strahlungsanteile überwiegen.

Das thermische Eigenleuchten der Kamera stellt ebenfalls eine Störquelle dar. Der Empfangswinkel der Sensorfläche für Strahlungsanteile der Kamera bzw. des Kameragehäuses ist groß gegenüber dem Empfangswinkel eines abzubildenden Objektes. Zudem variiert dieser Winkel mit dem Abstand zur optischen Achse der Sensorfläche. Die Strahlungsteile aus der Kamera führen zu einer zeitabhängigen Drift der ausgegebenen Temperatur, die über einen periodisch wiederkehrenden Abgleich (*Non-uniformity Correction* (NUC)) kameraintern kompensiert wird.

A.2.4.6 Fehlerbetrachtung

Der geringe Emissionsgrad stellt nach obigen Ausführungen eine wesentliche Fehlerquelle bzw. Unsicherheit bei der Bestimmung von Objekttemperaturen dar. Unter Berücksichtigung der spezifischen Detektorkennlinie, der Umgebungstemperaturen, der Transmission des Sichtfensters, des Emissionsgrades

[12] Es wird implizit ein linearer Zusammenhang zwischen Strahlungsleistung und Detektorsignal angenommen.

und deren jeweiligen Unsicherheiten ergibt sich eine absolute Unsicherheit bei der Temperaturbestimmung in der Größenordnung von 10 K bis 100 K.

Die Abschätzung der Unsicherheit im stationären Fall erfolgt nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz (Gleichung A.14):

$$\begin{aligned} \Delta T =& \sqrt{(\frac{\partial T}{\partial \Phi_M}\Delta\Phi_M)^2+(\frac{\partial T}{\partial T_a}\Delta T_a)^2+(\frac{\partial T}{\partial T_i}\Delta T_i)^2+} \\ & \overline{(\frac{\partial T}{\partial \tau_W}\Delta\tau_w)^2+(\frac{\partial T}{\partial \epsilon}\Delta\epsilon)^2} \\ \frac{\partial T}{\partial T_{a,i,o}} =& \frac{\partial T}{\partial \Phi_B(T_{i,a,o})}\frac{\partial \Phi_B}{\partial T}|_{T_{i,a,o}} \end{aligned} \tag{A.14}$$

Abbildung A.27 zeigt die Unsicherheit der Temperaturbestimmung in Abhängigkeit diverser Parameter, die in das Messmodell eingehen.

Bei Unterschätzung des realen Emissionsgrades wird eine zu große Temperatur bestimmt, bei Überschätzung des Emissionsgrades ist die bestimmte Temperatur kleiner als die reale Temperatur. Tabelle A.5 gibt einen Überblick über die Parameter und Abweichungen für unterschiedliche Objekttemperaturen im stationären Fall. Für den transienten Fall ergeben sich aufgrund der Detektorträgheit weitere Unsicherheiten, die dazu führen, die vorliegende Objekttemperatur zu unterschätzen (vgl. Anhang A.2.3).

Tabelle A.5: Absolute Unsicherheit bei der Temperaturmessung, $\Delta T_{i,a} = 5\,\mathrm{K}$, $T_i = 310\,\mathrm{K}$, $T_a = 300\,\mathrm{K}$

Parameter	**Wert**
$\Delta\epsilon_{\mathrm{rel}}$ Oberfläche	3 %
$\Delta\epsilon_{\mathrm{rel}}$ Off-Axis-Winkel (35°)	2 %
$\Delta\epsilon_{\mathrm{rel}}$ Messung	6 %
ϵ_{abs}	$0,15 \pm 0,01$
ΔT @300 K	±13,2 K
ΔT @500 K	±9,7 K
ΔT @1000 K	±34,5 K
ΔT @1500 K	±68,9 K

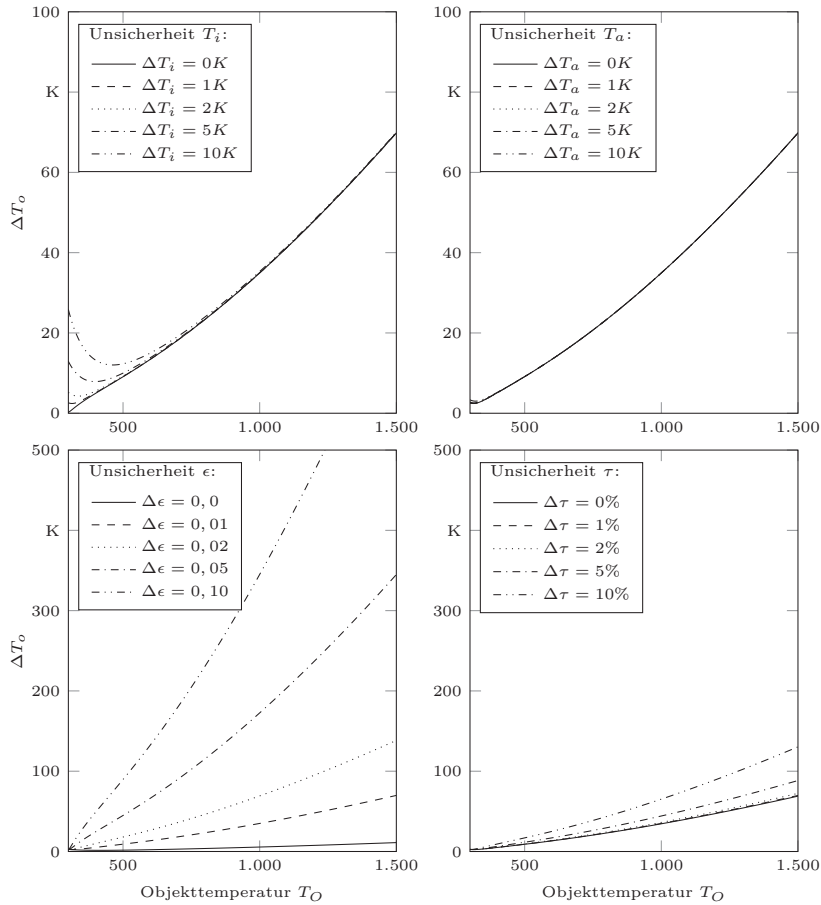


Abbildung A.27: Unsicherheit der Temperaturbestimmung in Abhängigkeit der wahren Objekttemperatur, $\epsilon = 0{,}15$, $\Delta\epsilon = 0{,}01$, $\tau = 0{,}935$, $\Delta\tau = 0{,}01$, $T_{i,a} = 300\,\mathrm{K}$, $\Delta T_{i,a} = 1\,\mathrm{K}$

A.2.5 Zusammenfassung

Der Abschnitt hat gezeigt, wie die Randbedingungen der Systemintegration in die Bestimmung einer absoluten Temperatur unter Berücksichtigung der Ortsauflösung und der Zeitauflösung beim Selektiven Laserstrahlschmelzen eingehen. Das in Anhang A.2.2 und Anhang A.2.3 diskutierte Übertragungsverhalten wirkt sich bei der Messung absoluter Temperaturen im Laserstrahlschmelzprozess aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Temperaturänderungen deutlich auf die Messung aus. Es kommt zu örtlichen Aufweitungen und zeitlichen Dämpfungen, die zwar bis zu einem bestimmten Maß kompensiert werden können, aber an anderer Stelle zu weiteren Unsicherheiten führen. Die dadurch eintretende Mittelung über Raum und Zeit ermöglicht eine näherungsweise Temperaturbestimmung nur unterhalb der Schmelztemperatur des hier verwendeten Werkstoffs Iconel 718. Ebenso kann bei einer großflächigen Off-Axis-Überwachung das eigentliche Schmelzbad mit aktueller Thermografietechnik nicht mehr aufgelöst werden.

A.3 Modellbildung

A.3.1 Oberflächenwärmequelle

Im Modell der Oberflächenwärmequelle wird die Energie blitzartig eingetragen und absorbiert. Aus der Fundamentallösung der Wärmeleitungsgleichung und den Randbedingungen aus Gleichung 5.4 folgt für die Temperaturverteilung:

$$
\begin{aligned}
U(z,t) &= \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}} e^{\frac{-z^2}{4at}} \\
T(z,t) &= \int_{-\infty}^{\infty} T(z',t_0)\, U(z'-z,t)\, \mathrm{d}z' \\
&= \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}} \int_{-\infty}^{\infty} T(z',t_0) \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\, \mathrm{d}z' \\
&= \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}} \int_{-\infty}^{\infty} T_1 \left(\Theta(z'+l)-\Theta(z'-l)\right) \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\, \mathrm{d}z' \\
&= \frac{T_D}{\sqrt{4\pi a t}} \int_{-l}^{l} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\, \mathrm{d}z'
\end{aligned}
\tag{A.15}
$$

Aufgrund der Linearität der Wärmeleitungsgleichung kann die Grundtemperatur T_0 gleich $T_0 = 0$ gesetzt werden. Die Wärmeleitungsgleichung ist nach Kluge & Neugebauer (1994) invariant gegenüber dieser Art von Transformationen: $(T_1 - T_0) = T_1 = T_D$.

Die Substitution

$$w = \frac{z' - z}{\sqrt{4at}} \quad , \quad \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z'} = \frac{1}{\sqrt{4at}} \quad , \quad \sqrt{4at}\,\mathrm{d}w = \mathrm{d}z' \tag{A.16}$$

führt zu:

$$\begin{aligned} T(z,t) &= \frac{T_D}{\sqrt{4\pi at}} \int_{\frac{-l-z}{\sqrt{4at}}}^{\frac{l-z}{\sqrt{4at}}} \mathrm{e}^{-w^2} \sqrt{4at}\,\mathrm{d}w \\ &= \frac{T_D}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left[\mathrm{erf}\left(\frac{l-z}{\sqrt{4at}} \right) - \mathrm{erf}\left(\frac{-l-z}{\sqrt{4at}} \right) \right] \end{aligned} \tag{A.17}$$

Für die Temperatur an der Oberfläche ($z = 0$) folgt damit

$$\begin{aligned} T(z=0,t) &= \frac{T_1}{2} \left[\mathrm{erf}\left(\frac{l}{\sqrt{4at}} \right) - \mathrm{erf}\left(\frac{-l}{\sqrt{4at}} \right) \right] \\ &= T_D \mathrm{erf}\left(\frac{l}{\sqrt{4at}} \right) \end{aligned} \tag{A.18}$$

und nach Rücktransformation:

$$T(z=0,t) = T_0 + T_D \mathrm{erf}\left(\frac{l}{\sqrt{4at}} \right) \tag{A.19}$$

Der Temperaturanstieg T_D ist nach Gleichung 5.8 gegeben durch $T_D = \frac{\alpha P}{v a_h c_p \rho l}$. Da der Energieeintrag instantan erfolgen soll, gilt dies nur für kleine Flächenelemente A im Verhältnis zu den Bauteilabmessungen. Die Flächenelemente werden dann mit wenigen Hatch-Vektoren vollständig verfestigt. Das Modell nimmt eine homogene Temperaturverteilung auf dem betrachteten Flächenelement (lineare Abmessung w) an. Dies ist erfüllt, wenn ein Flächenelement deutlich kleiner als der Laserspotradius r_g ist: $l_s \ll r_g$ oder wenn sich in einem großen Flächenelement die Temperaturunterschiede durch das mehrfache *Hatching* in vergleichsweise kurzer Zeit ausgleichen. Für quadratische Flächenelemente und den Fall, dass mehrere Hatch-Vektoren notwendig sind, um das Flächenelement zu verfestigen, variiert die Dauer der Verfestigung t_A mit dem Streifenwinkel β (vgl. Abbildung A.28):

$$\begin{aligned} t_A &= N_h \frac{l_h}{v} \\ &= \frac{w}{a_h \cos\beta} \frac{l_h}{v} \qquad \beta = 0° \ldots 45° \end{aligned} \tag{A.20}$$

N_h: Anzahl Hatch-Vektoren

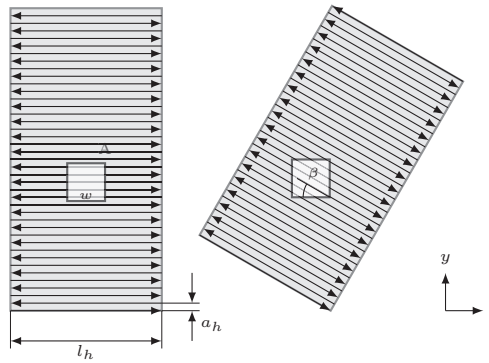


Abbildung A.28: Flächenelement bei der Streifenbelichtung

Die Winkelabhängigkeit verursacht eine maximale Abweichung von T_D um den Faktor $1/\cos(45°) \approx 1{,}41$. Diese Abweichung wurde in dem vorliegenden Fall vernachlässigt, da die Anzahl notwendiger Hatch-Vektoren für die Verfestigung eines Flächenelements $N_h \approx w/a_h$ mit $w = 250\,\mu\text{m}$ (IFOV eines Sensorelements) für übliche Hatch-Abstände gering ist. In jedem Fall muss für die Anwendung des Modells auf eine gering Hatch-Zeit $t_h = l_h/v$, d. h. kurze Hatch-Vektoren bzw. schnelle Scangeschwindigkeiten, geachtet werden.

A.3.2 Abkühlverhalten im Modell der Linienwärmequelle

Die Linienwärmequelle wird als Superposition von Gauß-Quellen mit entsprechender Gewichtung abgeleitet. Die z-Abhängigkeit wird dabei vernachlässigt, da nur Oberflächentemperaturen zugänglich sind. Es gilt:

$$\begin{aligned} I_{\text{Gauss}}(x,y) &= \frac{2P}{\pi r_g^2} \mathrm{e}^{-2\frac{x^2+y^2}{r_g^2}} \\ \rightarrow I_{\text{Linie}}(x,y) &= \frac{2P}{l_h \pi r_g^2} \mathrm{e}^{-2\frac{x^2}{r_g^2}} \int_{-l_h/2}^{+l_h/2} \mathrm{e}^{-2\frac{(y'-y)^2}{r_g^2}} \,\mathrm{d}y' \end{aligned} \tag{A.21}$$

Mit der Substitution aus:

$$z = \frac{\sqrt{2}(y'-y)}{r_g} \quad \rightarrow \quad \mathrm{d}z = \frac{\sqrt{2}\mathrm{d}y'}{r_g} \tag{A.22}$$

folgt für die Linienwärmequelle:

$$
\begin{aligned}
I_{Linie}(x,y) &= \frac{2P}{L\pi r_g^2}\frac{r_g}{\sqrt{2}}\mathrm{e}^{-2\frac{x^2}{r_g^2}}\int_{\frac{\sqrt{2}(-\frac{l_h}{2}-y)}{r_g}}^{\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2}-y)}{r_g}}\mathrm{e}^{-z^2}\mathrm{d}z \\
&= \frac{2P}{l_h\pi r_g^2}\frac{r_g}{\sqrt{2}}\frac{\sqrt{\pi}}{2}\mathrm{e}^{-2\frac{x^2}{r_g^2}}\left[\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2}-y)}{r_g}\right)-\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(-\frac{l_h}{2}-y)}{r_g}\right)\right] \\
&= \frac{P}{l_h\sqrt{2\pi}r_g}\mathrm{e}^{-2\frac{x^2}{r_g^2}}\left[\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2}-y)}{r_g}\right)+\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{2}(\frac{l_h}{2}+y)}{r_g}\right)\right]
\end{aligned}
\tag{A.23}
$$

Unter den Annahmen aus Abschnitt 5.2 ergeben sich bei einer homogenen, bewegten und kontinuierlichen Linienwärmequelle die in Abbildung A.29 dargestellten mittleren Temperaturverläufe. Die Variation der Scanvektorlänge hat unmittelbar Auswirkungen auf die auftretenden Maximaltemperaturen und die effektiven Abkühlzeiten:

- Kurze Scanvektorlängen: Sowohl die Maximaltemperatur als auch die mittlere Abkühlgeschwindigkeit sind maximal. Die Zeit oberhalb der Solidustemperatur ist höher als bei langen Scanvektorlängen (Tendenz zu grobem Gefüge).
- Lange Scanvektorlängen: Sowohl die Maximaltemperatur als auch die mittlere Abkühlgeschwindigkeit sind im Modell minimal. Die Zeit oberhalb der Solidustemperatur ist kürzer als bei kurzen Scanvektorlängen (Tendenz zu feinem Gefüge).

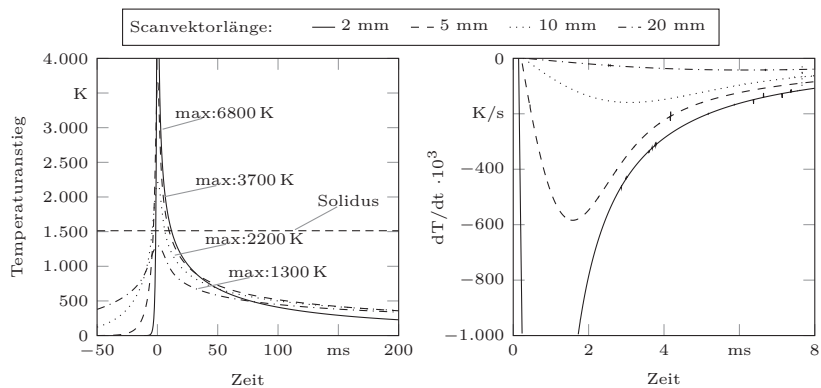


Abbildung A.29: Temperaturanstieg und Temperaturableitung im Modell der Linienwärmequelle in Abhängigkeit der Scanvektorlänge

Gültigkeit Entgegen den Modellergebnissen muss der real vorliegende Temperaturgradient für große Scanvektorlängen zunehmend dem einer Einzelspur entsprechen und damit maximal (vgl. Abbildung A.30) sein. Die Annahme einer homogenen Quelle ist für große Scanvektoren daher nicht mehr zutreffend und die Modellaussagen haben nur qualitativen Charakter.

Die Gültigkeitsbedingung aus Gleichung 5.11 kann auch bezogen auf eine charakteristische Zeit für die Wärmeleitung interpretiert werden: Die Wärmeleitung aus einer (instantan) verfestigten Einzelspur der Länge l_h und Breite a_h erfolgt auf der Zeitskala von $\tau \approx l_h a_h / a$. Die reale Dauer zur Verfestigung dieser Spur liegt bei $t_h = l_h / v$. Für typische Verfestigungsparameter beträgt das Verhältnis $t_h/\tau \approx 0{,}04 \ll 1$. Die Wärmeleitung innerhalb der Einzelspur (Linie) erfolgt demnach langsamer als die Verfestigung dieser Einzelspur.

Intensitätsverteilung des Lasers Für große Zeiten nach dem Energieeintrag spielt die konkrete Intensitätsverteilung des Laserstrahls für das Temperaturfeld nur eine untergeordnete Rolle. Der Temperaturverlauf kann an Stelle von Gauß-Quellen als Superposition von bewegten Punktquellen approximiert werden (vgl. Abbildung A.30). Zu diesem Zweck wird die Linienwäremequelle als Superposition von unendlich vielen, nebeneinander angeordneten Punktquellen aus dem Rosenthal-Modell verstanden, die sich parallel mit konstanter Geschwindigkeit v_t in x-Richtung bewegen. Wenn sich die Linienwärmequelle am Ursprung des Koordinatensystems befindet, ergibt sich die Temperatur an der Position (x, y) aus der Integration der Rosenthal-Lösung über die örtliche Verteilung der Linienwärmequelle:

$$q_{Linie} = \begin{cases} P/l_h & : y \in [-\frac{l_h}{2}, \frac{l_h}{2}] \\ 0 & : sonst \end{cases} \tag{A.24}$$

$$T = \int_{-l_h/2}^{l_h/2} \frac{P}{l_h 2\pi\kappa\sqrt{(y-y')^2+x^2+z^2}} \mathrm{e}^{\frac{v_x}{2a}(x-\sqrt{(y-y')^2+x^2+z^2})} \mathrm{d}y' \tag{A.25}$$

Mit dem Hilfsparameter b und der Substitution $y' = b\frac{l_h}{2}$, $\mathrm{d}y' = \frac{l_h}{2}\mathrm{d}b$ folgt:

$$T = \int_{-1}^{1} \frac{\alpha P}{4\pi\kappa\sqrt{(y'-bl_h/2)^2+x^2+z^2}} \mathrm{e}^{\frac{v_x}{2a}(x-\sqrt{(y-bl_h/2)^2+x^2+z^2})} \mathrm{d}b \tag{A.26}$$

Die Gleichung kann über numerische Verfahren gelöst werden. Da es sich um ein eindimensionales Integral handelt, ist für praktische Anwendungen mit einem erheblichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber Gleichung 5.14 zu rechnen. Der

Einfluss unterschiedlicher Strahlradien r_g bzw. Formparameter der Strahlquelle ist für die Hatch-Belichtung gering. Für übliche Strahlradien im Bereich von 50 µm bis 100 µm geht die Lösung der Gauß-Linienwärmequelle innerhalb weniger Millisekunden in die Lösung der Rosenthal-Linienwärmequelle nach Gleichung A.25 über (vgl. Abbildung A.30).

Bei gleicher nomineller Scangeschwindigkeit erfolgt im Modell der Punktwärmequelle ein deutlich schnellerer Abkühlvorgang als im Modell der Linienwärmequelle. Durch den wiederholten Energieeintrag beim Hatching mit den damit verbundenen Hatch-Parametern kann demnach der effektive Abkühlvorgang gezielt beeinflusst werden.

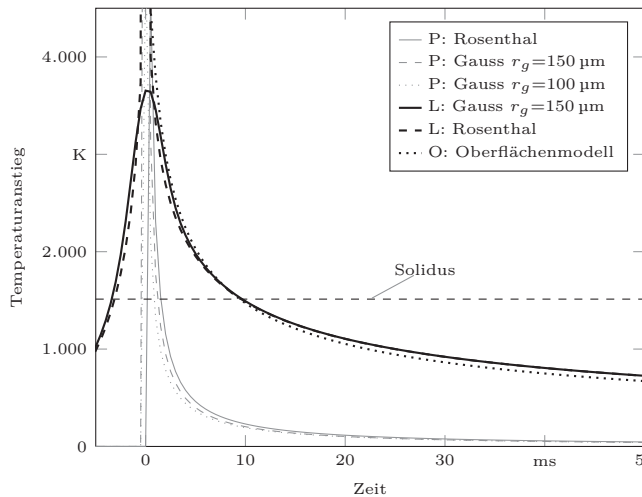


Abbildung A.30: Vergleich von (P)unkt-, (L)inien- und (O)berflächenwärmequellenmodell mit gleicher nomineller Scangeschwindigkeit; Gaußförmige Punktwärmequelle nach Cline & Anthony (1977)

Maximaltemperatur Die Maximaltemperatur kann von einem rein auf Wärmeleitung basierenden Modell nicht prognostiziert werden. In Tabelle A.6 sind theoretische Maximaltemperaturen der unterschiedlichen Modelle aufgelistet, die eine relative Abschätzungen erlauben.

Tabelle A.6: Temperaturanstiege für unterschiedliche Modelle bei bewegten Wärmequellen; $P = 195\,\mathrm{W}$, $v = 1200\,\mathrm{mm/s}$, $a_h = 90\,\mu\mathrm{m}$, $r_g = 50\,\mu\mathrm{m}$ ($k_{\mathrm{eff}} = 1$, $\alpha = 1$)

Modell	Temperaturanstieg
P: Punktwärmequelle (Rosenthal 1946)	∞
P: bewegte Gaußwärmequelle (Cline & Anthony 1977)	14 161 K
P: bewegte Gaußwärmequelle (King et al. 2014)	5138 K
L: Rosenthal Linienwärmequelle	∞
L: Gauß Linienwärmequelle 5 mm	2960 K
L: Gauß Linienwärmequelle 2 mm	6813 K
O: Oberflächenwärmequelle	4899 K

A.3.3 Erwärmungsverhalten beim Schichtauftrag

Für das Aufheizverhalten einer neu aufgetragenen Pulverschicht auf einem zuvor verfestigten Untergrund werden die Anfangsbedingungen nach Gleichung 5.19 angenommen. Die Faltung mit der Fundamentallösung führt auf:

$$T(z,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}}\left[T_1\int_{-\infty}^{-w} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\,\mathrm{d}z' + T_2\int_{-w}^{-d_l} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\,\mathrm{d}z' + T_0\int_{-d_l}^{d_l} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\,\mathrm{d}z' + T_2\int_{d_l}^{w} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\,\mathrm{d}z' + T_1\int_{w}^{\infty} \mathrm{e}^{-\frac{(z'-z)^2}{4at}}\,\mathrm{d}z'\right] \tag{A.27}$$

Mit den Substitutionen nach Gleichung A.16 folgt

$$\begin{aligned} T(z,t) =& \frac{1}{\sqrt{4\pi a t}}\left[T_1\int_{-\infty}^{\frac{-w-z}{\sqrt{4at}}} \mathrm{e}^{-y^2}\sqrt{4at}\,\mathrm{d}y + T_2\int_{\frac{-w-z}{\sqrt{4at}}}^{\frac{-d_l-z}{\sqrt{4at}}} \mathrm{e}^{-y^2}\sqrt{4at}\,\mathrm{d}y\right. \\ &\left. + T_0\int_{\frac{-d_l-z}{\sqrt{4at}}}^{\frac{d_l-z}{\sqrt{4at}}} \mathrm{e}^{-y^2}\sqrt{4at}\,\mathrm{d}y + T_2\int_{\frac{d_l-z}{\sqrt{4at}}}^{\frac{w-z}{\sqrt{4at}}} \mathrm{e}^{-y^2}\sqrt{4at}\,\mathrm{d}y + T_1\int_{\frac{w-z}{\sqrt{4at}}}^{\infty} \mathrm{e}^{-y^2}\sqrt{4at}\,\mathrm{d}y\right] \\ =& T_1 + \frac{1}{2}\left[(T_1-T_2)\left\{\mathrm{erf}\left(\frac{-w-z}{\sqrt{4at}}\right) - \mathrm{erf}\left(\frac{w-z}{\sqrt{4at}}\right)\right\}\right. \\ &\left. + (T_0-T_2)\left\{\mathrm{erf}\left(\frac{d_l-z}{\sqrt{4at}}\right) - \mathrm{erf}\left(\frac{-d_l-z}{\sqrt{4at}}\right)\right\}\right] \end{aligned}$$

Um die Randbedingung $T(z = \pm d_l, t) = T_1$ zu erfüllen, muss gelten:

$$\begin{aligned} T_1 \overset{!}{=} & T(z = \pm d_l, t) \\ 0 = & \frac{1}{2}\left[(T_1 - T_2) \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{-w - d_l}{\sqrt{4at}} \right) - \operatorname{erf}\left(\frac{w - d_l}{\sqrt{4at}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + (T_0 - T_2) \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{d_l - d_l}{\sqrt{4at}} \right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-d_l - d_l}{\sqrt{4at}} \right) \right\} \right] \\ = & \operatorname{erf}\left(\frac{w + d_l}{\sqrt{4at}} \right) + \operatorname{erf}\left(\frac{w - d_l}{\sqrt{4at}} \right) - 2 \operatorname{erf}\left(\frac{2d_l}{\sqrt{4at}} \right) \end{aligned} \tag{A.28}$$

Eine analytische Lösung für w ist aus dieser impliziten Gleichung nicht möglich. Unter der Annahme, dass w ein ganzzahliges Vielfaches von d_l ist ($w = \nu d_l$), kann eine numerische Lösung für ν und damit für w bestimmt werden (vgl. Abbildung A.31).

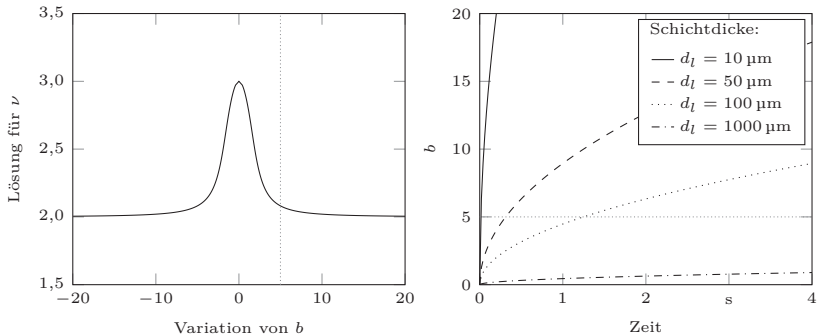


Abbildung A.31: Links: Lösung der Gleichung A.28 für Hilfsparameter ν und unterschiedliche Schichtdicken. Die Markierung bei $b = 5$ entspricht beispielsweise einer Schichtdicke von 50 µm nach $t = 0{,}3\,\mathrm{s}$, der Hilfsparameter beträgt dann $\nu = 2{,}08$. Rechts: Zeitabhängigkeit des Parameters $b = \sqrt{4at}/d_l$, Temperaturleitfähigkeit des Pulvers $a = 5 \times 10^{-8}\,\mathrm{m^2/s}$.

Es können im Wesentlichen zwei Fälle unterschieden werden:

$$\begin{aligned} \sqrt{4at}/d_l &\gg 1 : \nu = 2 \\ \sqrt{4at}/d_l &\to 0 : \nu = 3 \end{aligned} \tag{A.29}$$

Aufgrund der typischerweise kleinen Schichtdicken (Größenordnung Mikrometer) und der späten Messzeitpunkte (Größenordnung Sekunden) trifft vor-

nehmlich der erste Fall $\nu = 2$ zu. Der hilfsweise eingeführte Bereich erhöhter Temperatur im Festkörper ist demnach ebenso tief wie die aufgetragene Schichtdicke selbst.

Aus Gleichung A.28 folgt für die Oberflächentemperatur einer neu aufgetragenen Pulverschicht auf Festmaterial schließlich:

$$\begin{aligned} T_O(t) := T(z=0,t) &= T_1 + (T_1 - T_2)\mathrm{erf}\left(\frac{-2d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) + (T_0 - T_2)\mathrm{erf}\left(\frac{d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) \\ &= T_1 + (T_0 - T_1)\mathrm{erf}\left(\frac{-2d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) + 2(T_0 - T_1)\mathrm{erf}\left(\frac{d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) \\ &= T_1 + T_D\mathrm{erf}\left(\frac{2d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) + 2T_D\mathrm{erf}\left(\frac{-d_l}{\sqrt{4a_p t}}\right) \end{aligned} \tag{A.30}$$

T_D: Temperaturunterschied zwischen Festmaterial und Pulver

In Abbildung A.32 wird das Modell für verschiedene Schichtdicken mit einer Finite-Elemente-Simulation verglichen. Nach anfänglichen Abweichungen v. a. bei großen Schichtdicken entspricht der Temperaturverlauf im Modell für große Zeiten wieder gut der Simulation.

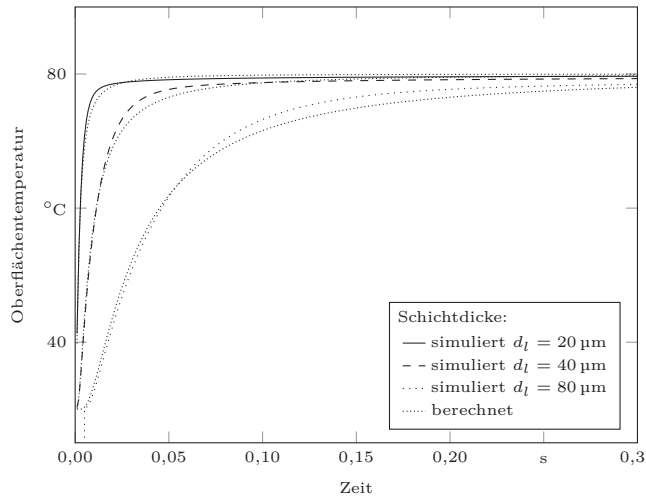


Abbildung A.32: Temperaturverlauf der Pulveroberfläche für große Schichtdicken im Vergleich zur Finite-Elemete-Simulation (Comsol Multiphysics)

In dem vorgestellten Modell findet der Wärmeaustausch zwischen dem vor dem Rakel hergeschobenen Pulver und dem darunterliegenden Pulverbett keine

Berücksichtigung. Aufgrund der geringen Temperaturleitfähigkeit des unverfestigten Pulverwerkstoffs wird dieser Einfluss jedoch als gering eingeschätzt.

A.4 Wärmehaushalt

A.4.1 Einfluss umgebender Wärmekapazitäten

Inwiefern sich umgebende Wärmekapazitäten auf des thermische Verhalten und die Fehlerflächen im Gefüge auswirken, wurde anhand der Probengeometrie aus Abbildung A.33 verifiziert. Als Wärmekapazitäten werden in diesem Zusammenhang benachbarte, verfestigte Bauteilbereiche bei erhöhter Temperatur verstanden, die über pulvergefüllte Zwischenräume mit anderen Bauteilbereichen wechselwirken. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Pulvers dient dieses selbst als Wärmespeicher, der die Energie langsam an die umgebenden Bereiche abgibt. Die Probengeometrie enthielt zum einen pulvergefüllte Pufferzonen konstanter Dicke zwischen einzelnen Bauteilbereichen und zum anderen Bauteilbereiche konstanter Dicke mit variabler Pufferzone.

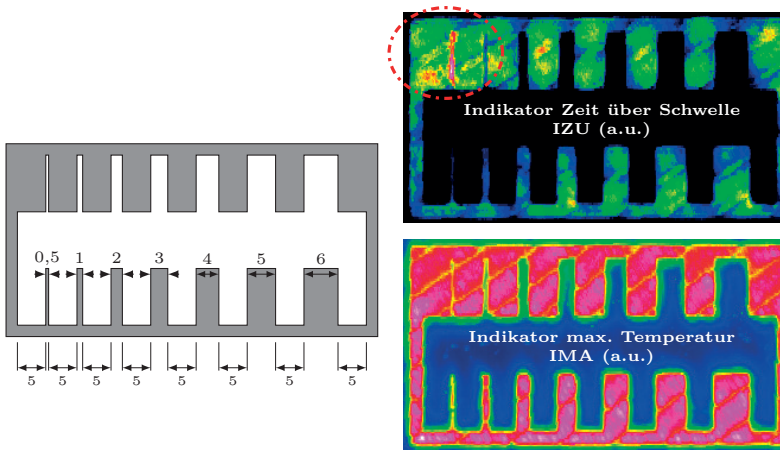


Abbildung A.33: Links: Geometrie zur Bestimmung des Einflusses umgebender Wärmekapazitäten, Größenangaben in mm; rechts: Indikatoren IZU und IMA auf Basis von Thermografieaufnahmen zur Visualisierung der Temperaturentwicklung. Die Indikatoren erscheinen in den filigranen Bereichen der Geometrie aufgrund der Orts- und Zeitauflösung des Messsystems reduziert.

Aus den thermografischen Aufnahmen sind anhand der Maximaltemperatur (IMA) keine wesentlichen Unterschiede auszumachen. Höhere Abkühlzeiten (IZU) herrschen v. a. bei massiven Bauteilbereichen vor, da der Gesamtenergieeintrag mit der Querschnittsfläche skaliert. Eine Wechselwirkung zwischen

einzelnen Bauteilbereichen über unverfestiges Pulver ist nur für den kleinsten untersuchten Zwischenraum $d = 500\,\mu m$ erkennbar (Abbildung A.34 oben links). Die entsprechenden Bauteilbereiche bleiben länger auf einer erhöhten Temperatur als vergleichbare Bauteilbereiche mit größeren Zwischenräumen. Dieser Umstand ist jedoch nur teilweise auf den Wärmespeicher in Form des pulvergefüllten Zwischenraumes zurückzuführen. Einen weiteren Beitrag liefern die benachbarten, ebenfalls verfestigten Bauteilbereiche.

Aus der Analyse des resultierenden FFA kann kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Proben erkannt werden (vgl. Abbildung A.34). Der Effekt des Pulvers als Wärmespeicher bei engen Zwischenräumen und die tendenziell reduzierte Wärmeableitung bei filigranen Strukturen[13] haben demnach keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf den FFA.

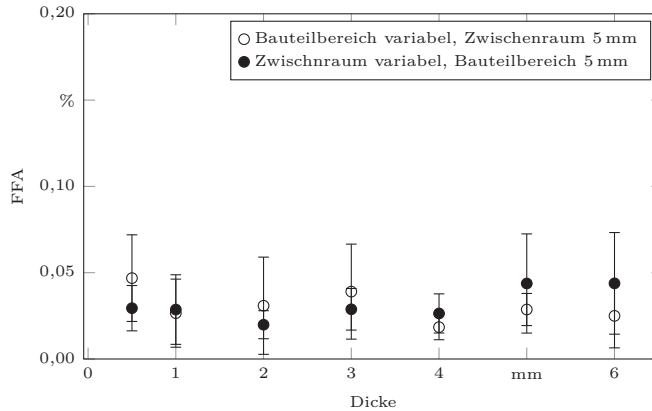


Abbildung A.34: FFA gemessen am polierten Schliff. Fehlerangabe entspricht $\pm 1\sigma$; Mittelwert aus 10 Einzelmessungen entlang der Bauhöhe mit einer Fläche von jeweils $0{,}5\,mm^2$.

A.4.2 Einfluss der Bauhöhe

Abhängig von der Bauhöhe, dem Energieeintrag pro Schicht und der Schichtzeit[14] variiert der Wärmehaushalt in der Baukammer. Thermografisch wurde dieser anhand von Proben mit konstantem Querschnitt erfasst. Aus Abbildung A.35 geht hervor, dass im Falle einer konstanten Vorheizung des Bauträgers die Bauteilgrundtemperatur in der Bauebene mit zunehmender Bauhöhe erheblich anstieg, während die Grundtemperatur der Pulverbettoberfläche

[13] Dieser Effekt ist aus den thermografischen Aufnahmen in Abbildung A.34 aufgrund der Auflösungsbeschränkung nicht auszumachen.

[14] Zeit, die benötigt wird, um eine Schicht vollständig zu belichten und aufzutragen

abfiel. Im Bauteil bildete sich demnach ein positiver Temperaturgradient, im Pulverbett ein negativer Temperaturgradient in z-Richtung aus. Neben den variablen Grundtemperaturniveaus kam es zu einem steigenden Temperaturunterschied an den Seitenflächen der Bauteile.

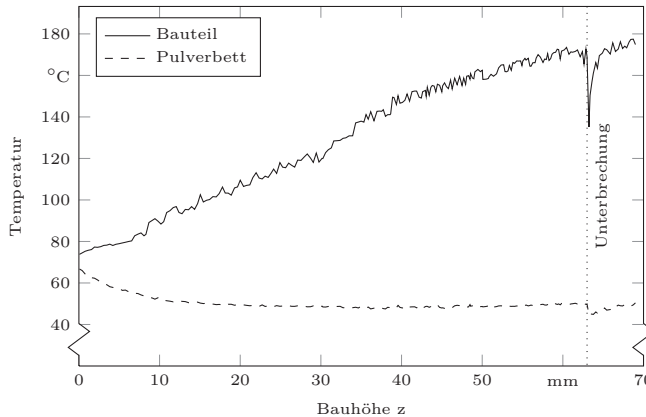


Abbildung A.35: Verlauf der Grundtemperatur eines Probekörpers (Querschnitt 100 mm^2) und des Pulverbetts in der Bauebene, Bauplattenvorheizung 80 °C. Die Messung erfolgte nach dem Schichtauftrag mit dem Emissionsgrad des Pulvers $\epsilon_p = 0{,}45$. Die Schichtzeit betrug im Mittel 30 s. Nach einer kurzzeitigen Unterbrechung stieg das Temperaturniveau aufgrund der verminderten Wärmeleitung wieder an.

Ein direkter Einfluss auf die Materialeigenschaften ist bei dem gemessenen Grundtemperaturniveau nicht zu erwarten. Indirekt führt eine höhere Grundtemperatur nach Kapitel 5 aber auf eine theoretisch erhöhte Maximaltemperatur bei der Verfestigung, die sich wiederum auf die Materialeigenschaften auswirken kann. Aus der Bestimmung des FFA entlang der Bauhöhe kann dafür kein statistisch signifikanter Nachweis erbracht werden (vgl. Abbildung A.36). Es lässt sich jedoch ein Trend erkennen, nachdem der FFA mit zunehmender Bauhöhe abnimmt. Für den verwandten Prozess des Elektronenstrahlschmelzens wird bei Mireles et al. (2013) gezeigt, dass sich die Bauhöhe bzw. das Temperaturniveau jedoch auf die Korngrößen auswirken können.

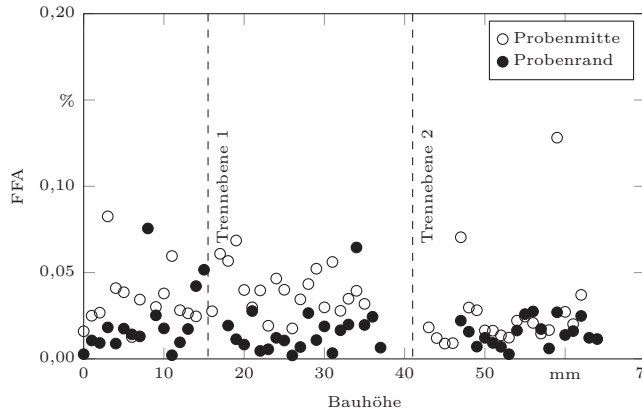


Abbildung A.36: FFA des Probekörpers aus Abbildung A.35 in Abhängigkeit der Bauhöhe; Messwerte basieren auf einer Auswertefläche von jeweils $0{,}5\,\mathrm{mm}^2$.

A.5 Prozessüberwachung

A.5.1 Detektionsgrenze

Die Detektionsgrenze wird als minimaler Abstand zweier Parameterstufen verstanden, bei dem die Indikatorsignale I noch eindeutig unterschieden werden können. Sie ergibt sich nach Gleichung A.31 aus dem Verhältnis des (linearisierten) Signalanstiegs ΔI und dem gewählten Vertrauensbereich (VB). Bezogen auf den Referenzprozesses kann damit die minimal detektierbare Änderung der Qualitätsmerkmale abgeleitet werden (vgl. Unterabschnitt 6.5.2). Es gilt:

$$\Delta p_{\min} = \frac{\mathrm{VB} \cdot \Delta p}{\Delta I} \tag{A.31}$$

Die Linearisierung der Abhängigkeiten an der Stelle des Referenzprozesses ($p = p_0$) entspricht einer Näherung erster Ordnung. Sie gilt damit nur für kleine Abweichungen der Prozessparameter von ihrem Sollwert im Referenzprozess.

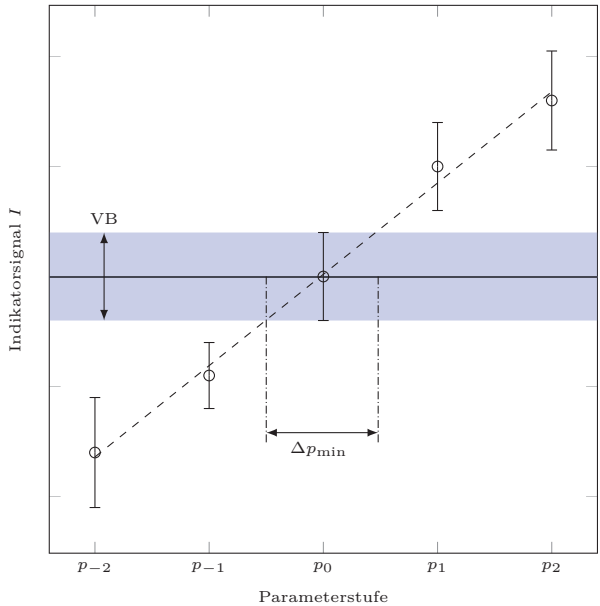


Abbildung A.37: Bestimmung der Detektionsgrenze $\Delta p_{\min}$

A.5.2 Indikatorkorrelationen

Zwischen den Indikatoren bestehen im Mittel über die untersuchten Prozessparameter die in Tabelle A.7 aufgelisteten Korrelationen. Hochkorrelierende Indikatoren werden für das Kennzahlsystem nach Abschnitt 6.5 nicht berücksichtigt, da sie keine zusätzlichen Informationen über den vorliegenden Zustand enthalten. Innerhalb der Klassen IZU und ITL betragen die Korrelationen in den meisten Fällen über 90 %, sodass für eine In-Process-Überwachung ein Repräsentant der Klasse ausgewählt werden kann. Die geringsten Korrelationen zu anderen Indikatoren sind für die Spritzeraktivität (ISA) zu finden. Durch die Messung Letzterer wird demnach der Informationsgehalt deutlich erhöht.

Tabelle A.7: Korrelationen der untersuchten Indikatoren, gemittelt über Versuchsreihen

Korr.	**IZU_{400}**	**IZU_{550}**	**IZU_{650}**	**IMA**	**ITL_{0-1}**	**ITL_{0-3}**	**ITL_{1-10}**	**IWA**	**IWV**	**IWU**	**IWI**	**IWH**	**ISA**	**IIN_{550}**
IZU_{400}	1,00													
IZU_{550}	0,92	1,00												
IZU_{650}	0,80	0,94	1,00											
IMA	0,38	0,59	0,72	1,00										
$ITL_{0\text{-}1}$	-0,94	-0,83	-0,69	-0,27	1,00									
$ITL_{0\text{-}3}$	-0,91	-0,81	-0,76	-0,45	0,99	1,00								
$ITL_{1\text{-}10}$ [a]	-	-	-	-	-	-	1,00							
IWA	0,91	0,96	0,90	0,60	-0,83	-0,82	-	1,00						
IWV	-0,25	-0,28	-0,18	-0,05	0,29	0,14	-	-0,22	1,00					
IWU	0,84	0,86	0,88	0,62	-0,74	-0,81	-	0,90	0,01	1,00				
IWI	0,86	0,95	0,93	0,67	-0,77	-0,80	-	0,99	-0,16	0,93	1,00			
IWH_1	-0,13	-0,11	0,04	0,18	0,21	0,15	-	-0,04	0,75	0,22	0,03	1,00		
ISA	-0,27	-0,19	-0,06	0,19	0,39	0,29	-	-0,15	0,19	-0,06	-0,09	0,21	1,00	
IIN_{550}	0,87	0,99	0,97	0,67	-0,77	-0,78	-	0,95	-0,26	0,86	0,95	-0,07	-0,14	1,00

[a] Aufgrund der Messdauer für diesen Indikator konnten nicht alle Korrelationen bei den verschiedenen Parametervariationen bestimmt werden. Der gemittelte Wert wird daher nicht dargestellt.

A.5.3 Software zur Prozessüberwachung

Die im Rahmen dieser Arbeit realisierte Umsetzung des Bilddatenverarbeitungssystems zur Prozessüberwachung basiert auf der Programmiersprache *C#*. Im Grundgerüst werden damit Programmsteuerungsfunktionen sowie Anzeige- und Speicherfunktionen übernommen. Die Berechnung der Indikatoren ist aus Geschwindigkeitsgründen in eine *C*-Bibliothek ausgelagert, um eine echtzeitnahe Datenverarbeitung zu ermöglichen. Für grundlegende und spezielle Bildverarbeitungsroutinen sowie für geeignete Datentypen wird darüber hinaus auf die Open-Source-Bibliothek *OpenCV* zurückgegriffen.

Entlang der Verarbeitungskette (vgl. Abbildung A.38) werden die Daten intern in einem Container-Format (IR-Frame) übertragen. Dieses berücksichtigt die eigentlichen Bilddaten (DAT) und weitere Metainformationen bzgl. des Prozesszustandes, des Maschinenzustandes und der Umgebungsbedingungen für das aktuelle Frame (vgl. Tabelle A.8).

Tabelle A.8: Aufbau des Datencontainers (IR-Frame)

Benennung	Datentyp	Beschreibung
Bilddaten (DAT)	Matrix, *float*	Messwerte der Kamera bzw. verarbeitete Daten
Prozessmaske (PM)	Matrix, *int*	Verfestigungszeitpunkte relativ zum Schichtbeginn in ms
Slice-Maske (SM)	Matrix, *byte*	Schichtdaten der Bauteile in Form gefüllter Bildbereiche
Höhe, Breite	*int*	Größe der Datenmatrix
Zeitstempel	*DateTime*	Zeitpunkt der Bildaufnahme
Startzeit	*DateTime*	Zeitpunkt des Schichtbeginns
Einheit	*enum*	Dateneinheit Bilddaten (K,W/m^2 etc.)
Zustand	*enum*	Prozesszustand (Flächen-/ Konturbelichtung, Schichtauftrag, Beschichterrückfahrt etc.)
Schicht	*int*	Schichtnummer des Frames im gegenwärtigen Bauprozess
Schichtdicke	*float*	Schichtdicke des gegenwärtigen Bauprozesses
Belichtungs-schwelle	*float*	Schwelle für Rohdaten, ab der ein Bereich als belichtet gilt
Sensorwerte	*float*	Temperaturwerte der Umgebungssensoren

Zur Kennzeichnung der belichteten Fläche wird in dem IR-Frame eine zusätzliche Matrix (PM) mitgeführt, die den Belichtungszeitpunkt, relativ zur Startzeit der jeweiligen Schicht, für die einzelnen Pixel der Detektormatrix erfasst. Diese wird zum einen für die Charakterisierung des Abkühlverhaltens

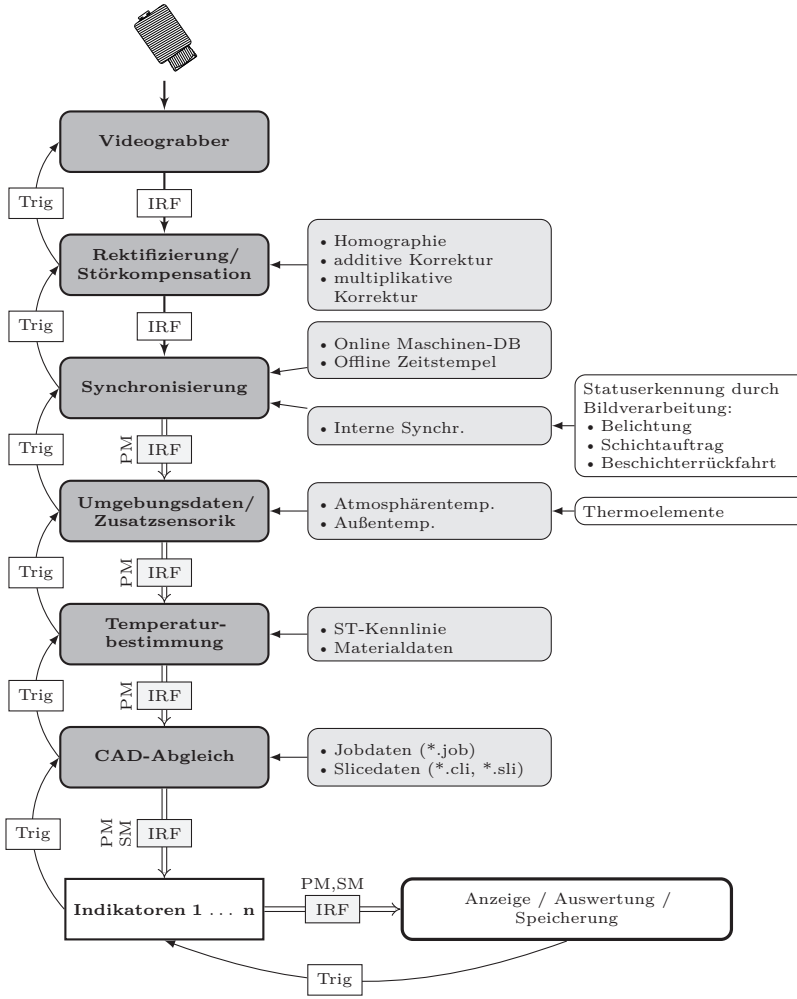


Abbildung A.38: Schritte zur Indikatorberechnung im Bildverarbeitungssystem und verwendete Eingangsdaten (IRF: IR-Frame, PM: Prozessmaske, SM: Slice-Maske)

durch die nachgeschalteten Indikatoren benötigt, zum anderen dient sie als Vollständigkeitskontrolle.

Das IR-Frame enthält darüber hinaus eine Matrix zur Speicherung der Bauteil-Schichtdaten (SM). Nach einem Abgleich der Koordinatensysteme von Ma-

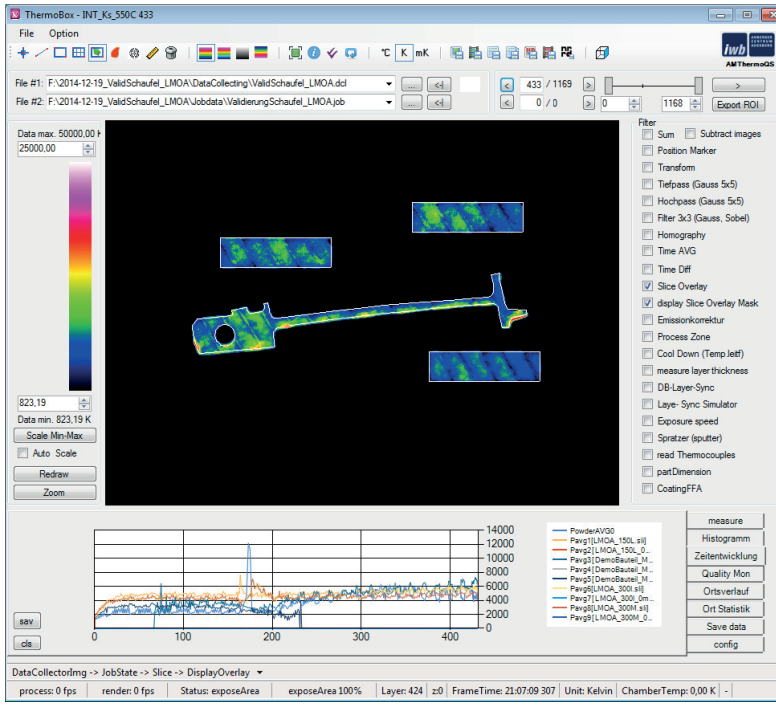


Abbildung A.39: Oberfläche des Prozessüberwachungssystems. Dargestellt ist ein Schichtbild (Indikator IIN), die zugehörigen Slice-Daten und Messdaten aus dem Bauprozessverlauf (Indikatormittelwerte über Bauteile).

schine und Kamera kodiert diese Matrix die erwarteten Bauteilpositionen im Bildraum. Hierzu werden den einzelnen Pixeln ganzzahlige Werte entsprechend dem Bauteilindex zugeschrieben.

Die Steuerung der Verarbeitungskette erfolgt triggerbasiert in entgegengesetzte Richtung zum Datenfluss. Sobald die Funktion „Anzeige“ bzw. „Speicherung“ Statusänderungen in dem IR-Frame erkennt oder die Verarbeitung des IR-Frames abgeschlossen ist, wird eine Statusmeldung jeweils rekursiv an die vorherigen Stufen weitergegeben. Dies führt dann beispielsweise zu einer Rücksetzung der Indikatoren oder zum Auslesen eines neuen Kamerabildes. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass alle Verarbeitungsschritte unabhängig von der Verarbeitungsgeschwindigkeit ausgeführt werden und bei Engpässen Kamerabilder ausgelassen werden. Im Sinne einer kontinuierlichen Überwachung und vor dem Hintergrund der zeitkritischen Berechnung einzelner Indikatorwerte

muss durch den Anwender sichergestellt werden, dass die volle Bildrate der Kamera verarbeitet werden kann. Abbildung A.39 zeigt die Oberfläche des Prozessüberwachungssystems.

Die vorgestellte Software „ThermoBox“ wird am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München stetig weiterentwickelt und kann von dort in ihrer aktuellen Version bezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die funktionsfähige Version 1.0 der Software programmiert, die eine Live-Überwachung bzw. -Analyse und eine schichtweise Datenspeicherung auf einem Industrie-PC bei VGA-Auflösung und 50 fps ermöglichte.

Quellen für den Anhang

Bloomenthal & Rokne 1994
Bloomenthal, J.; Rokne, J.: Homogeneous coordinates. The Visual Computer 11 (1994) 1, S. 15–26.

Bouguet 2014
Bouguet, J.-Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab. ⟨http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/⟩ - 13. 09. 2014.

Brown 1971
Brown, D. C.: Close-range camera calibration. Photogram. Eng. Remote Sens 37 (1971) 8, S. 855–866.

Budzier et al. 2011
Budzier, H.; Gerlach, G.; Müller, D.: Thermal infrared sensors: Theory, optimization, and practice. Chichester, U.K., West Sussex, U.K. und Hoboken, N.J.: Wiley 2011. ISBN: 978-0-470-87192-8.

Cline & Anthony 1977
Cline, H. E.; Anthony, T. R.: Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam. Journal of Applied Physics 48 (1977) 9, S. 3895.

Demant et al. 2002
Demant, C.; Streicher-Abel, B.; Waszkewitz, P.: Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. 2. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 978-3-540-41977-8.

Edmund Optics GmbH 2015
Edmund Optics GmbH: Germaniumfenster. ⟨http://www.edmundoptics.de/optics/windows-diffusers/ultraviolet-uv-infrared-ir-windows/germanium-ge-windows/2685⟩ - 15. 02. 2015.

Greer & van Doorn 2000
Greer, P. B.; van Doorn, T.: Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method. Medical physics 27 (2000) 9, S. 2048–2059.

Hartley & Zisserman 2003
Hartley, R.; Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. 2nd ed. Cambridge, UK und New York: Cambridge University Press 2003. ISBN: 978-0-521-54051-3.

Infratec GmbH 2011
Infratec GmbH: Transmission Ge-Fenster ARC 7-14 mu 76,2 x 3mm. Hrsg. von Infratec GmbH. InfraTec GmbH, Infrarotsensorik und Messtechnik, Gostritzer Straße 61 - 63, 01217 Dresden.

Kerr 2007
Kerr, D. A.: Derivation of the “Cosine Fourth” Law for Falloff of Illuminance Across a Camera Image. ⟨http://dougkerr.net/Pumpkin/articles/Cosine_Fourth_Falloff.pdf⟩ - 12. 02. 2015.

King et al. 2014
King, W. E.; Barth, H. D.; Castillo, V. M.; Gallegos, G. F.; Gibbs, J. W.; Hahn, D. E.; Kamath, C.; Rubenchik, A. M.: Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 12, S. 2915–2925.

Kluge & Neugebauer 1994
Kluge, G.; Neugebauer, G.: Grundlagen der Thermodynamik: Mit 31 Tabellen. Heidelberg, Berlin und Oxford: Spektrum, Akad. Verl. 1994. ISBN: 978-3-86025-301-4. (Spektrum-Lehrbuch).

Krauss & Zäh 2013a
Krauss, H.; Zäh, M. F.: Investigations on Manufacturability and Process Reliability of Selective Laser Melting. Physics Procedia 41 (2013) o. Nr., S. 815–822.

Krauss & Zäh 2013b
Krauss, H.; Zäh, M. F.: Multi-target Optimization and Process Window Analysis in Selective Laser Melting of High-performance Parts. In: de Lima, Edson Pinheiro (Hrsg.): Proceedings ot the 22nd International Conference on Production Research (ICPR 22): Challenges for Sustainable Operations. Iguassu Falls, Brazil, 28. Juli–1. Aug. 2013.

Maierhofer 2010
Maierhofer, C.: Monitoring - zuverlässige Quantifizierung und Bewertung von Schädigungsprozessen an Bauteiloberflächen und -grenzflächen mit Hilfe optischer und thermografischer zerstörungsfreier Prüfverfahren. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2010. ISBN: 978-3-8167-8380-0. (Forschungsinitiative Zukunft Bau 2757).

Minkina & Dudzik 2009
Minkina, W.; Dudzik, S.: Infrared thermography: Errors and uncertainties. Chichester u. a.: J. Wiley 2009. ISBN: 978-0-470-74718-6.

Mireles et al. 2013
Mireles, J.; Terrazas, C.; Medina, F.; Wicker, R. B.: Automatic Feedback Control in Electron Beam Melting Using Infrared Thermography. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 12.–14. Aug. 2013. University of Texas at Austin 2013.

Park & Rhee 1999
Park, H.; Rhee, S.: Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO2 laser welding of galvanized steel. Optics & Laser Technology 31 (1999) 2, S. 119–126.

Rosenthal 1946
Rosenthal, D.: The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments. Cambridge: ASME 1946.

Schuster 2004
Schuster, N.: Infrarotthermographie. 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2004. ISBN: 978-3-527-40509-1.

Yahyanejad et al. 2011
Yahyanejad, S.; Misiorny, J.; Rinner, B.: Lens distortion correction for thermal cameras to improve aerial imaging with small-scale UAVs. 2011 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE). Montreal, QC, Canada. DOI: 10.1109/ROSE.2011.6058528.

Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen der Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München (*iwb)* in den Jahren 2010 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die folgenden studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen zur Prozessanalyse und -optimierung sowie zur Prozessüberwachung des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden herzlich für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Feddern 2014
Feddern, S.: Wirtschaftliche Potentiale einer In-Process berwachung beim Laserstrahlschmelzen. Bachelorarbeit. Technische Universität München (2014).

Freiburger 2013
Freiburger, J.: Kalibrierung und Rektifizierung thermografischer Aufnahmen für die schichtweise Qualitätskontrolle beim Laserstrahlschmelzen. Semesterarbeit. Technische Universität München (2013).

Hahn 2012
Hahn, C.: Integrationskonzept für eine Thermografiekamera beim Laserstrahlschmelzen. Bachelorarbeit. Technische Universität München (2012).

Köhler 2011
Köhler, M.-A.: Optimierung der Bauteilkonstruktion für die generative Fertigung. Bachelorarbeit. Technische Universität München (2011).

Lotter 2013
Lotter, C.: Bildverarbeitung von thermografischen Aufnahmen zur Erkennung von Belichtungsstrategien beim Laserstrahlschmelzen. Semesterarbeit. Technische Universität München (2013).

Quitmann 2013
Quitmann, A.: Validierung eines Prozessüberwachungskonzepts hinsichtlich konstruktiver Ausgestaltung und Detektionsgrenzen hValidierung eines P Dinsichtlich konstru etektionsgrenzen. Semesterarbeit. Technische Universität München (2013).

Schlick 2012
Schlick, G.: Bewertung der Vergleichbarkeit generativer Fertigungsanlagen anhand von Untersuchungen zur Prozessstreuung. Diplomarbeit. Technische Universität München (2012).

Sixt 2014
Sixt, H.: High-Speed-Prozessüberwachung beim selektiven Laserstrahlschmelzen. Semesterarbeit. Technische Universität München (2014).

Üzümcü 2013
Üzümcü, Y.: Computergestützte Detektion von Prozessunregelmäßigkeiten beim Laserstrahlschmelzen durch Thermografie. Diplomarbeit. Technische Universität München (2013).

Waldmann 2014
Waldmann, J.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung thermischer In-Process-Überwachung beim Laserstrahlschmelzen. Bachelorarbeit. Technische Universität München (2014).

Woite 2014
Woite, S.: Untersuchung der Materialeigenschaften in Abhängigkeit des Zeit-Temperatur-Verlaufs beim Laserstrahlschmelzen. Masterarbeit. Hochschule München (2014).

Zeugner 2014
Zeugner, T.: Thermografische Charakterisierung eines Laserstrahlschmelzprozesses bei Metallwerkstoffen. Masterarbeit. Universität Augsburg (2014).

Zhou 2012
Zhou, J.: Qualitätssicherungskonzepte in der additiven Fertigung. Semesterarbeit. Technische Universität München (2012).

Zylla 2014
Zylla, A.: Kennzahlsystematik für die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen (3D-Druck). Bachelorarbeit. Hochschule Augsburg (2014).

Verzeichnis der eigenen Arbeiten

Krauss & Zäh 2013a
Krauss, H.; Zäh, M. F.: Investigations on Manufacturability and Process Reliability of Selective Laser Melting. Physics Procedia 41 (2013) o. Nr., S. 815–822.

Krauss 2012
Krauss, H.: Triebwerksbauteile additiv fertigen. iwb Newsletter 20 (2012) 2, S. 6.

Krauss 2014
Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch thermografische Schichtüberwachung. In: Zäh, M. F. (Hrsg.): 18. Augsburger Seminar für additive Fertigung: Produktdesign und Prozessentwicklung ; Augsburg, 26. Juni 2014. München: Utz 2014, N.A. ISBN: 978-3-8316-4379-0.

Krauss & Köhler 2012
Krauss, H.; Köhler, M.-A.: Design Modification of Vibration-loaded Aircraft-Engine Parts for Additive Manufacturing. In: Fraunhofer IPT (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2012). Berlin, 14.–15. März 2012.

Krauss & Zäh 2013b
Krauss, H.; Zäh, M. F.: Multi-target Optimization and Process Window Analysis in Selective Laser Melting of High-performance Parts. In: de Lima, Edson Pinheiro (Hrsg.): Proceedings ot the 22nd International Conference on Production Research (ICPR 22): Challenges for Sustainable Operations. Iguassu Falls, Brazil, 28. Juli–1. Aug. 2013.

Krauss et al. 2011
Krauss, H.; Eschey, C.; Götzfried, A.; Teufelhart, S.; Westhäuser, S.; Zäh, M. F.; Reinhart, G.: Modellgestützte und hierarchische Prozesskettenbetrachtung für die additive Fertigung. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1.

Krauss et al. 2012
Krauss, H.; Eschey, C.; Zäh, M. F.: Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 6.–8. Aug. 2012. University of Texas at Austin 2012.

Krauss et al. 2013
Krauss, H.; Schilp, J.; Zäh, M. F.: Reduktion der Oberflächenrauheit und oberflächennaher Fehlstellen bei Hochleistungs-SLM-Bauteilen. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech 2013: Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 14.–15. Mai 2013.

Krauss et al. 2014a
Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Detecting Process Irregularities in Selective Laser Melting by Thermography. In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2014), 12.–13. März 2014. Aachen: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-9128-1.

Krauss et al. 2014b
Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Layerwise Monitoring of the Selective Laser Melting Process by Thermography. Physics Procedia 56 (2014) o. Nr., S. 64–71.

Krauss et al. 2015
Krauss, H.; Zeugner, T.; Zäh, M. F.: Thermographic process monitoring in powderbed based additive manufacturing. In: Chimenti, D. E.; Bond, L. J. (Hrsg.): 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Boise, ID, 20.–25. Juli 2014. Melville, NY: AIP Publishing 2015. ISBN: 978-0-7354-1292-7. (AIP conference proceedings 1650).

Schilp et al. 2014
Schilp, J.; Seidel, C.; Krauss, H.; Weirather, J.: Investigations on Temperature Fields during Laser Beam Melting by Means of Process Monitoring and Multiscale Process Modelling. Advances in Mechanical Engineering 6 (2014) o. Nr., S. 217584.

Zäh, Eschey et al. 2011
Zäh, M. F.; Eschey, C.; Kellner, I. N.; Kief, H. B.; Krauss, H.; Krol, T. A.; Ott, M.; Schilp, J.; Teufelhart, S.; Westhäuser, S.: Generative Fertigungsverfahren. In: Kief, H. B.; Roschiwal, H. A. (Hrsg.): CNC-Handbuch 2011/2012: CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Simulation, Fachwortverzeichnis. München: Hanser 2011, S. 253–268. ISBN: 978-3-446-42594-1.

Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9

2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7

3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5

4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3

5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1

6 Materialbearbeitung mit Laser · von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0

7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9

8 Qualitätsmanagement · der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7

9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5

10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8

11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6

12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4

13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2

14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen

15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe · Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9

16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7

17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5

18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3

19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1

20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5

21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3

22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1

24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8

25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6

26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4

27 Rapid Prototyping · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2

28 Rapid Tooling · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0

29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9

30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen

31 Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0

32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen

33 3D-CAD · Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7

34 Laser in der Produktion · Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5

35 Ablaufsimulation · Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3

36 Moderne Methoden zur Montageplanung · Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1

37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit · Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X

38 Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8

39 Rapid Tooling · Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6

40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X

41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0

42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9

43 Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7

44 Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5

45 Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3

46 Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X

48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8

49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6

50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X

51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt-& Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8

52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein-und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6

53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2

54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2

55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0

56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9

57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7

58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7

59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3

60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7

61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen

62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3

63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1

64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X

65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8

66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6

67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4

68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2

69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0

70 Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4

71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen

72 Fabrikplanung 2004 Ergfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen

73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9

74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7

75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen

76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3

77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7

78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X

79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8

80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1

81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X

82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8

83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6

84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6

85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3

86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0

87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7

88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4

89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik · Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten · ISBN 978-3-89675-090-7

91 Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4

92 Rapid Manufacturing · Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1

93 Handhabungstechnik · Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten · ISBN 978-3-89675-093-8

94 iwb Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten · ISBN 978-3-89675-094-5

95 Zuführtechnik · Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten · ISBN 978-3-89675-095-2

96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld · Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten · ISBN 978-3-89675-096-9

97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 · Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-097-6

98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3

99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0

100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7

101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9

102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7

103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8

104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5

105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5

106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2

107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB Band 1-121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1 -121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3

2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1

3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X

4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8

5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9

6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7

7 Hunzinger, J.: Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5

8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2

9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2

10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987· 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6

11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5

12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1

13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6

14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8

15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6

16 Lutz, P: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3

17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0

18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9

19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5

20 Kirchknopf, P: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3

21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1

22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7

23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0

24 Schugmann, R: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0

25 Wrba, P: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X

26 Eibelshäuser, P: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7

27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

28 Teich, K.: Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8

29 Pfrang, W.: Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6

30 Tauber, A.: Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X

31 Jäger, A.: Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5

32 Hartberger, H.: Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5

33 Tuczek, H.: Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992· 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4

34 Fischbacher, J: Planungsstrategien zur stömungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X

35 Moser, O.: 3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8

36 Naber, H.: Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7

37 Kupec, Th.: Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4

38 Maulhardt, U.: Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1

39 Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1

40 Koepfer, Th.: 3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4

41 Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9

42 Burger, C.: Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5

43 Hoßmann, J.: Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0

44 Petry, M.: Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebeprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6

45 Schönecker, W.: Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4

46 Bick, W.: Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0

47 Gebauer, L.: Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9

48 Schrüfer, N.: Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9

49 Wisbacher, J.: Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992· 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9

50 Garnich, F.: Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7

51 Eubert, P.: Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2

52 Glaas, W.: Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0

53 Helml, H.J.: Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992· 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4

54 Lang, Ch.: Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992· 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2

55 Schuster, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6

56 Bomm, H.: Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7

57 Wendt, A.: Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0

58 Hansmaier, H.: Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2

59 Dilling, U.: Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

60 Strohmayr, R: Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X

61 Glas, J.: Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3.540-56890-5

62 Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboterein satzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1

63 Dirndorfer, A.: Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4

64 Wiedemann, M.: Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9

65 Woenckhaus, Ch.: Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D- Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8

66 Kummetsteiner, G.: 3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9

67 Kugelmann, F.: Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9

68 Schwarz, H.: Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4

69 Viethen, U.: Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7

70 Seehuber, M.: Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X

71 Amann, W.: Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9

72 Schöpf, M.: Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2

73 Welling, A.: Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0

74 Zetlmayer, H.: Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0

75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5

76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3

77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1

78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4

79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995· 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5

80 Zwanzer, N.: Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2

81 Romanow, P: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3

82 Kahlenberg, R: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1

83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X

84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8

85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2

86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8

87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995· 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6

88 Linner, St: Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1

89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6

90 Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3

91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5

93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8

94 Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X

95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1

96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8

97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996· 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X

98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5

99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2

100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8

101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagment unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0

102 Pischeltsrieder, K: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0

103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9

104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1

105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0

106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5

107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4

108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichteilsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3

109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3

110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0

111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3

112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5

113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6

114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X

115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8

116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7

117 Schuller, R. W.: Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1

118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3

119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1

120 Pfob, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. ·154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5

121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. ·156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

122 *Burghard Schneider:* Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9

123 *Bernd Goldstein:* Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9

124 *Helmut E. Mößmer:* Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8

125 *Ralf-Gunter Gräser:* Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9

126 *Hans-Jürgen Trossin:* Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5

127 *Doris Kugelmann:* Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2

128 *Rolf Diesch:* Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3

129 *Werner E. Lulay:* Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6

130 *Otto Murr:* Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7

131 *Michael Macht:* Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1

132 *Bruno H. Mehler:* Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9

133 *Knut Heitmann:* Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6

134 *Stefan Blessing:* Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9

135 *Can Abay:* Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8

136 *Stefan Brandner:* Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9

137 *Arnd G. Hirschberg:* Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6

138 *Alexandra Reek:* Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2

139 *Khalid-Alexander Sabbah:* Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5

140 *Klaus U. Schliffenbacher:* Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8

141 *Andreas Sprenzel:* Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

142 *Andreas Gallasch:* Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten · ISBN 978-3-89675-781-4

143 *Ralf Cuiper:* Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten · ISBN 978-3-89675-783-8

144 *Christian Schneider:* Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-789-0

145 *Christian Jonas:* Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-870-5

146 *Ulrich Willnecker:* Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten · ISBN 978-3-89675-891-0

147 *Christof Lehner: Beschreibung des Nd:*YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten · ISBN 978-3-8316-0004-5

148 *Frank Rick:* Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten · ISBN 978-3-8316-0008-3

149 *Michael Höhn:* Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten · ISBN 978-3-8316-0012-0

150 *Jörn Böhl:* Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-0020-5

151 *Robert Bürgel:* Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten · ISBN 978-3-8316-0021-2

152 *Stephan Dürrschmidt:* Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-0023-6

153 *Bernhard Eich:* Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten · ISBN 978-3-8316-0028-1

154 *Wolfgang Rudorfer:* Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten · ISBN 978-3-8316-0037-3

155 *Hans Meier:* Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten · ISBN 978-3-8316-0044-1

156 *Gerhard Nowak:* Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-0055-7

157 *Martin Werner:* Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten · ISBN 978-3-8316-0058-8

158 *Bernhard Lenz:* Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten · ISBN 978-3-8316-0094-6

159 *Stefan Grunwald:* Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-0095-3

160 *Josef Gartner:* Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten · ISBN 978-3-8316-0096-0

161 *Wolfgang Zeller:* Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0100-4

162 *Michael Loferer:* Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten · ISBN 978-3-8316-0118-9

163 *Jörg Führer:* Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0124-0

164 *Jürgen Höppner:* Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten · ISBN 978-3-8316-0125-7

165 *Hubert Götte:* Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten · ISBN 978-3-8316-0126-4

166 *Martin Weißenberger:* Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-0138-7

167 *Dirk Jacob:* Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0142-4

168 *Ulrich Roßgoderer:* System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten · ISBN 978-3-8316-0154-7

169 *Robert Klingel:* Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten · ISBN 978-3-8316-0174-5

170 *Paul Jens Peter Ross:* Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten · ISBN 978-3-8316-0191-2

171 *Stefan von Praun:* Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-0202-5

172 *Florian von der Hagen:* Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-0208-7

173 *Oliver Kramer:* Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten · ISBN 978-3-8316-0211-7

174 *Winfried Dohmen:* Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0214-8

175 *Oliver Anton:* Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten · ISBN 978-3-8316-0215-5

176 *Welf Broser:* Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-0217-9

177 *Frank Breitinger:* Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten · ISBN 978-3-8316-0227-8

178 *Johann von Pieverling:* Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten · ISBN 978-3-8316-0230-8

179 *Thomas Baudisch:* Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-0249-0

180 *Heinrich Schieferstein:* Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten · ISBN 978-3-8316-0251-3

181 *Joachim Berlak:* Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-0258-2

182 *Christian Meierlohr:* Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten · ISBN 978-3-8316-0292-6

183 *Volker Weber:* Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-0330-5

184 *Thomas Bongardt:* Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten · ISBN 978-3-8316-0332-9

185 *Tim Angerer:* Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0336-7

186 *Alexander Krüger:* Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten · ISBN 978-3-8316-0371-8

187 *Matthias Meindl:* Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten · ISBN 978-3-8316-0465-4

188 *Thomas Fusch:* Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-0467-8

189 *Thomas Mosandl:* Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
182 Seiten · ISBN 978-3-8316-0471-5

190 *Christian Patron:* Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0474-6

191 *Robert Cisek:* Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0475-3

192 *Florian Auer:* Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten · ISBN 978-3-8316-0485-2

193 *Carsten Selke:* Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten · ISBN 978-3-8316-0495-1

194 *Markus Seefried:* Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-0503-3

195 *Wolfgang Wagner:* Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-0586-6

196 *Christopher Ulrich:* Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0590-3

197 *Johann Härtl:* Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten · ISBN 978-3-8316-0611-5

198 *Bernd Hartmann:* Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-0615-3

199 *Michael Schilp:* Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0631-3

200 *Florian Manfred Grätz:* Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0643-6

201 *Dieter Eireiner:* Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-0650-4

202 *Gerhard Volkwein:* Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0668-9

203 *Sven Roeren:* Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-0680-1

204 *Henning Rudolf:* Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0697-9

205 *Stella Clarke-Griebsch:* Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0701-3

206 *Michael Ehrenstraßer:* Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0743-3

207 *Rainer Schack:* Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0748-8

208 *Wolfgang Sudhoff:* Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten · ISBN 978-3-8316-0749-5

209 *Stefan Müller:* Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0750-1

210 *Ulrich Kohler:* Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten · ISBN 978-3-8316-0753-2

211 *Klaus Schlickenrieder:* Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-0776-1

212 *Niklas Möller:* Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0778-5

213 *Daniel Siedl:* Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0779-2

214 *Dirk Ansorge:* Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0785-3

215 *Georg Wünsch:* Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten · ISBN 978-3-8316-0795-2

216 *Thomas Oertli:* Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-0798-3

217 *Bernd Petzold:* Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-0805-8

218 *Loucas Papadakis:* Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0813-3

219 *Mathias Mörtl:* Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-0820-1

220 *Sebastian Weig:* Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-0823-2

221 *Tobias Hornfeck:* Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0826-3

222 *Hans Egermeier:* Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-0833-1

223 *Matthäus Sigl:* Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0841-6

224 *Mark Harfensteller:* Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-0849-2

225 *Jochen Werner:* Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-0857-7

226 *Florian Hagemann:* Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-0861-4

227 *Haitham Rashidy:* Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0862-1

228 *Wolfgang Vogl:* Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten · ISBN 978-3-8316-0869-0

229 *Sonja Schedl:* Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0874-4

230 *Andreas Trautmann:* Bifocal Hybrid Laser Welding · A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten · ISBN 978-3-8316-0876-8

231 *Patrick Neise:* Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0878-2

232 *Christian Habicht:* Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-0891-1

233 *Michael Spitzweg:* Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0931-4

234 *Ulrich Munzert:* Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0948-2

235 *Georg Völlner:* Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-0955-0

236 *Nils Müller:* Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-0992-5

237 *Franz Decker:* Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0996-3

238 *Christian Lau:* Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4012-6

239 *Christoph Rimpau:* Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten · ISBN 978-3-8316-4015-7

240 *Michael Loy:* Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-4027-0

241 *Andreas Eursch:* Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-4029-4

242 *Florian Schwarz:* Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten · ISBN 978-3-8316-4030-0

243 *Martin Georg Prasch:* Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten · ISBN 978-3-8316-4033-1

244 *Johannes Schilp:* Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4063-8

245 *Stefan Lutzmann:* Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4070-6

246 *Gregor Branner:* Modellierung transienter Effekte in der Strukturdynamik von Schichtbauverfahren
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-4071-3

247 *Josef Ludwig Zimmermann:* Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten · ISBN 978-3-8316-4091-1

248 *Clemens Pörnbacher:* Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten · ISBN 978-3-8316-4108-6

249 *Alexander Lindworsky:* Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten · ISBN 978-3-8316-4125-3

250 *Michael Mauderer:* Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4126-0

251 *Roland Mork:* Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4127-7

252 *Florian Reichl:* Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4128-4

253 *Paul Gebhard:* Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4129-1

254 *Michael Heinz:* Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten · ISBN 978-3-8316-4147-5

255 *Pascal Krebs:* Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4156-7

256 *Gerhard Straßer:* Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten · ISBN 978-3-8316-4161-1

257 *Frédéric-Felix Lacour:* Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten · ISBN 978-3-8316-4162-8

258 *Thomas Hensel:* Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten · ISBN 978-3-8316-4167-3

259 *Sherif Zaidan:* A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten · ISBN 978-3-8316-4175-8

260 *Hendrik Schellmann:* Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4189-5

261 *Marwan Radi:* Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten · ISBN 978-3-8316-4195-6

262 *Markus Ruhstorfer:* Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4197-0

263 *Rüdiger Daub:* Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten · ISBN 978-3-8316-4199-4

264 *Michael Ott:* Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4201-4

265 *Martin Ostgathe:* System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten · ISBN 978-3-8316-4206-9

266 *Imke Nora Kellner:* Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4223-6

267 *Florian Oefele:* Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten · ISBN 978-3-8316-4224-3

268 *Claudia Anna Ehinger:* Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-4233-5

269 *Tobias Zeilinger:* Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4234-2

270 *Stefan Krug:* Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4243-4

271 *Marc Lotz:* Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4245-8

272 *William Brice Tekouo Moutchiho:* A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4247-2

273 *Matthias Waibel:* Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten · ISBN 978-3-8316-4250-2

274 *Christian Eschey:* Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4270-0

275 *Florian Aull:* Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten · ISBN 978-3-8316-4283-0

276 *Marcus Hennauer:* Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4306-6

277 *Alexander Götzfried:* Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4310-3

278 *Saskia Reinhardt:* Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4317-2

279 *Fabian J. Meling:* Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4319-6

280 *Jörg Egbers:* Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4328-8

281 *Max von Bredow:* Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4337-0

282 *Tobias Philipp:* RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten · ISBN 978-3-8316-4346-2

283 *Stefan Rainer Johann Braunreuther:* Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4348-6

284 *Johannes Pohl:* Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4358-5

285 *Mathey Wiesbeck:* Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4369-1

286 *Sonja Huber:* In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4370-7

287 *Robert Wiedenmann:* Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4384-4

288 *Thomas Irrenhauser:* Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4404-9

289 *Jens Hatwig:* Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4405-6

290 *Matthias Baur:* Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4408-7

291 *Alexander Schober:* Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstrukursimulation
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-4415-5

292 *Matthias Glonegger:* Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4419-3

293 *Markus Kahnert:* Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4416-2

294 *Sebastian Schindler:* Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4434-6

295 *Tobias Föckerer:* Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten · ISBN 978-3-8316-4448-3

296 *Rüdiger Spillner:* Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4450-6

297 *Daniel Schmid:* Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten · ISBN 978-3-8316-4452-0

298 *Florian Karl:* Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln
222 Seiten · ISBN 978-3-8316-4458-2

299 *Philipp Ronald Engelhardt:* System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
246 Seiten · ISBN 978-3-8316-4472-8

300 *Markus Graßl:* Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4476-6

301 *Thomas Kirchmeier:* Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4478-0

302 *Oliver Rösch:* Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4486-5

303 *Christoph Sieben:* Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4510-7

304 *Philipp Alexander Schmidt:* Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-4519-0

305 *Yi Shen:* System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-4520-6

306 *Thomas Bonin:* Moderne Ordnungsreduktionsverfahren für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen
274 Seiten · ISBN 978-3-8316-4522-0

307 *Jan Daniel Musiol:* Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden
168 Seiten · ISBN 978-3-8316-4523-7

308 *Emin Genc:* Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4525-1

309 *Mirko Langhorst:* Beherrschung von Schweißverzug und Schweißeigenspannungen
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-4524-2

310 *Markus Schweier:* Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation
284 Seiten · ISBN 978-3-8316-4536-7

311 *Florian Geiger:* System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4537-4

312 *Peter Schnellbach:* Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme
236 Seiten · ISBN 978-3-8316-4540-4

313 *Stefan Schwarz:* Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von Werkzeugmaschinenstrukturen
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4542-8

314 *Markus Pröpster:* Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus
238 Seiten · ISBN 978-3-8316-4547-3

315 *Dominik David Simon:* Automatisierte flexible Werkzeugsysteme zum Umformen und Spannen von Kunststoffscheiben und -schalen
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4548-0

316 *Stefan Maurer:* Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4554-1

317 *Tobias Maier:* Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen
274 Seiten · ISBN 978-3-8316-4561-9

318 *Klemens Konrad Niehues:* Identifikation linearer Dämpfungsmodelle für Werkzeugmaschinenstrukturen
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4568-8

319 *Julian Christoph Sebastian Backhaus:* Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme
264 Seiten · ISBN 978-3-8316-4570-1

320 *Sabine G. Zitzlsberger:* Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4573-2

321 *Christian Thiemann:* Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4574-9

322 *Markus Westermeier:* Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4586-2

323 *Thorsten Klein:* Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau
284 Seiten · ISBN 978-3-8316-4598-5

324 *Markus Wiedemann:* Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4599-2

325 *Harald Krauss:* Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung
304 Seiten · ISBN 978-3-8316-4628-9