

Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen

Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive
Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit
geometrischen Produktspezifikationen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 377

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Martin Lerchen

**Messverfahren für die
pulverbettbasierte additive
Fertigung zur Sicherstellung der
Konformität mit geometrischen
Produktspezifikationen**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
(FMT) Prof. Dr.-Ing. Tino Hausotte

Erlangen
FAU University Press
2021

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.

Bitte zitieren als

Lerchen, Martin. 2021. *Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 377.

Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-464-6

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-463-9 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-464-6 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-464-6

**Messverfahren für die pulverbettbasierte additive
Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit
geometrischen Produktspezifikationen**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Martin Lerchen (geb. Heintl) M. Sc.

aus Bayreuth

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 29.09.2021

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Erklärung des Autors

Diese Arbeit ist im Rahmen eines Forschungsprojektes des Sonderforschungsbereichs 814 (SFB814) - Additive Fertigung unter der Projektleitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) entstanden. Herr Prof. Hausotte definierte im zugehörigen Forschungsantrag [Hausotte, 2015] des Teilprojektes C4 zur „inkrementellen inline-Prüftechnik in der additiven Fertigung“ die Konzeption und Methodik des Forschungsvorhabens bezüglich des neuartigen Referenzierungsansatzes (vgl. Abschnitt 3.1) und betreute das Promotionsvorhaben von fachlicher Seite.

Der wesentliche Teile der Arbeit wurde im rein monographischen Stil, ohne fremde Hilfe und nur mit Benutzung der angegebenen Quellen verfasst. Einzelne Teile dieser Dissertation zur konstruktiven Umsetzung des Referenzierungssystems (vgl. Abschnitt 3.1.1.2) [Lerchen et al., 2021b], den Vorversuchen der Ulbricht-Kugelmessungen (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) [Heinl et al., 2018b], der Kontur- und Referenzauswertung (vgl. Kapitel 5) [Lerchen et al., 2021a] sowie den Ergebnissen zur Positionsstabilität des Referenzierungssystems (vgl. Abschnitt 6.2) [Lerchen et al., 2021b] wurden bereits vom Autor mit Unterstützung der angegebenen Co-Autoren veröffentlicht. Eine vollständige Liste bzw. ein „Verzeichnis promotionsbezogenen, eigener Publikationen“ wurde am Ende dieser Arbeit beigefügt. Die zugehörigen Schreibanteile sind den jeweils angegebenen Autorenbeiträgen der jeweiligen Publikationen zu entnehmen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit von 2016 bis 2021 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik in Erlangen. Da nun mit der Promotion der wichtigste Teil meiner Ausbildung erfolgreich abgeschlossen werden konnte, möchte ich die Gelegenheit nutzen und mich bei all jenen bedanken, die mich auf dem Weg zur Doktorwürde so tatkräftig unterstützt haben. Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, dem Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik, gilt mein besonderer Dank für das entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit und die Übernahme des Hauptreferates. Weiterhin möchte ich mich bei meinem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, den Leiter des Lehrstuhls für Photonische Technologien (LPT) in Erlangen, für die Übernahme des Korreferates und die offene Diskussion meiner Dissertation sinhalte bedanken. Meinen Kollegen des Lehrstuhls FMT und meinen Studenten der von mir betreuten Bachelor-, Projekt- und Masterarbeiten danke ich weiterhin für die gute, konstruktive Zusammenarbeit. Außerdem danke ich meiner Frau und meinen Eltern, die mich auf dem langen Ausbildungsweg begleitet haben und ohne deren Unterstützung ich es nicht so weit geschafft hätte.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Größenverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Additive Fertigungsverfahren	3
2.2 Prozesstechnische Grundlagen des selektiven Laserstrahlschmelzens	5
2.3 Material- und fertigungsbedingte Einflussgrößen auf die extrahierte Bauteilgeometrie	8
2.3.1 Material und Prozessfenster	9
2.3.2 Schwindung und Verzug	11
2.3.3 Fertigungsparameter	13
2.3.4 Geometrische Abweichungen des Fertigungs- und Messkreises	15
2.4 Prozessüberwachung und Bauteilprüfung in der additiven Fertigung	17
2.4.1 Pre-Prozess	19
2.4.1.1 Pulvercharakterisierung	19
2.4.1.2 Datenverarbeitung	20
2.4.1.3 Aufheizphase	21
2.4.2 In-Prozess	21
2.4.2.1 Pulverauftrag	22
2.4.2.2 Laserleistung	23
2.4.2.3 Aufschmelzvorgang und Schmelzbad	24
2.4.2.4 Referenzierungssysteme	26
2.4.2.5 Bauraumtemperierung	27
2.4.3 Post-Prozess	28
2.4.3.1 Geometrie, Bauteildichte und -porosität	29
2.4.3.2 Mechanische Eigenschaften	30
2.5 Regelsysteme in der additiven Fertigung	31
2.6 Wissenschaftliche Zielsetzung	34
3 Konzeption, Entwicklung und Realisierung der Messsysteme 37	37
3.1 Gesamtkonzept	37
3.1.1 Prinzip der referenzierten Konturerfassung	37
3.1.1.1 Vorversuch zur Integration beleuchteter Referenzierungsrohre in die Bauplattform	39
3.1.1.2 Konstruktive Umsetzung des Referenzie- rungssystems	40

3.1.2	Prinzip zum Nachweis der Wiederholpräzision des Scanners	42
3.1.3	Prinzip zum Nachweis schichtweiser lateraler Konturverlagerungen	43
3.2	In-Prozess-Messsysteme	43
3.2.1	Pulverbettabsenkung	44
3.2.2	Temperatur	45
3.2.3	Aufschmelzen und Schmelzbad	46
3.2.3.1	Vorversuch zur Analyse prozessbedingter Strahlungsintensitäten und Wellenlängenspektren	46
3.2.3.2	Koaxiale Kamera	50
3.2.3.3	Schmelzbad- bzw. Fotogrammetriekameras	51
4	Versuchsdurchführung	52
4.1	Messung der Pulverbettabsenkung	52
4.2	Temperaturmessung entlang der Fertigungs- und Messkreise	53
4.3	Optische in situ-Messung der Baufläche	54
4.3.1	Anpassung der Szenen durch Beleuchtungssysteme	54
4.3.2	Kamerakalibrierung und Bildskalierung	56
4.3.3	Koaxiale Messdatenerfassung	61
4.3.4	Referenzierte Konturerfassung durch Schmelzbadkameras	61
4.3.4.1	Erfassung des Referenzierungssystems	62
4.3.4.2	Referenzierte in situ-Überwachung der schichtweisen additiven Fertigung zylindrischer Probekörper	63
4.3.4.3	Referenzierte in situ-Überwachung weiterer AM-Probekörper	66
4.4	Optische post-Prozess-Vermessung der gefertigten AM-Bauteile	67
5	Kontur- und Referenzauswertung	69
5.1	Bildaufbereitung	69
5.1.1	Perspektivische Korrektur und Bereichseingrenzung	69
5.1.2	Kontrastanpassung	71
5.1.3	Filterung	72
5.2	Bildverarbeitung mit Kantendetektionsalgorithmus nach Canny	75
6	Verifikation der Beobachtbarkeit der Messgrößen	79
6.1	Pulverbettabsenkung	79

6.2	Positionsstabilität des Referenzierungssystems relativ zu den Kamerasystemen	80
6.2.1	Positionsstabilität bei Temperierung des Bauraums	81
6.2.1.1	Stabilität bei Raumtemperatur	82
6.2.1.2	Stabilität beim Aufheizvorgang	84
6.2.1.3	Stabilität bei Prozesstemperatur	88
6.2.1.4	Temperaturbedingte Beeinflussung des Pulverbettes durch das Referenzierungssystem	90
6.2.2	Positionsstabilität bei Pulverauftrag	91
6.3	Wiederholpräzision des Scanners	93
6.4	Wiederholpräzision der Konturauswertung des Schmelzbades	94
6.4.1	Reproduzierbarkeit des Auswertalgorithmus	95
6.4.2	Wiederholpräzision der Schmelzbadkameras	97
6.4.3	Einfluss der Wärmestrahlung des Schmelzbades durch Fertigungsschichten	99
6.4.3.1	Analyse des Schichtdickeneinflusses	99
6.4.3.2	Analyse der detektierten lateralen Konturverlagerung	100
6.4.4	Stabilität des verwendeten Referenzierungssystems im Vergleich zur Referenzierung über Bauraumkanten	104
6.4.5	Einfluss des Betrachtungswinkels der Schmelzbadkameras	105
6.5	Nachweis referenzierter lateraler Konturverlagerungen	107
6.5.1	Analyse der lateralen Positionsabweichungen des Referenzierungssystems, Schmelzbades und der durchschimmernden Bauteilkonturen	107
6.5.2	Referenzierte laterale Lage- und Formabweichung	109
6.6	Ermittelte Fertigungs- und Messabweichungen	113
7	Steuerbarkeit und erzielbare Form- und Maßhaltigkeit der Bauteile der Forschungsanlage	117
7.1	Post-Prozess-Analyse der additiv gefertigten Zylinder	118
7.2	Post-Prozess-Analyse der zusätzlichen AM-Probekörper	120
8	Zusammenfassung	123
9	Ausblick	127
	Anhang	130
	Literaturverzeichnis	135

Abkürzungs- und Größenverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
AM	Additive manufacturing (Additive Fertigung)
blz	Bayerisches Laserzentrum (Forschungsinstitut in Erlangen)
CAD	Computer aided design (Rechnergestütztes Konstruieren)
CCD	Charge-coupled device (Lichtempfindliche elektronische Bauelemente)
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor (Halbleiterdetektor zur Lichtmessung)
CT	Computertomographie (Messverfahren basierend auf Röntgenstrahlung)
CVD	Chemical Vapour Deposition (Fertigungsverfahren mit chemischer Abscheidung aus der Gasphase)
DLP	Digital light processing (Fertigungsverfahren mit Laserbelichtung einer Paste)
3DP	3-D-printing (Fertigungsverfahren mit Schichtauftrag eines flüssigen Binders)
DSC	Differential scanning calorimetry (Messverfahren der dynamischen Differenz- Thermoanalyse)
EBM	Electron beam melting (Fertigungsverfahren basierend auf Elektronen-Strahlschmelzen von Metallen)
EOS	Electro optical systems (AM Firma)
FDM	Fused deposition modelling (Fertigungsverfahren mit Extrusionsverfahren und Schichtauftrag über Düsen)
GPS	Geometrische Produktspezifikation (Normensammlung mit Definition von Geometriemerkmalen und Toleranzen)
GUM	Guide to the expression of the unvertainty in measurements (Leitfaden zur Unsicherheitsbestimmung)
IBAD	Ion beam assisted deposition (Fertigungsverfahren mit Ionenstrahl)

IR	Infrarot-Strahlung (Wellenlängenspektrum von ca. 780 nm – 10000 nm)
ISO/TC 213	Technical committee of the international organisation of standardisation (Internationale Arbeitsgruppe)
LBM	Laser beam melting (Fertigungsverfahren mit Laserstrahlschmelzen; auch bekannt als „selective laser melting (SLM)“; angehängte Kürzel möglich (P: Polymer, M: Metall))
LED	Light-emitting diodes (Elektrische Lichtquellen)
LLM	Layer laminated manufacturing (Fertigungsverfahren basierend auf verklebten/ultraschallgeschweißten Laminaten)
MAE	Mean absolute error (Mittlerer absoluter Fehler)
MJM	Multi-jet modelling (Fertigungsverfahren basierend auf Polymerisation, Schichtauftrag über Düsen)
PA	Polyamid (Polymerer Werkstoff; nachgestellte Zahl (z. B. PA12) gibt Anzahl der Kohlenstoffatome an)
PBT	Polybutylenterephthalat (Polymerer Werkstoff)
PEEK	Polyetheretherketon (Hochtemperaturbeständiger, polymerer Werkstoff)
PJM	Poly-jet modelling (Fertigungsverfahren basierend auf Polymerisation, Schichtauftrag über Düsen)
PP	Polypropylen (Polymerer Werkstoff)
Pt100	Platin Metall-Widerstandsthermometer (Thermometer mit spezifischen Widerstand von 100 Ω bei 0 °C)
PU	Polyurethan (Polymerer Werkstoff)
PVD	Physical vapour deposition (Fertigungsverfahren mit physikalischer Abscheidung aus der Gasphase)
REM	Rasterelektronenmikroskopie (Messverfahren zur Oberflächencharakterisierung)
RM	Rapid manufacturing (Prozessverfahren zur Fertigung von AM Bauteilen)
RMSE	Root mean square error (Mittlerer quadratischer Fehler)

ROI	Region of interest (Relevanter Arbeitsbereich der Bildauswertung)
RP	Rapid prototyping (Prozessverfahren zur Herstellung von AM Prototypen)
RPD	Rapid product development (Prozessverfahren zur schnellen Produktentwicklung)
RT	Rapid tooling (Prozessverfahren zur Herstellung von AM Werkzeugen und Formen)
S235JR	Unlegierter Baustahl (Werkstoff des Anlagerahmens der Fertigungsanlage)
SFB 814	Sonderforschungsbereich 814 - Additive Fertigung (Forschungsverbund der Universität Erlangen-Nürnberg gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Bereich AM)
SL	Stereolithographie (Fertigungsverfahren basierend auf Polymerisation)
SLS	Selektives Lasersintern (Fertigungsverfahren mit Laser-Sintern von Kunststoffen, eng verwandt mit LBM)
TPE-A	Thermoplastisches Polyamidlastomer (Polymerer Werkstoff)
TPU	Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis (Polymerer Werkstoff)

Größen

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A	mm^2	Querschnittsfläche
A_r	-	Absorptionsrate
α	$\frac{1}{\text{K}}$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
B	mm	Breite
β	mm	Einflussfaktor Bauteil
c_p	$\frac{\text{J}}{\text{gK}}$	Spezifische Wärmekapazität
D	mm	Diagonaler Abstand

D_o	mm	Ausgangsdurchmesser (bei Raumtemperatur)
D_s	mm	Schichtdicke
ΔD	mm	Durchmesseränderung
$d_{x,3}$	mm	Volumetrische Partikelgrößenverteilung
δ	rad	Rotationswinkel
E	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Elastizitätsmodul
E_A	$\frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$	Flächenenergiedichte
E_V	$\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	Volumenenergiedichte
ε	-	Emissionskoeffizient
$\hat{\varepsilon}$	mm	Residuum (Fehlerterm, u. a. Messabweichungen)
ε_b	-	Bruchdehnung
f_i	mm	Fokusslänge
f_{kal}	mm	Projektionsabweichung bei Kalibrierung
H_R	-	Hausner-Faktor
h	mm	Bauteilhöhe
h_s	mm	Hatchabstand
η	$\frac{1}{\text{g}}$	Viskositätszahl
$\vartheta(t)$	°C	Zeitabhängige Temperaturführung
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz
ϑ_c	°C	Kristallisationstemperatur
ϑ_m	°C	Schmelztemperatur
k_1, k_2	-	Koeffizienten der radialen Verzeichnung
k_s	-	Scherfaktor
L	mm	Länge
L_o	mm	Ausgangslänge (bei Raumtemperatur)
ΔL	mm	Längenänderung
l_n	mm	Messstrecke

Abkürzungs- und Größenverzeichnis

λ	mm	Wellenlänge
λ_c	mm	Grenzwellenlänge
λ_{therm}	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit
λ_{max}	mm	Spezifische Wellenlänge mit maximaler Lichtintensität
N	-	Stichprobengröße
n	-	Anzahl
ν	$\frac{l}{\text{mm}}$	Wellenzahl
P	W	Laserleistung
p	-	Pearson-Koeffizient
ρ	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Bauteildichte
ρ_∞	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Schüttdichte
ρ_o	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Stampfdichte
\dot{Q}	$\frac{\text{W}}{\text{g}}$	Spezifischer Wärmestrom
R_a	mm	Arithmetischer Mittenrauwert (Linienprofil)
R_m	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Zugfestigkeit
R_q	mm	Quadratischer Mittenrauwert (Linienprofil)
R_r	-	Reflexionsrate
R_z	mm	Gemittelte Rautiefe (Linienprofil)
r	-	Korrelationskoeffizient
S_a	mm	Arithmetischer Mittenrauwert (Flächenhaft)
S_q	mm	Quadratischer Mittenrauwert (Flächenhaft)
S_z	mm	Gemittelte Rautiefe (Flächenhaft)
T_m	K	Schmelztemperatur
T_i	-	Grenzwert (engl. Threshold)
T_r	-	Transmissionsrate
t	s	Zeit
τ	mm	Schwindungsbedingter Einflussfaktor des Werkstoffes

u_o, v_o	mm	Verschiebungsvektoren
v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	Scangeschwindigkeit
v_{Rakel}	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	Geschwindigkeit des Rakels bei Pulverauftrag
w	$\frac{\text{px}}{\text{mm}}$	Bildskalierungsfaktor
x, y, z	mm	Kartesische Koordinaten
$\Delta x, \Delta y$	mm	Relative Verschiebung in x - bzw. y -Richtung
$z(x, y)$	mm	Höhenprofil der Oberfläche

Mathematische Abkürzungen

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>
$d(P_1, P_2)$	Euklidischer Abstand Punkt $P_1(x_1, y_1)$ zu $P_2(x_2, y_2)$
$d(t)$	Störgröße (Regelkreis)
$e(t)$	Regelabweichung (Regelkreis)
$g(x, y)$	Gaußfunktion
\underline{K}	Intrinsische Matrix
μ	Mittlere geometrische Abweichung (Grundgesamtheit)
\underline{R}	Rotationsmatrix
$r(t)$	Messrauschen (Regelkreis)
s	Standardabweichung der Stichprobe
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
\underline{t}	Translationsmatrix
$u(t)$	Stellgröße (Regelkreis)
$w(t)$	Führungsgröße (Regelkreis)
\bar{x}	Mittelwert einer Messgröße einer Stichprobe
$y(t)$	Regelgröße (Regelkreis)
$y_m(t)$	Messwert (Regelkreis)

Weitere eingeführte Abkürzungen

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>
b	Bild
b'	Perspektivisch korrigiertes Bild
b''	Perspektivisch- und Helligkeitkorrigiertes Bild
\hat{b}	Perspektivische Projektion des Bildes b
b_{rausch}	Verrauschtes Bild
b_{size}	Bildgröße
P_i	Bildpunkt
r_0	Referenzbild
r_0'	Perspektivisch korrigiertes Referenzbild

1 Einleitung

Globale Fertigungstrends zielen zunehmend auf schnelle, flexible und wirtschaftliche Serienproduktionen mit hohen Qualitätsstandards ab. Damit einhergehend steht die „kundenindividuelle Massenfertigung“ nach *Davis* schon seit einigen Jahrzehnten im Fokus produzierender Unternehmen [Davis, 1987]. Sie ist heutzutage fester Bestandteil industrieller Wettbewerbsmodelle, die auf eine stetige Rationalisierung, Prozessverbesserung, Differenzierung und Qualitätssteigerung des Produktportfolios setzen [Lachmayer et al., 2016]. Neben weiteren, vermehrt ökologischen Themen, wie der ressourceneffizienten Rohstoffnutzung, gewinnt die Beherrschung neuer Fertigungsprozesse stetig an Bedeutung [Imkamp et al., 2012]. In diesem Kontext besitzen besonders additive Fertigungsverfahren ein wesentliches Anwendungs- und Wachstumspotential, um den steigenden Kundenanforderungen gerecht zu werden. Der hohe zukünftige Stellenwert der additiven Fertigung geht auch aus einem Bericht des EU-Programms zur Analyse der weltweiten Marktentwicklung hervor, in dem von einer „*Key Enabling Technology*“ gesprochen wird [Wirth, 2017]. Allerdings hat sich die additive Fertigung bis heute trotz einer stetigen Entwicklung von der individualisierten Einzelproduktion hin zur kundenindividuellen Serienfertigung noch nicht umfassend als konkurrenzfähige, industrielle Produktionstechnologie etablieren können [Wegner, 2015; Wohlers et al., 2019]. Zwar ist der Begriff des *Additive Manufacturing* (AM) im allgemeinen Sprachgebrauch bereits weit verbreitet, dessen industrielle Anwendungsgebiete beschränken sich derzeit aber auf Branchen wie die Luft- und Raumfahrt, Automobil- und Rüstungsindustrie, Medizintechnik, Elektronik, das Kunsthandwerk und den Maschinenbau. Die Vorteile der additiven Fertigung kommen hierbei besonders in der Prototypenfertigung kleiner Bauteilserien sowie der Produktion komplexer Bauteile zum Tragen, bei denen traditionelle Fertigungsverfahren an ihre technischen Grenzen stoßen. Die bisher geringfügige industrielle Anwendung additiver Verfahren lässt sich auf die verhältnismäßig hohen Prozess- und Werkstoffkosten und die damit verbundenen Stückkosten zurückführen, die nach Bild 1 in einem Spannungsfeld zu einer wirtschaftlichen Serienproduktion komplexer Bauteile stehen. Zwar werden durch die additive Fertigung Kleinserien mit hohen Integrationstiefen zu ansatzweise unveränderten Stückkosten ermöglicht, es bedarf jedoch noch umfassender Prozessverbesserungen, um eine wirtschaftliche Serienproduktion zu realisieren. [Schmid, 2015a] Grundvoraussetzung für die wirtschaftliche Nutzung mehrstufiger, komplexer additiver Fertigungsverfahren ist ein globales Prozessverständnis. Zahlreiche Initiativen auf der ganzen Welt sind im Bereich des AM gegründet worden, um die Standardisierung und Normung additiver Fertigungsprozesse voranzutreiben und

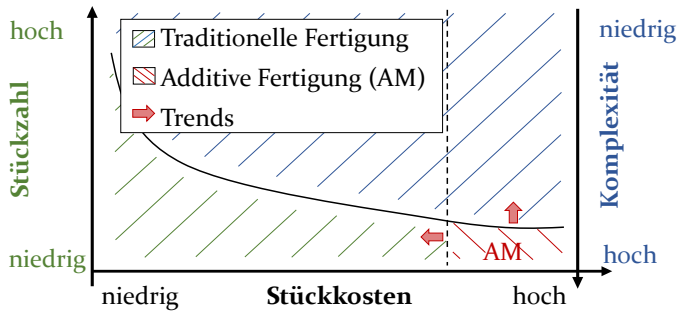


Bild 1: Fertigungstrends des AM (in Anlehnung an [Schmid, 2015a])

die Attraktivität für die Absatzmärkte zu erhöhen [Schmid, 2015a]. Auch der Sonderforschungsbereich 814 - Additive Fertigung (SFB 814) aus Erlangen trägt seit 2011 zur Grundlagenforschung pulverbettbasierter additiver Fertigungsverfahren von der Werkstoff-, Prozess- bis hin zur Bauteilcharakterisierung bei. Das gemeinsame Ziel aller Forschungsansätze ist eine durchgängig transparente Produktion samt funktionsfähiger Qualitätssicherung, die nur durch einen verstärkten Einsatz von Fertigungsmesstechnik bewerkstelligt werden kann. Eine ganzheitliche Prozessüberwachung ist hierbei essentiell, um die für die Prozessregelung relevanten Fertigungsabweichungen unmittelbar bewerten und bei Bedarf in den Fertigungsprozess eingreifen zu können [Loderer, 2017]. Im Rahmen der Bearbeitung des Teilprojektes C4 „Inkrementelle inline-Prüftechnik für die additive Fertigung“ des SFB 814 ist daher ein Messverfahren entwickelt worden, um geometrische Fertigungsabweichungen während des Laser- und Pulverbett-basierten additiven Fertigungsprozesses genauer detektieren, klassifizieren und bei Bedarf korrigieren zu können [Hausotte, 2015]. Die Sicherstellung der vom Kunden geforderten geometrischen Produktspezifikationen steht hierbei im Fokus der Qualitätssicherung. Neben einer Qualitätsprüfung der Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile ist nach [DIN EN ISO 1101: 2017-09] auf die Einhaltung der Form- und Lagetoleranzen zu achten. Dies erfordert eine prozessbegleitende Qualitätsüberwachung, die nur durch zusätzliche Messsysteme in den additiven Fertigungsanlagen realisiert werden kann. Um die prozessbedingten Fertigungsabweichungen beim exemplarisch betrachteten selektiven Laserstrahlschmelzen von Polymeren besser beurteilen zu können, wird neben der Implementierung eines optischen, kamerabasierten Messsystems, eine Verkürzung des Messkreises durch ein integriertes Referenzierungssystem im Pulverbett vorgenommen [Hausotte, 2015]. Auf diese Weise wird durch die schichtweise referenzierte Erfassung lateraler Bauteilverlagerungen eine wesentliche Grundlage für ein besseres Prozessverständnis und weiterführende regelungstechnische Korrekturansätze gelegt.

2 Stand der Technik

Für eine fertigungsnahe Qualitätsbeurteilung geometrischer Merkmale von AM-Bauteilen bedarf es fertigungs- und messtechnischer Grundlagen, die im Folgenden erläutert werden. Nach einer allgemeinen Einordnung und Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren wird der exemplarisch betrachtete Fertigungsprozess des selektiven Laserstrahlschmelzens (engl. *Laser Beam Melting* (LBM)) vorgestellt. Es erfolgt eine Charakterisierung fertigungsbedingter Prozesskenngrößen, die die Bauteilgestalt beeinflussen und dadurch maßgeblich für die in der Produktspezifikation geforderten geometrischen Toleranzen sind. Anhand einer Auswahl industriell etablierter, fertigungsmesstechnischer Verfahren zur Überwachung dieser Prozessparameter während des additiven Fertigungsprozesses werden vorhandene Limitierungen derzeitiger Messverfahren in Bezug auf die Beurteilung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen verdeutlicht. Aufbauend auf der Prozessüberwachung werden gängige Regelsysteme in der additiven Fertigung vorgestellt und deren Defizite in der Prozessüberwachung dargestellt. Abschließend wird die Zielstellung für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit abgeleitet.

2.1 Additive Fertigungsverfahren

Die additive Fertigung vereint zahlreiche Vorzüge moderner, nachhaltiger Produktionsverfahren wie die endkonturnahe Fertigung komplexer Bauteile und hat daher einen hohen Stellenwert in der aktuellen Forschung erlangt. Die Grundzüge des AM reichen bereits bis ins Jahr 1892 zurück, in dem *J. E. Blather* eine erste Patentanmeldung zur Herstellung topographischer Konturmappen vorgestellt hat, die bereits erste Ansätze zur schichtweisen Bauweise beinhalteten [Blather, 1892]. Nachdem in den Folgejahren der Mehrwert der additiven Fertigung noch nicht vollständig erkannt wurde, haben fast ein Jahrhundert später neue grundlegende Erkenntnisse von *C. W. Hull* und *C. Deckhard* zum Durchbruch des AM geführt. Ihre Patentanmeldung zur Stereolithographie (SL) und dem selektiven Lasersinterverfahren (SLS bzw. LBM) haben zur industriellen Umsetzung der ersten kommerziellen additiven Fertigungssysteme beigetragen [Hull, 1986; Deckard, 1989].

Durch den verstärkten industriellen Einsatz additiver Fertigungsverfahren wurde der Bedarf an Standardisierung, Normung und Klassifizierung zunehmend bedeutender. Internationale Normungsorganisationen wie die *American Society for Testing and Materials* (ASTM), die *International Organisation for Standardisation* (ISO), der *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI) und

das *Deutsche Institut für Normung* (DIN) haben durch zahlreiche Richtlinien zum AM wichtige Grundlagen für das allgemeine, internationale Prozessverständnis geschaffen.

Eine Einordnung des AM kann nach dem Entwurf der Überarbeitung der [DIN 8580: 2020-01] in die Hauptgruppe der urformenden Fertigungsverfahren vorgenommen werden. Die Verfahrensgruppe der generativen, additiven Fertigungsverfahren beruht per Definition in [VDI 3405: 2014-12] auf dem Grundprinzip einer sukzessiven Zugabe bzw. Verbindung von Werkstoffen, um ein dreidimensionales Bauteil aus Modelldaten element- oder schichtweise herzustellen [DIN EN ISO/ ASTM 52900: 2017-06; VDI 3405: 2014-12]. Damit weisen additive Fertigungsverfahren vor allem in der Phase des Produktentstehungsprozesses komplexer Bauteile wesentliche Vorteile auf. Die bekanntesten Produktionsverfahren des AM sind das *Rapid Prototyping* (RP), *Rapid Tooling* (RT) und *Rapid Manufacturing* (RM). Diese lassen sich nach Bild 2 in den Produktentstehungszyklus nach [VDI 2221-1: 2018-03] eingliedern. Die einzelnen Phasen überschneiden sich vom Beginn der Planung, über die Entwicklung bis hin zur Produktrealisierung und gehen fließend ineinander über. Insgesamt wird durch die *Rapid*-Technologien das Ziel einer schnellen Produktentwicklung, des sogenannten *Rapid Product Development* (RPD) verfolgt, um durch kurze Entwicklungszyklen zu einer Produktion endkonturnaher, marktreifer Bauteile zu gelangen [Berger et al., 2013].

Nach dieser allgemeinen Einordnung in den Produktentstehungsprozess erfolgt eine Unterteilung etablierter, additiver Fertigungsverfahren. Auf Grundlage der in [VDI 3405: 2014-12] und [DIN EN ISO 17296-2: 2016-12] ausgewiesenen, derzeit gängigen AM Verfahren lassen sich nach Bild 3 verschiedene Fertigungstechnologien entsprechend des Aggregatzustands des Ausgangsmaterials klassifizieren [Berger et al., 2013]. Neben den exemplarisch benannten flüssig- und gasbasierten Fertigungsverfahren gibt es eine große



Bild 2: Prozesskette der Produktentstehung im AM (in Anlehnung an [Gebhardt, 2016; Lachmayer et al., 2016])

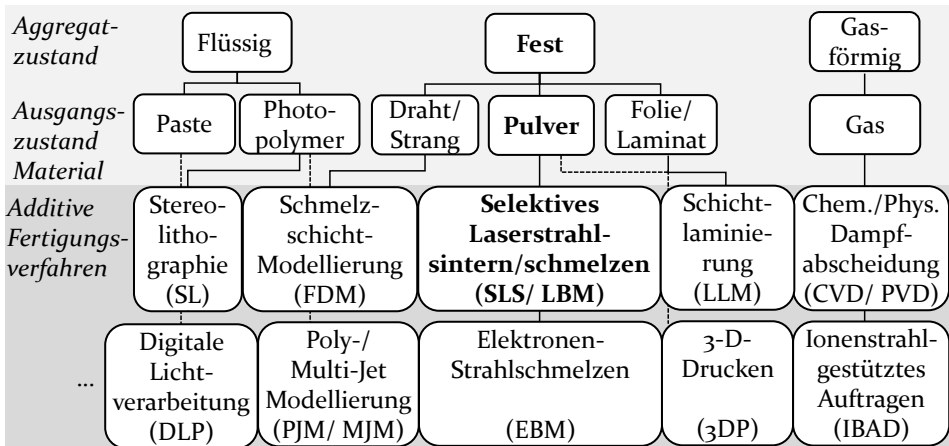


Bild 3: Übersicht und Klassifizierung gängiger AM Verfahren [in Anlehnung an Berger et al., 2013]

Bandbreite an polymeren, metallischen und keramischen Werkstoffen und Verbundwerkstoffen, die bei festkörperbasierten AM-Systemen zum Einsatz kommen [Bourell et al., 2017]. Im Fokus dieser Arbeit steht das industriell weit verbreitete pulverbettbasierte Fertigungsverfahren des selektiven Laserstrahlschmelzens bzw. -sinterns am Beispiel eines thermoplastischen Polymer, das im englischsprachigen Raum unter der Bezeichnung des LBM-P bekannt ist.

2.2 Prozesstechnische Grundlagen des selektiven Laserstrahlschmelzens

Beim selektiven Laserstrahlschmelzen (LBM) werden Bauteile aus vorzugsweise pulverförmigen, metallischen oder polymeren Werkstoffen mit Hilfe eines Lasers schichtweise verschmolzen. Abhängig davon, ob die Werkstoffverbindung durch ein vollständiges Aufschmelzen oder durch ein teilweises Anschmelzen der Pulverpartikel geschieht, wird vom Laserstrahlschmelzen oder dem eng verwandten Lasersintern gesprochen. Der Zusatz „selektiv“ weist dabei auf einen lokalen, ausgewählten Bereich des Energieeintrags des Lasers hin. Um ein additiv gefertigtes Bauteil mit guter Materialanbindung zu erhalten, muss beim LBM auf eine genaue Temperaturführung und Energieeinbringung des Lasers, entsprechend dem werkstoffspezifischen Prozessfenster, geachtet werden (vgl. Abschnitt 2.3.1). [VDI 3405: 2014-12; DIN EN ISO/ ASTM 52900: 2017-06]

Bevor ein Bauteil hergestellt werden kann, sind vorgeschaltete Operationen im *pre-Prozess* des LBM erforderlich. In der Datenvorbereitung wird

aus der Produktidee zunächst ein computergestütztes CAD-Bauteilmodell konstruiert. Das Volumenmodell wird anschließend durch *Polygonisierung* und *Triangulierung* in ein Facettenmodell überführt. Im Prozessschritt des *Slicens* erfolgt eine Zerlegung des Bauteilmodells in Einzelschichten [DIN EN ISO 17296-4: 2016-12]. Der erzeugte schichtweise Datensatz wird skaliert, um nachfolgende Volumenänderungen während der Bauteilkristallisation zu kompensieren. Anschließend wird der Bauteildatensatz im Bauraum positioniert und in die Fertigungsanlage eingelesen. [Raghunath et al., 2007; Berger et al., 2013; Wegner et al., 2013; Lachmayer et al., 2016]

Je nach Größe des Baujobs und des verwendeten Materials sind zusätzliche Stützgeometrien erforderlich. Dies ist jedoch beim betrachteten Laserstrahlschmelzen von Polymeren (LBM-P) nicht notwendig, da das unversinterte Pulverbett die additiv gefertigten Bauteile ausreichend stützt [Kaddar, 2010]. Eine Flutung des Bauraums mit einem Inertgas aus Stickstoff (N_2) oder Argon (Ar) unterbindet die Oxidation des Pulvers. Anschließend erfolgt die Materialbefüllung der Baukammer mit einer ca. 2 cm dicken Isolationschicht, die zur Reduktion des Wärmeaustausches der Schmelze mit der Umgebung bzw. der Bauplattform dient. Es folgt die Vorheizphase der Prozesskammer, wobei das zu verarbeitende Pulver mit Infrarot-Heizstrahler auf ca. $10\text{ }^\circ\text{C} - 15\text{ }^\circ\text{C}$ unterhalb der Schmelztemperatur ϑ_m erwärmt wird. Dadurch wird die zum Aufschmelzen notwendige Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ durch den Energieeintrag des Lasers reduziert [Kaddar, 2010; Laumer et al., 2014]. Eine homogene Temperierung des Pulverbettes über den gesamten additiven Fertigungsprozess ist essentiell, um ein eigenspannungsinduziertes Aufbiegen der Randbereiche (sog. *Curling*) der additiv gefertigten Bauteile zu unterbinden (vgl. Abschnitt 2.3.2) [Berger et al., 2013].

Der eigentliche *in-Prozess* des LBM beginnt mit der in Bild 4 dargestellten Bauphase, die durch einen Pulverauftrag ① eingeleitet wird. Hierbei kommen unterschiedliche Auftragssysteme wie Einzel- oder Doppelklingen (Rakel) und Rollen zum Einsatz, die das Pulver homogen auf der Bauplattform verteilen. Es folgt ein lokaler Energieeintrag des Lasers ② entsprechend des zu fertigenden Bauteilquerschnitts, wobei die Ablenkung des Laserstrahls durch ein elektromechanisch ansteuerbares Spiegelsystem im Galvanometer-Scanner realisiert wird. Eine F-Theta-Linse sorgt für die Korrektur der Fokussierung des Laserstrahls in die Baufläche. Beim LBM-P wird meist ein Laser mit einem aktiven Gasgemisch aus Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) und Helium (He) mit einer Wellenlänge λ von $10,6\text{ }\mu\text{m}$ verwendet, der mit einer Absorptionsrate A_r von ca. 90 % eine gute Einkopplung in das verwendete, polymerbasierte Pulver besitzt. [Schmid, 2015a; Eichler et al., 2015; Heinel et al., 2018b] Nach dem Aufschmelzen der Bauteilkontur durch den Laser erfolgt eine Absenkung der Bauplattform ③ in z-Richtung um eine Schichtdicke D_s . Die

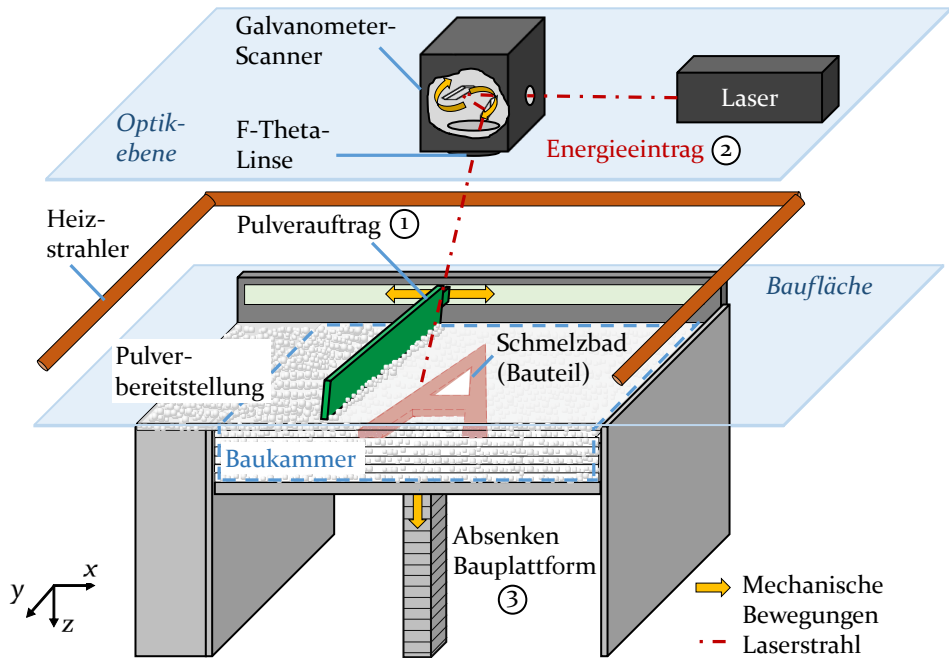


Bild 4: Fertigungsprozess des selektiven Laserstrahlschmelzens (LBM)

Pulverbettabsenkung ist vom jeweiligen Fertigungsprozess und der Pulvergrößenverteilung abhängig und liegt beim LBM-P-Prozess üblicherweise in der Größenordnung von $20\ \mu\text{m}$ bis $150\ \mu\text{m}$ [Lachmayer et al., 2016]. Der komplette Bauprozess durchläuft iterativ die drei Bauphasen, bis jeder Querschnitt des Bauteilmodells additiv gefertigt worden ist. [DIN EN ISO/ ASTM 52900: 2017-06] Erst nach einer mehrstündigen Abkühlphase, durch die eine kontrollierte Materialkonsolidierung gewährleistet wird, werden die gefertigten Bauteile samt des sogenannten „Pulverkuchens“ aus der Fertigungsanlage entnommen [Schmid, 2015a; Josupeit, 2016].

Nach [VDI 3405: 2014-12] erfolgt mit dem Entpacken aus dem Bauraum der Übergang zum *post-Prozess*. Dabei werden zunächst die überflüssigen Pulverrückstände vom auskristallisierten Bauteil entfernt. Das ungesinterte Pulver wird separiert, aufbereitet und anschließend einem neuen Baujob beigemischt. Der Neupulveranteil sollte dabei eine Auffrischrquote von 30 % – 50 % aufweisen, um eine gute Pulverqualität zu erreichen und gleichzeitig Alterungseffekten durch einen radikalisch induzierten Kettenabbau des Pulvers vorzubeugen [Wegner, 2016; Wudy et al., 2016]. Entsprechend der geometrischen Produktspezifikation kommen abhängig vom verwendeten Material und Fertigungsverfahren verschiedene Nachbearbeitungsverfahren zum Einsatz. Neben abrasiven Verfahren wie dem Sandstrahlen oder Gleitschleifen

(Trowalisieren), können auch chemische Oberflächenbehandlungen oder Beschichtungen (z. B. durch Galvanisieren) zur Einstellung der physikalischen Eigenschaften herangezogen werden [VDI 3405: 2014-12; Kruth et al., 2010]. Allerdings sollten zeit- und kostenintensive Nachbearbeitungsschritte im AM zugunsten einer wirtschaftlichen Serienfertigung reduziert werden. Hierfür erforderlich ist eine endkonturnahe Fertigung der additiven Bauteile mit hohen funktionellen Integrationstiefen.

2.3 Material- und fertigungsbedingte Einflussgrößen auf die extrahierte Bauteilgeometrie

Um vorgegebenen Qualitätsanforderungen zu entsprechen, ist analog zu traditionell hergestellten Werkstücken auch bei additiv gefertigten Bauteilen auf die Einhaltung geometrischer Produktspezifikationen (GPS) zu achten. Diese werden im frühen Produktentwicklungsprozess durch den Konstrukteur festgelegt und entstehen aus Funktionsanforderungen an die Werkstücke. Spezifikationsgrenzen geben dabei zulässige Abweichungen der Geometriemerkmale entsprechend der definierten Toleranzzonen an [DIN EN ISO 17450-1: 2012-04]. Die geforderten Toleranzen werden in der technischen Zeichnung ausgewiesen und durch die Angabe der jeweiligen Normenkette nach [DIN EN ISO 14638: 2015-12] oder zulässiger Messabweichungen der Prüfgeräte ergänzt [DIN EN ISO 14253-1: 2018-07]. Entsprechend des Prüfplans ist die Einhaltung der festgelegten Produktspezifikation durch einen Abgleich der Messergebnisse mit den Bauteilmerkmalen unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten zu ermitteln [DIN EN ISO 17450-1: 2012-04; ISO/IEC Guide 98-3: 2008].

Bei der Auswertung der Messdaten ist weiterhin zu beachten, dass die schichtweise erfasste Kontur des Schmelzbades aufgrund zahlreicher material- und fertigungsbedingter Einflüsse nicht unmittelbar mit der finalen Bauteilgeometrie übereinstimmt. Die gemessene geometrische Gesamtabweichung des gefertigten Bauteils μ_{post} kann somit nicht direkt mit der im Fertigungsprozess ermittelten Abweichung μ_{prozess} gleichgesetzt werden. In Gleichung 2.3.1 gehen nach *Caltanissetta et al.* zusätzliche inhomogene Fertigungseinflüsse als Fertigungs- oder Messabweichungen (τ , β , $\hat{\varepsilon}$) in die ermittelte Gesamtabweichung μ_{post} ein. [Caltanissetta et al., 2018]

$$\mu_{\text{post}} = \mu_{\text{prozess}} + \tau + \beta + \hat{\varepsilon} \quad (2.3.1)$$

Die temperaturbedingte Volumenkontraktion wird in Form eines schwindungsbedingten, materialabhängigen Baufaktors τ berücksichtigt. Abweichend zur vorliegenden Definition, in der eine Addition der geometrischen

Übermaße in den verschiedenen Raumrichtungen erfolgt, wird der schwindungsbedingte Baufaktor oft auch als prozentualer Faktor zur Ausgangsgeometrie aufgeschlagen. Beim Einflussfaktor Bauteil β handelt es sich um eine weitere Fertigungsabweichung, in die die Positionierung der Bauteile im Bauraum sowie thermisch-bedingte Wechselwirkungen zwischen benachbarten Schmelzbädern und der Prozesskammer eingehen. Zusätzliche umgebungsbedingte Störgrößen, aber auch Fehlerterme wie Messabweichungen entlang des Fertigungs- und Messkreises, die eine Diskrepanz der in-Prozess-Messdaten mit den tatsächlich vorliegenden Bauteilabmaßen bedingen, werden im Fehlerterm $\hat{\varepsilon}$ berücksichtigt.

Da die Ursachen der Nichtkonformität mit der geforderten GPS sehr vielseitig sein können, werden im Folgenden nur die wesentlichen material-, fertigungs- und messbedingten Einflussgrößen vorgestellt, die im Rahmen der Bauteilcharakterisierung im AM standardmäßig herangezogen werden.

2.3.1 Material und Prozessfenster

Der werkstoffspezifische Einfluss auf die Bauteilgeometrie hängt von verschiedenen Materialkenngrößen, wie der Partikelgrößenverteilung bis hin zum thermisch-bedingten Schmelz- und Kristallisationsverhalten der verwendeten AM-Pulver ab. Unterschiedliche metallische, polymere und keramische Ausgangswerkstoffe weisen diesbezüglich diverse Werkstoffcharakteristika auf. Für eine gezielte Beeinflussung der Materialeigenschaften bei einer gleichzeitig guten Verarbeitbarkeit im Fertigungsprozess kommen jedoch nur ausgewählte AM-Werkstoffe in Betracht. Beim pulverbettbasierten LBM-Prozess werden derzeit neben metallischen Ausgangswerkstoffen wie Edelstählen, Aluminium-, Nickel-, Kobalt- und Titanlegierungen verstärkt auch Polymere wie Polyamide (PA), thermoplastische Elastomere (TPE-A, TPU), Polyurethane (PU), Polypropylen (PP) oder Polyetheretherketone (PEEK) verarbeitet. [Gebhardt, 2013; Schmid, 2015a]

Trotz der Vielzahl an kommerziell verfügbaren polymerbasierten Pulvern wird in 90 % aller LBM-P-Anwendungen auf das Standardmaterial Polyamid 12 (PA12) zurückgegriffen [Schmid, 2015a]. Dieser teilkristalline Thermoplast zeichnet sich durch besonders gute Materialeigenschaften bezüglich der Verarbeitbarkeit im LBM-Prozess aus und wird durch Polykondensation bzw. -addition hergestellt. Neben Fällungsverfahren wie der radikalischen Polymerisation oder der chemischen Veresterung kann PA12-Pulver auch durch Stufenwachstumsreaktionen mehrerer Carboxyl- ($-\text{COOH}$) mit Amingruppen ($-\text{NH}_2$) synthetisiert werden. Dabei werden Amide ($-\text{NHCO}-$) gebildet, die sich über Wasserstoffbrückenbindungen zu Polymerketten verbinden. Namensgebend für das exemplarisch betrachtete Polyamid PA12-Pulver der

Firma EOS mit der industriellen Bezeichnung PA2200 sind charakteristische Monomere mit insgesamt zwölf Kohlenstoffatomen [Schmid, 2015a]. Die werkstoffspezifischen Vorzüge des PA12 werden in Bild 5 in Form des Prozessfensters deutlich. Dieses liegt zwischen dem *Onset* der Schmelztemperatur ϑ_m beim Aufheizen und dem *Onset* der Kristallisationstemperatur ϑ_c beim Abkühlvorgang. Bei der Prozessführung von PA12 ist dieser metastabile Verarbeitungsbereich durch eine Vorheiztemperatur auf ca. 168 °C – 172 °C reproduzierbar einzustellen. Dadurch kann die kristalline Struktur durch eine kurzzeitige Energiezufuhr durch den Laser aufgebrochen und zum Aufschmelzen gebracht werden [Lanzl et al., 2016]. Lokale Temperaturspitzen von über 300 °C im Pulverbett durch eine zu langen Verweilzeit des Lasers sollten vermieden werden, um eine Zersetzung des Werkstoffs zu unterbinden. Da der Phasenübergang von der flüssigen Schmelze zum auskristallisierten, festen Zustand mit schrumpfungsbedingten Volumenänderungen einhergeht (vgl. Abschnitt 2.3.2), sollte bei der Prozessführung auf eine geregelte, langsame Abkühlphase geachtet werden [Schmid, 2015a].

Neben thermischen Materialkenngrößen wie der Schmelztemperatur ϑ_m und der Kristallisationstemperatur ϑ_c , die standardmäßig anhand einer dynamischen Differenz-Thermoanalyse (DSC) ermittelt werden, üben nach [VDI 3405-1: 2019-01] weitere Werkstoffeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteilgeometrie aus [Schmid, 2015a]. Eine Auswahl dieser werkstoffspezifischen Kenngrößen für PA12 wird in Tabelle 1 auf Grundlage von Materialdatenblättern des Herstellers sowie vergleichenden Analysen im Rahmen des SFB 814 aufgeführt [Lanzl et al., 2016; Wudy, 2017; EOS, 2019].

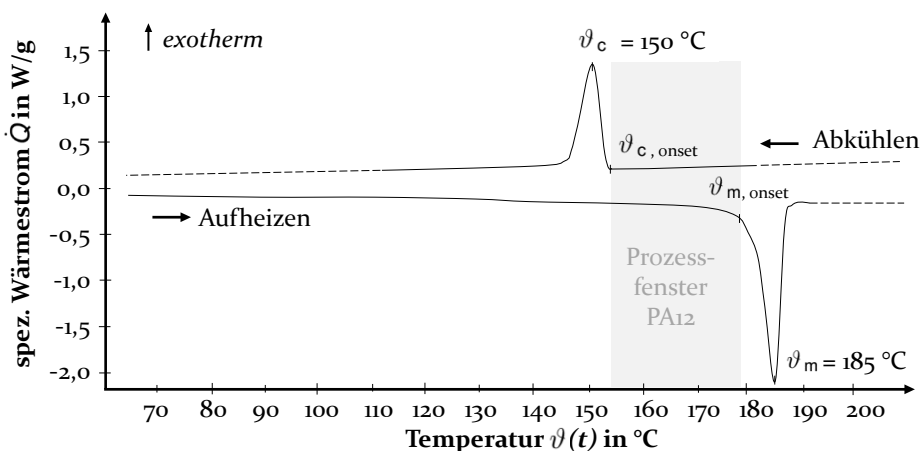


Bild 5: Idealisierte DSC-Messkurve zur Darstellung des Prozessfensters von PA12 (in Anlehnung an [Wudy, 2017])

Tabelle 1: Materialkennwerte PA12

Kenngröße	Messwert	Norm des Messverfahrens
Schmelztemperatur ϑ_m	185 °C	DIN EN ISO 11357-1: 2017-02
Kristallisationstemperatur ϑ_c	147 °C – 150 °C	DIN EN ISO 11357-1: 2017-02
Viskositätszahl η	57 ml/g	DIN EN ISO 307: 2013-08
Pulver-Schüttdichte ρ_∞	0,45 g/cm ³	DIN EN ISO 60: 2000-01
Pulver-Stampfdichte ρ_o	0,51 g/cm ³	DIN EN ISO 787-11: 1995-10
vol. Partikelgrößenverteilung $d_{10,3}, d_{50,3}, d_{90,3}$	46 µm, 62 µm, 83 µm	DIN ISO 14887: 2010-03

Abgesehen von den thermischen Größen sind weitere intrinsische Kennwerte für die Verarbeitbarkeit des Werkstoffs relevant. Die rheologische Viskosität η charakterisiert die Zähflüssigkeit des Werkstoffs, die für eine gute Materialanbindung der Pulverpartikel im schmelzförmigen Zustand maßgeblich ist. Im Kontext der Materialhandhabung sind auch extrinsische Werkstoffeigenschaften bedeutend, die Auswirkungen auf das Ausgangsmaterial und den Pulverauftrag haben. Dazu zählt die Fließfähigkeit des Pulvers, die über den Hausnerfaktor H_R beurteilt wird. Dieser wird aus dem Quotient der Stampfdichte ρ_o zur Schüttdichte ρ_∞ des Pulvers berechnet und lässt bei PA12 mit einem Wert von 1,13 (< 1,25) auf ein gutes Fließverhalten schließen [Schmid, 2015a; Wudy, 2017]. Aus der Analyse der volumetrischen Partikelgrößenverteilung $d_{x,3}$ geht weiterhin hervor, dass beim verwendeten PA12-Pulver eine schmale Verteilung um eine mittlere Pulverkorngröße von ca. 62 µm vorliegt. Diese ist neben der Packungsdichte maßgeblich für die minimal zu realisierende Schichtdicke D_s im Fertigungsprozess [Wegner, 2015].

2.3.2 Schwindung und Verzug

Im Rahmen der Wärmebehandlung können bei zu schneller Abkühlung und Kristallisation der Schmelze Schrumpfungseffekte der additiv gefertigten Bauteile einsetzen, die geometrische Abweichungen von der Idealgeometrie zur Folge haben. Prinzipiell wird hierbei zwischen einem Verzug des Bauteils während des Bauprozesses und einer temperaturbedingten Schwindung des Materials nach dem Bauprozess unterschieden. Schwindungseffekte werden

durch einen Wärmetransport mit kombinierter Kontraktion bei der Erstarrung hervorgerufen. Die für den temperaturbedingten Verzug ursächliche Kristallisation setzt unmittelbar nach dem partiellen Aufschmelzen des pulverförmigen Werkstoffs ein. Durch die kurzfristige Energiezufuhr des Lasers bilden sich dabei Kristallisationskeime im inhomogenen Schmelzbad. Ist das Temperaturgefälle $\Delta\vartheta$ beim Energieeintrag in das unzureichend temperierte Pulverbett zu groß, tritt ein spannungsinduzierter Bauteilverzug auf. Dieser wird auch als *Curling* bezeichnet. Ein unregelmäßiges Kristallisationsverhalten einzelner Bereiche der obersten aufgeschmolzenen Pulverschicht führt dabei zu einem Aufbiegen der Bauteilränder, was einen Fertigungsabbruch durch auftragsbedingte Bauteilverschiebungen verursachen kann. Durch eine geeignete Temperierung in der Vorheizphase und der anschließenden Abkühlphase mit Abkühlraten von wenigen Grad Celsius pro Minute ist es dennoch möglich, die Kristallisation kontrolliert zu unterdrücken. Allerdings kann die Keimbildung beim Kristallwachstum auch bei optimaler Prozessführung aufgrund der komplexen Kristallisationskinetik im metastabilen Phasenübergang nur bedingt beeinflusst werden. [Nakamura et al., 1972; Schmid, 2015a]

Bei PA12 kommt es zudem zu einer Verfestigung der vorwiegend teilkristallinen Bereiche. Dabei entstehen sphärolithische Kristallstrukturen kleinen spezifischen Volumens mit hohen Dichten ρ . Diese Kristallumstrukturierung bedingt ein Schrumpfen des Bauteilvolumens in der Größenordnung von 3 % – 5 % [Keller, 1999; Ehrenstein et al., 2004]. Wärmeverluste an den Rändern des Bauraums führen weiterhin zu zeitlich unregelmäßigen Kristallisationseffekten, verbunden mit einer inhomogenen Volumenkontraktion in den verschiedenen Baurichtungen [Witt et al., 2015; Shen et al., 2000]. Um diese Volumenschwindung zu kompensieren, die den materialabhängigen Baufaktor τ aus Gleichung 2.3.1 maßgeblich charakterisieren, werden standardmäßig laterale und vertikale Skalierungsfaktoren des Baudatensatzes in der Größenordnung von bis zu 4 % vorgesehen [Raghunath et al., 2007]. Nach Untersuchungen von Witt et al. kann neben der Temperaturführung auch die Positionierung der Bauteile im Bauraum Einfluss auf die Werkstückgeometrie nehmen, die in den Einflussfaktor Bauteil β eingehen. Aufgrund einer gegenseitigen temperaturbedingten Beeinflussung zwischen den gefertigten AM-Bauteilen und der Umgebung können weitere Bauteilverzüge nach dem Bauprozess auftreten. Dieses sogenannte *Warpage* kann Ebenheitsabweichungen zur Folge haben, die in der Größenordnung von ca. 0,2 mm – 0,5 mm einzuordnen sind. [Witt et al., 2015]

Um diese und weitere im folgenden Abschnitt behandelten fertigungsbedingten Einflussgrößen besser beherrschen zu können, wird verstärkt auf simulations- und messbasierte Ansätze zurückgegriffen. Diese beruhen

wie bei *Bayerlein et al.* beispielsweise auf einer Vorverformung der CAD-Datensätze zur Kompensation geometrischer Abweichungen [Bayerlein et al., 2016].

2.3.3 Fertigungsparameter

Abgesehen von den bereits betrachteten Einflussgrößen der Temperaturführung und den materialspezifischen Kenngrößen wird die Gestalt additiv gefertigter Bauteile von zahlreichen weiteren Fertigungsparametern beeinflusst. Nach [VDI 3405-1: 2019-01] sind die Interaktionen der Fertigungsparameter komplex und stark abhängig vom Fertigungsverfahren und dem Anlagentyp. Auch nach der Eingrenzung auf einen LBM-P-Prozess einer EOSINT P380-Fertigungsanlage sind deshalb nur allgemeingültige Aussagen über die prozessbedingten Wirkzusammenhänge mit der Geometrie möglich. In diversen Veröffentlichungen wird daher zunächst ein allgemeiner Überblick der Prozessparameter und eine Klassifizierung entsprechend der technischen Beeinflussbarkeit vorgenommen, bevor eine genauere Analyse der jeweiligen anlagenspezifischen Kennwerte erfolgt [Craeghs et al., 2011; Wegner, 2015]. Neben vorgegebenen, nicht direkt beeinflussbaren Randbedingungen wie der spezifischen Wellenlänge λ des Lasers, die aufgrund des verwendeten Lasertyps anlagentechnisch mit $10,6 \mu\text{m}$ vorgegeben ist, soll der Fokus in diesem Abschnitt verstärkt auf kontrollierbare Fertigungsparameter gelegt werden. Zu den wesentlichen steuerbaren Eingangsgrößen des schichtweisen Fertigungsprozesses zählen der Energieeintrag, die Verweilzeit zwischen dem Aufschmelzvorgang sowie die Belichtungsstrategie des Lasers.

Die eingebrachte Flächenenergiedichte E_A des Lasers in das Pulver ist nach Gleichung 2.3.2 direkt abhängig von der Laserleistung P , der Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls v_s sowie dem Hatchabstand h_s der überlappenden Laserlinien. Zur Beschreibung des volumetrischen Energieeintrags E_V in die Pulverschicht ist nach Gleichung 2.3.3 zusätzlich die Schichtdicke D_s zu berücksichtigen. [Wegner, 2015; Kaddar, 2010; Witt et al., 2015]

$$E_A = \frac{P}{v_s \cdot h_s} \quad (2.3.2)$$

$$E_V = \frac{P}{v_s \cdot h_s \cdot D_s} \quad (2.3.3)$$

Für eine gute Schichtanbindung des PA12-Werkstoffes ist ein Energieeintrag E_V zwischen $0,3 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} - 0,4 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ zu empfehlen [Witt et al., 2015; Wegner, 2015]. Mit den zugehörigen Parametersätzen resultieren gute mechanische Eigenschaften mit Bauteildichten ρ von ca. $0,98 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und Zugfestigkeiten R_m

bis ca. $50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ [Wegner, 2015]. Schwankungen der Laserleistung können zu einem ungleichmäßigen Energieeintrag in die Pulverschicht führen und beeinflussen nicht nur die Schichtanbindung, sondern führen bei einer Überschreitung der maximalen Flächenenergiedichte E_A von ca. $0,05 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$ zu lokalen Materialzersetzungen des PA12-Werkstoffes [Caulfield et al., 2007; Kaddar, 2010]. Eine zu geringe Flächenenergiedichte unter $0,015 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$ kann dagegen eine erhöhte Porosität ($> 5\%$) bewirken, die sich wiederum nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt [Dupin et al., 2012]. Insgesamt wird eine Laserleistung P im Bauraum zwischen $18 \text{ W} - 25 \text{ W}$ bei der Verarbeitung von PA12 empfohlen [R.-J. Wang et al., 2007]. Weiterhin relevant für den Energieeintrag in das Material ist die Fokussierung des Laserstrahls, wobei eine Reduzierung der Spotgröße zu einer Erhöhung der flächenbezogenen Laserintensität führt und dadurch höhere Belichtungsgeschwindigkeiten v_s ermöglicht. Kommerzielle LBM-P-Fertigungsanlagen weisen Spotgrößen von $0,3 \text{ mm} - 0,7 \text{ mm}$ und maximale Ablenkgeschwindigkeiten des Laserstrahls von mehreren tausend Millimetern pro Sekunde auf [Kaddar, 2010; Goodridge et al., 2012]. Mit verkürzten Bauzeiten durch hohe Belichtungsgeschwindigkeiten des Lasers gehen allerdings auch zunehmende Schwindungseffekte einher [R.-J. Wang et al., 2007].

Eine weitere Stellgröße zur Beeinflussung des Energieeintrags ist der Scanlinien- oder Hatchabstand h_s , der die Überlappung benachbarter Laserlinien beschreibt. Dieser wird üblicherweise mit einem Mittelpunktabstand von $0,1 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm}$ eingestellt [Kaddar, 2010; Berger et al., 2013]. Eine Verkleinerung des Scanlinienabstands bedingt eine Erhöhung des Energieeintrags und ein abnehmendes Schwindungsverhalten [R.-J. Wang et al., 2007; Zur Jacobsmühlen et al., 2013].

Für die Eindringtiefe des Lasers ist zudem die Schichtdicke D_s relevant, die bei PA12 aufgrund der Partikelgrößenverteilung $d_{x,3}$ üblicherweise $100 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$ beträgt [Goodridge et al., 2012]. Je größer die Schichtdicke gewählt wird, desto geringer fällt der Schrumpfungseffekt aus. Allerdings ist für eine zunehmende Schichtdicke auch eine höhere Volumenenergiedichte E_V des Lasers erforderlich, um eine ausreichende Schichtanbindung zu realisieren [R.-J. Wang et al., 2007; Kaddar, 2010].

Einen weiteren Einfluss auf die Ausbildung und Temperaturverteilung des Schmelzbades hat die Belichtungsstrategie des Lasers. Jeder schichtweise Energieeintrag beginnt mit einer Belichtung der Außenkontur, gefolgt von einem Füllen der Innenkontur, die je nach verwendeter Belichtungsstrategie variieren kann. Bei der standardmäßigen parallelen Belichtungsstrategie wird der Laser mit einem definierten, konstanten Linienabstand kaskaden- oder

mäanderförmig über das Pulverbett geführt. Als Erweiterung dazu ermöglicht eine alternierende Kreuzstrategie einen isotropen Energieeintrag durch eine schichtweise Drehung der Laserrichtung um 90° , wodurch auch der Schwindungseinfluss reduziert wird. [R.-J. Wang et al., 2007; Kaddar, 2010]

Zusätzlich spielt die Verweilzeit zwischen den schichtweisen Belichtungen durch den Laser für die zeitlich variierende Temperaturverteilung des Schmelzbades und die anschließende Kristallisation eine Rolle [Schmid, 2015a; Wegner, 2015]. Bei einer Energieeinkopplung in das Schmelzbad unter einer Sekunde ist der Schwindungseinfluss am größten. Grund hierfür ist ein zu großer temporärer Temperaturunterschied $\Delta\vartheta$ zur benachbarten Pulverschicht, der mit zunehmender Intervalldauer abnimmt. Je länger die Verweilzeit durch querschnittsabhängige, zeitliche Unterschiede beim Energieeintrag und die pulverauftragsbedingten Zwischenzeiten ausfällt, desto homogener und schwindungsärmer erfolgt die Kristallisation und umso schlechter wird allerdings auch die Schichtanbindung. [R.-J. Wang et al., 2007]

Neben den genannten Fertigungsparametern werden gestaltabweichungsfreie, additiv gefertigte Bauteile hoher Bauteildichten von weiteren Faktoren wie der Form und Geschwindigkeit des Pulverauftragsystems v_{Rakel} oder der Bauteilgeometrie und deren Positionierung im Bauraum β beeinflusst. Da der Einfluss dieser Kenngrößen auf die Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen bereits in verschiedenen Veröffentlichungen ausführlich diskutiert wurde, erfolgt an dieser Stelle lediglich ein Verweis auf die entsprechenden Literaturquellen [Senthilkumaran et al., 2012; Drummer et al., 2015; Wegner, 2015].

Insgesamt kann eine fehlerhafte Prozessführung und dadurch fertigungsbedingte Parameterschwankungen zu Abweichungen μ_{Prozess} führen, die die finale Bauteilgestalt der additiv gefertigten Bauteile charakterisieren. Um die einzelnen Entstehungsursachen der auftretenden Fertigungsabweichungen näher zu spezifizieren, ist eine umfassende prozessbegleitende Fertigungsüberwachung erforderlich (vgl. Abschnitt 2.4).

2.3.4 Geometrische Abweichungen des Fertigungs- und Messkreises

Geometrische Abweichungen können nicht nur durch inhomogene Fertigungsparameter entstehen, sondern resultieren auch aufgrund variierender Umgebungseinflüsse entlang des Fertigungs- und Messkreises. Sie werden maßgeblich durch temperaturbedingte Dehnungen des Anlagenrahmens oder mechanischen Belastungen und Schwingungen während des Bauprozesses hervorgerufen [Cooke et al., 2011]. Der in Bild 6 schematisch darge-

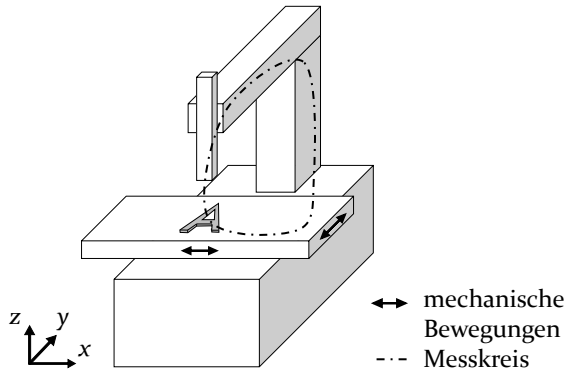


Bild 6: Schematischer Messkreis (nach [DIN EN ISO 25178-600: 2019-12])

stellte Messkreis beschreibt dabei eine „geschlossene Kette, die alle Komponenten umfasst, die das Werkstück und den Sensor miteinander verbinden“ [DIN EN ISO 25178-600: 2019-12].

Der Fertigungskreis beinhaltet dagegen alle anlagenspezifischen Komponenten, die für die Werkstückfertigung relevant sind. Beim betrachteten LBM-Prozess besteht der Fertigungskreis aus dem Fertigungslaser, der Strahlführung, dem Galvanometer-Scanner, dem Pulverbett, der absenkbaaren Bauplattform mit Hubtisch, dem Pulverbettkasten sowie dem kompletten Anlagerahmen. Nach der linearen Ausdehnungsgleichung 2.3.4 sind nach [DIN EN ISO 14253-2: 2018-09] je nach geometrischer Ausführung und Fixierung der einzelnen Komponenten entlang des Fertigungskreises temperaturbedingte Längenänderungen ΔL der Haltevorrichtungen möglich.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\vartheta \quad (2.3.4)$$

Bei einem Stativ aus austenitischem Stahl mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{\text{aust.Stahl}}$ von $21 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ resultieren beispielsweise Längendehnungen ΔL von bis zu $10,5 \mu\text{m}$ bei einer Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ von 1 K und einer Ausgangslänge des Profilträgers L_0 von 0,5 m [Hartmann et al., 2012]. Hinzu kommt der Einfluss mechanischer Schwingungen durch die Kopplung der Stative mit der Prozesskammer, die beispielsweise durch das Pulverauftragssystem übertragen werden [Zur Jacobsmühlen et al., 2014]. Die resultierenden Verschiebungen der Haltevorrichtungen wirken sich auch auf den Galvanometer-Scanner und die Führung der Laserbahn aus und verursachen fertigungsbedingte Ungenauigkeiten beim lokalen Energieeintrag. Für den Messkreis sind auch laterale Versätze und Winkel-Driften des Kamerasystems relativ zum Pulverbett relevant, die zu Messabweichungen führen und in den Fehlerterm $\hat{\varepsilon}$ aus Gleichung 2.3.1 eingehen [Cooke et al., 2011].

2.4 Prozessüberwachung und Bauteilprüfung in der additiven Fertigung

Unabhängig davon ob geometrische Abweichungen der pulverbettbasierten additiven Fertigung material-, temperatur- oder fertigungstechnischer Natur sind, ist eine frühzeitige Erfassung und anschließende Zuordnung der Entstehungsursache für eine nachhaltige Qualitätssicherung und Prozessregelung notwendig. Zur Beurteilung geforderter Qualitätsmerkmale wie der Maßhaltigkeit, den geringen Form- und Lageabweichungen, der Oberflächengüte sowie mechanischer und thermischer Bauteilcharakteristika, die Einfluss auf die geometrischen Produktspezifikationen nehmen, werden unterschiedliche Ansätze der Qualitätskontrolle verfolgt. Eine ganzheitliche, teilweise zerstörende Prüfung aller Bauteileigenschaften ist wirtschaftlich unrentabel. Daher erfolgen aktuelle Qualitätsbeurteilungen meist anhand sogenannter Rückstellmuster, die in regelmäßigen Zeitintervallen prozessbegleitend gefertigt und überwacht werden. Allerdings ermöglichen diese zusätzlich hergestellten Prüfkörper aufgrund der lokalen und zeitlich versetzten Stichprobenprüfung nur indirekte Rückschlüsse auf die geometrischen Spezifikationen und verursachen neben Materialkosten auch einen erhöhten Prüfaufwand. Aktuelle Ansätze der Qualitätssicherung zielen deshalb auf eine prozessbegleitende Fertigungsüberwachung ab. Neben eingestellten, anlagentechnisch aufgezeichneten Soll-Prozesskenngrößen kommen verschiedene Messsysteme zur Erfassung und Beurteilung des tatsächlichen Ist-Zustandes der Fertigungsanlage zum Einsatz. [VDI 3405: 2014-12; VDI 3405-1: 2019-01]

Die Messtechnik sollte über alle Phasen des Fertigungsprozesses einen hohen Integrationsgrad aufweisen, um auftretende Fertigungsabweichungen frühzeitig zu erfassen und eine zeitnahe Prozessregelung zu gewährleisten. Nach Bild 7 beginnt eine umfassende Prozesskontrolle bereits im *pre-Prozess*. In dieser Phase werden von der Fertigungslinie entkoppelte Messsysteme zur Analyse der Pulverqualität und resultierenden Materialeigenschaften eingesetzt. Daneben kommen softwareunterstützte Werkzeuge zur Beurteilung der Modellqualität des Datensatzes sowie fertigungsnahe Sensoren zur Regelung der Vorheizung des Bauraums zum Einsatz. [VDI 3405: 2014-12]

Prozessbegleitende Messverfahren nach Abschnitt 2.4.2, zu denen auch die *in situ*-Überwachung zählt, weisen im Vergleich zu den *pre-Prozess*-Messtechniken ein höheres Potential für eine fertigungsnahe und -integrierte Messdatenerfassung und anschließende Prozessregelung auf. Die *in situ*-Messungen finden in den Prozessnebenzeiten statt, also unmittelbar nach dem Pulverauftrag, der Belichtung durch den Laser oder der Pulverbettabsenkung. Die Messdaten werden schichtweise ausgewertet und bilden die

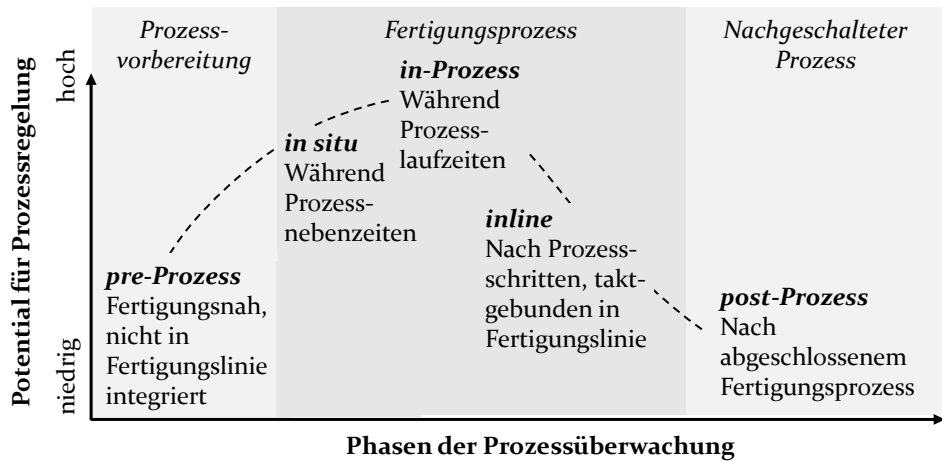


Bild 7: Phasen der Prozessüberwachung und Einfluss auf Prozessregelung (in Anlehnung an [R. Schmitt et al., 2008; Loderer, 2017])

Grundlage für die Korrektur der Fertigungsabweichungen der nächsten zu fertigenden Schicht. Durch die Echtzeitüberwachung im *in-Prozess* kann zusätzlich eine kontinuierliche Aufzeichnung beispielsweise von Temperaturmessdaten oder getrackten Positionen der Schmelzbahn des Lasers erfolgen. Die Auswertung der Messdaten mit einem vergleichsweise großen Informationsgehalt geht jedoch mit einem hohen analytischen Aufwand einher. [VDI 3405: 2014-12; Loderer, 2017]

Die *inline*-Prüftechnik ermöglicht eine kontinuierliche, taktgebundene Fertigungsüberwachung im Anschluss einzelner Prozessschritte. Die Einsatzgebiete beschränken sich jedoch meist auf Qualitätskontrollen von Serienfertigungsverfahren, beispielsweise zur Überwachung einzelner Fertigungsstationen oder Fertigungslinien entlang einer Fließbandproduktion. Da der betrachtete, schichtweise additive LBM-Prozess bis auf den pre- und post-Prozess innerhalb einer AM-Fertigungsanlage abläuft und keine kontinuierliche Überwachung der vom Pulver eingeschlossenen Bauteile gegeben ist, kann im Kontext des AM nicht von einer *inline*-Überwachung gesprochen werden. [R. Schmitt et al., 2008; Loderer, 2017]

Die Endabnahme und finale Qualitätsüberwachung additiv gefertigter Bauteile erfolgt, wie in Abschnitt 2.4.3 dargestellt, im *post-Prozess* im Nachgang an den eigentlichen Fertigungsprozess. Diese umfasst überwiegend Prüfverfahren zur Charakterisierung der Geometrie, Bauteildichte und -porosität sowie der mechanischen Eigenschaften. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über Fertigungsabweichungen können allerdings nur noch durch eine Nachbearbeitung der bereits gefertigten Bauteile korrigiert und für den nächsten

additiven Fertigungsprozess berücksichtigt werden. Dies gewährleistet lediglich eine indirekte Prozessregelung. [VDI 3405: 2014-12; VDI 3405-1: 2019-01]

Der aktuelle Trend industrieller Anwendungen im AM zielt auf eine Kombination aus *in situ*- und *in-Prozess*-Messtechniken mit hohen Integrations-tiefen ab. In den vergangenen Jahren ist bereits ein immer kleiner werdender Anteil an Qualitätsprüfverfahren zur *pre*- und *post-Prozess*-Überwachungen zu verzeichnen [Wohlers et al., 2019]. Zur ganzheitlichen Qualitätssicherung bedarf es allerdings noch einer standardisierten Vorgehensweise zur systematischen Erfassung und Dokumentation von Fertigungsparametern. Weiterhin fehlt bislang ein einheitliches Vorgehen bei der statistischen Prozesskontrolle in Verbindung mit einer Regelkreissteuerung. [Goodridge et al., 2012; VDI 3405-1: 2019-01]

Einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung dieses Vorhabens liefert das technische Komitee ISO/TC 213. Es verfolgt das Ziel Werkzeuge für einen *Top-Down*-Ansatz zur geometrischen Produktspezifikation und -verifikation bereitzustellen [DIN EN ISO 17450-1: 2012-04]. Die Grundlage der globalen Prozessüberwachung geometrie-beeinflussender Kenngrößen bilden dabei verschiedene Messtechniken, die im Folgenden anhand einzelner wissenschaftlich und industriell realisierter Lösungsansätze näher vorgestellt werden.

2.4.1 Pre-Prozess

Die *pre-Prozess*-Überwachung sollte nach [VDI 3405: 2014-12] den kompletten Datenfluss abdecken, der für eine reibungslose Durchführung des Fertigungsprozesses essentiell ist. Neben der Datenerfassung während der Pulverherstellung, Pulveraufbereitung und Materialcharakterisierung ist auch die Bauteilmodellierung und Bereitstellung der Rohdaten zu berücksichtigen. Die temperaturgesteuerte Aufheizphase des Bauraums bildet den Übergang zur prozessgesteuerten Fertigungsüberwachung. Aufgrund der geringen Integrationstiefe der verwendeten Sensoren und wenig aussagekräftiger Erkenntnisse über die Korrelation der erfassten Parameter mit geometrischen Produktspezifikationen kann durch die *pre-Prozess*-Überwachung jedoch bislang kein signifikanter Beitrag für eine Prozessregelung erbracht werden [Mani et al., 2016].

2.4.1.1 Pulvercharakterisierung

Zwar liefert die *pre-Prozess*-Überwachung nur einen bedingten Mehrwert für die Prozessregelung, sie ist dennoch zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der verwendeten Materialien im LBM-Prozess essentiell. Für eine gute Quali-

tät beim Pulverauftrag kommt es nicht nur darauf an die exakten Mischungsverhältnisse der Zusatz- oder Legierungselemente zu bestimmen, sondern auch eine gute Fließfähigkeit des Pulvers zu gewährleisten. Neben der in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Materialcharakterisierung und der Verfahren der Werkstoffanalyse gewinnt dabei die Pulveraufbereitung zunehmend an Bedeutung. Die Fließfähigkeit der Pulverpartikel kann durch geeignete Mahl- bzw. Zerkleinerungsprozesse beeinflusst werden, die eine gezielte Einstellung der Partikelform und -größenverteilung ermöglichen. Einen neuartigen Ansatz zur Pulveraufbereitung und Verrundung von Polymerpartikeln am Beispiel eines semi-kristallinen PBT-Pulvers zeigen *Schmidt et al.* auf [Schmidt et al., 2016]. Die Partikelgrößenverteilung wird zunächst durch eine Kaltnasszerkleinerung verringert. Anschließend wird das vorbereitete Pulver in ein sektionsweise beheiztes Edelstrahlrohr, den sogenannten *Downer Reaktor*, gegeben. Es folgt ein massendurchflussgesteuertes, überwachtes Eindüsen der Pulverpartikel. In Kombination mit einer geeigneten, mittels Thermoelement geregelten Temperaturführung dispergieren die Pulverpartikel, wodurch verrundete Pulverformen mit verbesserten Fließigenschaften entstehen. [Sachs et al., 2017; M. Dechet et al., 2018]

Im Anschluss an den Fällungsprozess ist eine Analyse der hergestellten Partikelgrößenverteilungen zu empfehlen. Für eine umfassende Pulvercharakterisierung sind zusätzliche Messverfahren, wie die Laser- und Röntgenbeugung, Rasterelektronenmikroskopie (REM), dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) und Infrarot-Spektroskopie heranzuziehen [M. A. Dechet et al., 2019].

2.4.1.2 Datenverarbeitung

Die Qualitätsprüfung der Datenmodellierung und -aufbereitung erfolgt weitestgehend softwaregesteuert durch herstellereigene *Frontend*- oder externe *Third-Party*-Softwarepakete [Gebhardt, 2016]. Nach der Konstruktion des Bauteilmodells und Überführung in ein Volumenmodell findet eine Polygonisierung in ein Facetten- bzw. Oberflächenmodell und eine schichtweise Zerlegung des Datensatzes im *Slice-Prozess* statt [VDI 3405: 2014-12]. Um typische Treppenstufen- oder Sekanten-Effekte im AM bedingt durch die schichtweise Bauteilzerlegung zu reduzieren, sollte eine möglichst kleine Schichtdicke D_s vorgesehen werden. Allerdings können aufgrund verfahrensspezifischer, technischer Grenzen nicht beliebig kleine Schichtdicken erzeugt werden. Insgesamt ist ein softwareseitiges Optimum zwischen Modellqualität, Datengröße und technischen Umsetzbarkeit anzustreben [Gebhardt, 2016].

2.4.1.3 Aufheizphase

Die mehrstündige Temperierung der Pulverbettoberfläche auf Betriebstemperatur wird bei den meisten industriellen Anwendungen durch einen Infrarot- bzw. Thermografiesensor überwacht und gesteuert. Die Intensität der Heizstrahler wird entsprechend der eingestellten Heizrate reguliert. Zusätzlich kommen Heizsysteme zum Einsatz, die große Temperaturdifferenzen $\Delta\vartheta$ des Pulvers im Vorratsbehälter zum Pulverbett oder Wärmeverluste an der Behälterwand der Bauplattform kompensieren. [Kaddar, 2010]

2.4.2 In-Prozess

Ein großes Potential zur Datenerfassung und Prozessregelung bietet die fertigungsbegleitende *in-Prozess*-Überwachung. Während des schichtweisen Bauzyklus erfolgt die Überwachung überwiegend anhand global und lokal messender Sensoren. Global messende Sensoren ermöglichen die Überwachung des kompletten Pulverbettes und der darin enthaltenen additiv gefertigten Bauteile im Arbeitsbereich, der sogenannten *region of interest* (ROI). Typischerweise kommen optische und akustische Messsysteme sowie Thermografiesysteme zum Einsatz. Diese weisen mit wenigen aufgezeichneten Bildern pro Fertigungsschicht niedrige Datenerfassungsraten auf und werden meist als *in situ*-Messsysteme zur Datenerfassung in den Prozessnebenzeiten eingesetzt. Ergänzend dazu bedarf eine umfassende *in-Prozess*-Kontrolle weiterer kontinuierlich erfasster Fertigungsdaten, die wie die Raumtemperierung oder Laserleistung meist lokal an unterschiedlichen Messpositionen erhoben werden. Neben Fotodioden, die eintreffendes Licht in ein elektrisches Signal umwandeln, kommen überwiegend auch optische Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme mit hohen Datenerfassungsraten von mehreren hundert Bildern pro Sekunde zum Einsatz. Sie dienen meist der Erfassung der lokal abgegrenzten Aufschmelzzone und der Analyse der Laser-Pulver-Interaktionen. [Wohlers et al., 2019]

Je nach eingestelltem Überwachungsintervall können verschiedene Detailgrade der *in-Prozess*-Messdaten als Datengrundlage für die Prozessregelung herangezogen werden [Chua et al., 2017; VDI 3405-1: 2019-01]. Verschiedene industrielle *in-Prozess*-Messverfahren leisten hierbei einen Beitrag für ein besseres Prozessverständnis, die im Nachfolgenden exemplarisch anhand einzelner für die Prozessregelung relevanter Themenfelder vorgestellt werden.

2.4.2.1 Pulverauftrag

Je nach verwendetem AM-Fertigungsprozess und pulverförmigem Werkstoff ist die Echtzeiterfassung der Fließrate des temperierten Pulvers im Vorratsbehälter ein Qualitätskriterium für einen hochwertigen Pulverauftrag. Diese erfolgt derzeit meist auf Basis von Gewichtsanalysen des Pulverbehälters mit niedrigen Abtastfrequenzen. Weiterführende Analysen der Fließrate sind mittels optoelektronischer Sensoren möglich, die aus einem Laser und einer Fotodiode bestehen. Basierend auf Auswertungen der Transmission und Reflexion von rieselnden Pulverpartikeln konnten bereits Rückschlüsse auf die Pulverbereitstellung gezogen werden [Hu et al., 2003]. Mit Hilfe eines weiterentwickelten Messsystems wurde mit einer koaxial integrierten Hochgeschwindigkeitskamera auch die Fließrate von Multi-Materialpulvern analysiert [Balu et al., 2012].

Die Überwachung der Qualität des Pulverauftrags erfolgt überwiegend anhand optischer Messsysteme. Mit Hilfe hochauflösender CCD- und CMOS-Kameras, die direkt auf das Pulverbett ausgerichtet sind, wird jede einzelne Pulverschicht erfasst und die Pulverqualität softwaregestützt ausgewertet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der schichtweisen *in situ*-Erfassung von Prozessfehlern beim Pulverauftrag. Diese werden hauptsächlich durch Verunreinigungen des Pulvers sowie Streifen bzw. Riefen, bedingt durch unregelmäßige Bewegungen des Beschichtungssystems, beschädigte Auftragssysteme oder mitgezogene Pulverpartikel, hervorgerufen [Craeghs et al., 2011; Foster et al., 2015; Fulga et al., 2016]. Verschiedene Firmen wie die GE Additive oder EOS bedienen sich bei der Pulverbettanalyse eigens entwickelter Softwarepakete, wie dem „LayerQam“ oder dem „EOSTATE PowderBed“, die eine softwaregestützte Auswertung ermöglichen [Wohlers et al., 2019]. Eine weitere optische Analysemethode im Rahmen der zweiten Forschungsphase des SFB 814 zielte auf eine schichtweise *in situ*-Rauheitsmessung der aufgetragenen Pulverschicht mittels Streifenlichtprojektionssensoren ab. Über eine Abstandsmessung der Sensoren mittels passiver Triangulation konnte auf die Profilhöhe der aufgetragenen Pulverschichten rückgeschlossen werden. Anhand experimentell ermittelter Oberflächenrauheiten von PA12-Pulverschichten erfolgte damit eine Validierung einer simulationsbasierten Analyse des Pulverauftrags [Nasato et al., 2017].

Neben den optischen Analysen kann eine prozessbegleitende *in-Prozess*-Messung der Beschleunigung des Beschichtungssystems und des Abstands des Auftragssystems zur Pulverbettfläche auch durch piezoelektrische Sensoren vorgenommen werden [Reinarz, 2013]. Diese werden direkt am Pulverauftragssystem befestigt. Durch eine messtechnische Auswertung auf-

tragsbedingter Schwingungen können damit Unregelmäßigkeiten beim Pulverauftrag detektiert und geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Eine Korrektur einer mangelhaften Qualität des Pulverauftrags mit detektierten Fehlstellen bzw. Rauheitsabweichungen im Pulverbett ist jedoch ausschließlich durch eine Neubeschichtung der Pulverbettebene möglich [Foster et al., 2015]. Dabei kann eine Reduzierung erneut auftretender Pulverauftragsfehler nicht garantiert werden. Hieran zeigt sich, dass ein Bedarf an weiteren prozessbegleitenden Korrekturverfahren zur Elimination lokaler Fehlstellen besteht, um pulverauftragsbedingte Inhomogenitäten auch anderweitig korrigieren zu können.

2.4.2.2 Laserleistung

Im Nachgang an den Pulverauftrag sollte der aktuelle Energieeintrag des Lasers mittels *in-Prozess*-Messungen überwacht werden, um lokale Fertigungsabweichung frühzeitig erfassen und korrigieren zu können. In verschiedenen Publikationen wie bei *Wegner et al.* wird jedoch meist nur die resultierende Korrelation zwischen den eingestellten Anlagenparametern der Laserleistung, Scanstrategie, Schichtdicke oder dem Hatchabstand mit überwiegend mechanischen Parametern der gefertigten Bauteile dargestellt [Wegner et al., 2012]. Bei den wenigsten Anwendungen basieren diese Analysen auf direkten *in-Prozess*-Messungen der Kenngrößen. Nach *Bautze et al.* ist eine Überwachung der Laserleistung besonders beim Laserstrahlschmelzen von Metallen LBM-M erforderlich, da die Laserleistung stark mit der geometrischen Ausprägung der Dampfkapillare des Lasers korreliert [Bautze et al., 2015]. Die Laserleistung wird als kontinuierliche Messgröße entsprechend der resultierenden Schweißtiefe, die mittels eines koaxial integrierten interferometrischen Messsystems bestimmt wird, geregelt.

Weiterhin ist eine Laserleistungsmessung auch bei anderen AM-Verfahren wie dem betrachteten LBM-P oder der Laserbeschichtung (*Laser Cladding*) empfehlenswert. Auftretende Extrema und Schwankungen des Energieeintrags können frühzeitig bei der Prozessführung berücksichtigt und geeignete Gegenmaßnahmen, wie ein erneutes Aufschmelzen (engl. *Remelting*), eingeleitet werden. Durch die Überwachungen der Intensitätsverteilung des Schmelzspots und der Temperaturverteilung des Schmelzbades durch zusätzliche koaxiale Messsysteme, mit IR-Pyrometern, Fotodioden oder CCD-Kameras können zusätzliche Messdaten für eine laserleistungsgesteuerte Regelung generiert werden. [Bi et al., 2013]

2.4.2.3 Aufschmelzvorgang und Schmelzbad

Die Überwachung der geometrischen Ausprägung des Schmelzbades, inklusive dessen Wärmeeinflusszone im Nachgang an den Aufschmelzprozess, stellt einen wesentlichen Bestandteil für die Qualitätssicherung von AM-Bauteilen dar. Bei der Schmelzzone handelt es sich nach *Kruth et al.* um einen lokal abgegrenzten Bereich des Pulverbettes, in dem beim Aufschmelzvorgang ein Energieeintrag durch den bewegten Laserspot erfolgt [Kruth et al., 2009]. Wird der Schmelzpunkt ϑ_m des Materials überschritten, findet eine Phasenumwandlung in den flüssigen Aggregatzustand statt. Weiterhin existiert eine Wärmeeinflusszone um die Schmelzzone, die aus teilweise aufgeschmolzenen und angesinterten Pulverpartikeln besteht, die einen Übergang zum benachbarten Pulverbett bildet.

Derzeit verwendete kommerzielle *in situ*- und *in-Prozess*-Messsysteme zur Aufschmelz- und Schmelzbadanalyse laserstrahlbasierter AM-Prozesse werden entweder innerhalb oder außerhalb der Baukammer verbaut oder koaxial in den Strahlengang der Fertigungsanlage integriert [Caltanissetta et al., 2018].

Der Einsatz akustischer Sensoren findet überwiegend *innerhalb* der Prozesskammer statt. Durch die Aussendung, Detektion und nachfolgende Analyse akustischer Signale konnten beispielsweise Rissausbildungen in AM-Bauteilen eines Laser-Cladding-Prozesses analysiert werden [F. Wang et al., 2008]. Ultraschall-Luftschallemissions-Messungen, die durch ein Oszilloskop oder in Kombination mit Kapazitätsmessungen piezoelektrischer Sensoren aufgezeichnet wurden, ermöglichten weiterhin Rückschlüsse auf die Ausprägung des Schmelzbades. Auch die Plasmabildung oder die Ausbildung und Tiefe der Laserbahn konnten damit beurteilt werden. Allerdings verfälschen Temperatur- und Inertgas-bedingte Umgebungseinflüsse das Messsignal innerhalb der Prozesskammer, wodurch sich akustische Messungen nicht umfassend zur *in-Prozess*-Analyse durchgesetzt haben. [L. Li, 2002, Purtonen et al., 2014]

Vereinzelt werden auch optische Kamerasysteme wie eine Nikon D800E-Kamera unmittelbar in die Fertigungsanlage integriert [Foster et al., 2015]. Zum Schutz des Kamerasystems vor einer thermisch-bedingten Beeinflussung durch die erhöhte Bauraumtemperierung beim LBM-Prozess bedarf dieses einer gesonderten, gekühlten Hausung. Trotz der Kühlung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die optischen Eigenschaften des Sensors negativ beeinflusst werden [Hartmann et al., 2012; Galovsky et al., 2015].

Die verbreitetste Variante der optischen *in situ*-Überwachung zielt deshalb auf eine Positionierung des Kamerasystems *außerhalb* der Prozesskammer ab,

welches durch ein Sichtfenster direkten Zugang zur Baufläche hat. Auch beim Einsatz der Streifenlichtprojektionsmesstechnik zur geometrischen *in situ*-Vermessung des Schmelzbades kann meist auf eine zusätzliche Kühlung der Kamerasensoren verzichtet werden [Land et al., 2015]. Mit Hilfe hochauflösender CCD-Kamerasysteme und zusätzlicher Lichtquellen zur homogeneren Ausleuchtung des Bauraums kann das Schmelzbad im Anschluss an den Pulverauftrag umfassend analysiert werden [Zur Jacobsmühlen et al., 2013]. Ein Nachteil dieser Anordnung stellt allerdings der zusätzliche Betrachtungswinkel des externen Kamerasystems dar [Kruth et al., 2007]. Dieser ergibt sich dadurch, dass eine senkrechte Positionierung des Kamerasystems über der Baukammer meist durch den Galvanometer-Scanner nicht möglich ist. Nach *Jacobsmühlen et al.* ist im Rahmen der Versuchsdurchführung deshalb der Einsatz sogenannter *Tilt-Shift*-Adapter zu empfehlen [Zur Jacobsmühlen et al., 2013]. Diese verstellbaren Zwischenringe, die zwischen dem Kamerachip und Objektiv verbaut werden, ermöglichen eine Anpassung der Schärfentiefe des Bildes [Scheimpflug, 1904]. Weiterhin ist im Vorfeld der Bildauswertung eine perspektivische Korrektur der Bildverzerrung auf Grundlage der Kamerakalibrierung erforderlich.

Durch eine *koaxiale* Integration der Sensoren in den optischen Strahlengang des Lasers kann nach dem patentierten Verfahren von *Kruth et al.* zusätzlich eine Lokalisierung des Laserspots während des Aufschmelzprozesses erfolgen [Kruth et al., 2009]. Eine Grundvoraussetzung für die koaxiale *in situ*-Erfassung der Pulverbetzebene ist allerdings eine Kalibrierung des Galvanometer-Scanners, die beispielsweise durch geometrische Referenzierungsmuster erfolgen kann [Yeung et al., 2020]. Das auf die Pulverbetzebene fokussierte Kamerasystem wird durch einen dichroitischen Spiegel in den Strahlengang des Lasers eingekoppelt. Dadurch kann eine direkte Verfolgung der Laserbahn über die bewegten Spiegel des Galvanometer-Scanners erfolgen. Optische Bandpassfilter auf dem Objektiv sind erforderlich, um den Kamerachip vor der direkten Laserstrahlung, besonders im infraroten Wellenlängenbereich, zu schützen. Aufgrund der hohen Scangeschwindigkeit des Laserstrahls, die je nach AM-Prozess im Bereich von mehreren Hundert bis Tausend Millimetern pro Sekunde liegt, wird meist eine Hochgeschwindigkeits-Kamera als optisches Messsystem verwendet. Durch die kontinuierliche, hochfrequente optische *in-Prozess*-Messung kann sowohl die lokale Dimension der Schmelzzone, als auch die globale Geometrie des Schmelzbades durch eine Datenfusion aufgrund der bekannten Galvanometer-Scanner-Positionen analysiert werden. Ein zusätzlicher Einsatz von Strahlteilern und beschichteten Spiegeln erlaubt die Integration weiterer Detektoren wie Fotodioden oder Pyrometern in den Strahlengang. Damit kann die emittierte elektromagnetische Strahlung des Schmelzbades

in ein elektrisches Signal umgewandelt werden und auch auf das Temperaturprofil rückgeschlossen werden. [Kruth et al., 2009, Berumen et al., 2010, Everton et al., 2016]

2.4.2.4 Referenzierungssysteme

Eine präzise Lagebestimmung der schichtweisen Bauteilkontur im Pulverbett kann im Rahmen der geometrischen Messdatenauswertung nur mit Hilfe von Referenzierungssystemen gewährleistet werden. In Analogie zu Bezugssystemen der GPS, die zur geometrischen Tolerierung und Auswertung finaler Bauteilmerkmale nach [DIN EN ISO 5459: 2013-05] herangezogen werden, werden diese auch für die prozessbegleitende Qualitätsbeurteilung von geometrischen Fertigungsabweichungen benötigt. Im Gegensatz zur *post-Prozess* Bauteilprüfung, die beispielsweise durch eine Antastung von additiv gefertigten Referenzpunkten auf dem Bauteil mittels einer Koordinatenmessmaschine erfolgt [Salmi et al., 2013], ist eine taktile Referenzierung des Pulverbettes oder Schmelzbades während des LBM-Fertigungsprozesses nicht möglich. Da zudem das Zentrum der Bauplattform aufgrund des Pulverauftrags nicht mit einer hinreichenden Genauigkeit als Koordinatenursprung ausgemacht werden kann und auch die Anfangsausrichtung der eingelesenen Bauteildatensätze aufgrund von Skalierungs- und Positionierungsungenauigkeiten des Scanners nicht als stabiles Bezugssystem dient, sind abweichend zur [DIN EN ISO/ ASTM 52921: 2017-01] weitere Referenzierungssysteme für die *in situ*- und *in-Prozess*-Überwachung erforderlich.

Nach *Cooke et al.* kann die Referenzierung im AM mittels einer auf die Kanten der Bauplattform ausgerichteten CCD-Kamera erfolgen. Durch eine zusätzliche Fertigung von kreisförmigen AM-Markern in den Ecken des Pulverbettkastens wird durch eine Abstandsbestimmung zwischen den Kreistan- genten und dem Anlagerahmen ein Abgleich des Kamera- mit dem Maschinenkoordinatensystem durchgeführt. Je kleiner dabei der Bildausschnitt mit den benötigten Bezugselementen bei einer ausreichenden Schärfentiefe und gleichbleibenden Pixelauflösung des Kamerasystems gewählt wird, desto hochauflösender und exakter wird die Bildgebung. [Cooke et al., 2011] Weiterhin nachteilig ist der thermisch-bedingte Einfluss der temperierten Prozesskammer, der eine Längenausdehnung des Anlagerahmens inklusive der detektierten Bauraumkanten verursacht. Die genannten Faktoren bedingen eine erhöhte Messunsicherheit der Referenzierung, die zusätzlich durch prozessbedingte Fertigungsschwankungen der additiv gefertigten Referenzstrukturen beeinflusst wird.

Diese Einschränkungen betreffen auch den Referenzierungsansatz von *Jacobsmühlen*. Dieser basiert auf einer Erfassung von vier additiv gefertigten,

gekreuzten, kreisförmigen Kalibriermarkern in den Randbereichen der ROI. Mit Hilfe des additiv gefertigten Bezugssystems konnten relative Positionsabweichungen der Kalibriermarker zum Kamerasystem am Beispiel eines LBM-M-Prozesses in der Größenordnung von $46\ \mu\text{m}$ bis $156\ \mu\text{m}$ nachgewiesen werden [Zur Jacobsmühlen et al., 2014]. Zwar erfolgte im Anschluss der optischen *in situ*-Bildgebung eine perspektivische Korrektur entsprechend der Kamerakalibrierung, jedoch konnte keine ideale Fertigung exakt runder Referenzkreise gewährleistet werden [Zur Jacobsmühlen et al., 2016b]. Grund hierfür ist unter anderem die variierende Scanpfadlänge des Lasers an den verschiedenen Stellen im Pulverbett. Der Referenzierungsansatz beschränkt sich zudem lediglich auf die zuletzt gefertigte Schicht, die einen prozessbedingten, seitlichen Versatz zu vorherigen Fertigungsschichten aufweisen kann und beinhaltet weder Informationen über die Bauteilverschiebung des eigentlich relevanten Schmelzbades, noch eine Analyse des Einflusses der Bauraumtemperierung.

2.4.2.5 Bauraumtemperierung

Eine direkte, koaxiale Überwachung der lokalen Temperaturverteilung $\vartheta(t)$ der Aufschmelzzone mittels Pyrometern oder weiterer Infrarot-Messsysteme ermöglicht eine zusätzliche zeitabhängige Beurteilung der geometrischen Ausprägung der Schmelzzone. Basierend auf den Thermografiedaten können prozessbegleitend Rückschlüsse über Fehlstellen wie überdimensioniert gefertigte Bauteilstrukturen oder unvollständig aufgeschmolzene Bereiche im Schmelzbadquerschnitt abgeleitet werden, die eine Porenbildung zu Folge haben [Chua et al., 2017]. Eine valide thermografische Auswertung erfordert dabei eine kontinuierliche Bestimmung und Berücksichtigung des Emissionskoeffizienten $\varepsilon(t)$ des Materials. Dies ist für die Angabe absoluter Temperaturen aufgrund der prozessbedingten Phasenumwandlungen und den damit verbundenen variierenden optischen Eigenschaften erforderlich. [Purtonen et al., 2014]

Abgesehen von den aufgeführten Temperaturmessverfahren zur direkten Steuerung der Aufheizphase mittels Infrarot- bzw. Thermografiesensoren im *pre-Prozess* (vgl. Unterabschnitt 2.4.1.3) ist nach *Raplee et al.* eine globale Überwachung der Homogenität der Temperaturverteilung im Pulverbett über den ganzen Fertigungsprozess essentiell, um eine maßhaltige Bauteilfertigung zu gewährleisten [Raplee et al., 2017]. Gegenseitige temperaturbedingte Einflüsse zu dicht positionierter Bauteile, die durch den Einflussfaktor Bauteil β aus Gleichung 2.3.1 charakterisiert werden oder weitere Wärmeverluste an den Baukammerwänden können dadurch frühzeitig erkannt und teilweise durch Heizsysteme am Pulverbettkasten kompensiert werden [Schmid, 2015a]. Eine zusätzliche schichtweise Analyse der Temperaturverteilung im

Pulverbett kann beispielsweise durch Pt100-Widerstandsthermometer erfolgen, die direkt in das Pulverbett eingebracht werden [Laumer et al., 2014]. Ein Vorteil dieser Temperaturmessungen ist, dass nicht nur die Oberflächentemperatur der obersten Pulverschicht, sondern auch der Wärmehaushalt abgesenkter Fertigungsschichten in z-Richtung während der Abkühlphase ermittelt werden kann.

Um insgesamt den temperaturbedingten Einfluss auf die geometrische Bauteilgestalt umfassend analysieren zu können, ist nach *Craeghs et al.* eine kombinierte prozessbegleitende Temperaturüberwachung aus verschiedenen Temperaturmesstechniken erforderlich [Craeghs et al., 2011]. Die technische Realisierung einer geregelten Abkühlphase stellt aufgrund der zahlreichen Prozessparameter und Messeinflüsse jedoch eine große Herausforderung dar. Nach *Drummer et al.* kann eine kontrollierte Bauteilkristallisation nur durch eine angepasste lokale Temperaturregelung der Baukammer in z-Richtung gewährleistet werden [Drummer et al., 2019].

2.4.3 Post-Prozess

Ergänzend zur prozessbegleitenden Überwachung der einzelnen Bauteilebenen ermöglichen *post-Prozess*-Messungen eine ganzheitliche Analyse der additiv hergestellten Werkstücke. Im Anschluss an die Entnahme aus der Prozesskammer und die Entfernung der Pulverrückstände werden, je nach gestellten Qualitätsansprüchen, verschiedene Stichproben einer finalen Bauteilprüfung unterzogen. Dabei wird überprüft, ob die einzelnen Messgrößen die geforderten Toleranzen einhalten und die mechanischen Bauteileigenschaften gewährleistet werden können. [Chua et al., 2017; VDI 3405: 2014-12] Die *post-Prozess*-Untersuchungen können sehr vielseitig sein und umfassen taktile und berührungslose Messverfahren zur Analyse der Geometrie, Bauteildichte und -porosität sowie zerstörende Prüfungen zur Charakterisierung mechanischer Kenngrößen [Mani et al., 2016].

Sofern nicht anders in der technischen Produktdokumentation oder in zusätzlichen Prüfvorgaben festgelegt, ist die geometrische Prüfung bei einer international vereinbarten Referenztemperatur von 20 °C nach [DIN EN ISO 1: 2016-12] durchzuführen. Spezifische Prüfbedingungen für Polymere werden darüber hinaus, wie im vorliegenden Fall, beim LBM-P-Prozess, nach [DIN EN ISO 291: 2008-08] festgelegt. Das zu prüfende Normalklima sollte demnach Grenzabweichungen der Lufttemperatur bei 23 °C von maximal ± 2 °C nicht überschreiten. Weiterhin sollte bei der Analyse der LBM-P-Probekörper eine zeitgleiche Überprüfung der relativen Luftfeuchte erfolgen, die maximal 50 % \pm 10 % betragen darf.

2.4.3.1 Geometrie, Bauteildichte und -porosität

Neben der schichtweisen *in situ*-Erfassung der Schmelzbadoberfläche, die nur eine kurzzeitige Bestandsaufnahme während des Fertigungsprozesses ermöglicht, findet eine finale Beurteilung der Bauteilgeometrie meist anhand taktiler oder optischer Messverfahren im *post-Prozess* statt. Eine Angabe des Ausgangszustands der *post-Prozess*-Analyse ist dabei besonders wichtig, da sich die Oberflächen der endkonturnah gefertigten, unbehandelten AM-Prüfkörper erheblich von den nachbearbeiteten Bauteilen unterscheiden können [Abd-Elghany et al., 2012]. Für eine umfassende Geometrieauswertung ist neben der Überprüfung der Maßhaltigkeit auch die Analyse von Form- und Lagetoleranzen relevant, die wiederum durch die Oberflächenrauheit und -welligkeit geprägt werden können [DIN EN ISO 1101: 2017-09].

Ziel der Oberflächenanalyse ist es, nicht nur die Realisierung eingebrachter Oberflächenstrukturierungen zu prüfen, sondern diese gezielt für den nächsten Fertigungsprozess einzustellen. Dadurch sollen unerwünschte Einflüsse bedingt durch Stufenversätze einzelner Schichten oder positionsabhängige Rauheitsunterschiede, reduziert werden [Kaddar, 2010].

Zum Einsatz kommt im *post-Prozess* verstärkt das industriell weit verbreitete Tastschnittverfahren, das nach [DIN EN ISO 3274: 1998-04] das Oberflächenprofil mit Hilfe einer dünnen Tastspitze auswertet, die taktil über die Bauteiloberfläche bewegt wird. Nachteilig an der berührenden Oberflächenanalyse ist jedoch der direkte Kontakt zum Messobjekt, der zu einer plastischen Deformation der Oberfläche führen kann. Weiterhin ist bei der Auswertung einzelner Linienprofile die morphologische Filterwirkung der Tastspitze zu berücksichtigen, die aufgrund ihrer Form nicht jede Unebenheit der Oberfläche abbilden kann [Zur Jacobsmühlen et al., 2016a]. Ein weit verbreitetes Messverfahren zur Beurteilung der Gestalt stellt auch die taktile Koordinatenmesstechnik dar, die durch eine Antastung der Bauteilkonturen mittels eines Messtasters die Bestimmung von Form- und Lageabweichungen zulässt.

Bei der Erfassung komplexer AM-Strukturen wird meist auf optische 3-D-Messsysteme zurückgegriffen [Zur Jacobsmühlen et al., 2019]. Optische Messtechniken wie die Fokusvariation, konfokale Laser-Scanning Mikroskopie oder Streifenlichtprojektion ermöglichen eine umfassende, flächenhafte Oberflächencharakterisierung. Allerdings führen Auflösungsbegrenzungen der Messsysteme oder reflektierende Oberflächen aufgrund überbelichteter Bereiche im Rahmen der Deflektometrie zu Fehlinterpretationen bei der Oberflächencharakterisierung [Triantaphyllou et al., 2015; Grimm et al., 2015; Heidl et al., 2020a]. Die Streifenlichtprojektion eignet sich hierbei besonders, um die Bauteilgeometrie in kurzen Messzeiten durch die optische Auswer-

tung eines projizierten, phasenverschobenen Streifenmusters mit Hilfe eines Kamerasystems zu digitalisieren. Durch einen Vergleich mit der Sollgeometrie können damit lokale Fertigungsabweichungen bestimmt werden [Weckenmann et al., 2008; Heinel et al., 2016]. Analog zur taktilen Messung ist eine optische Vermessung tiefer Bauteilstrukturen und unzugänglicher Hinterschnidungen mit den genannten Messsystemen nur bedingt zerstörungsfrei zu realisieren.

Die Computertomografie (CT) gestattet neben der Messung außenliegender Merkmale hingegen auch eine Erfassung innenliegender Geometrien. Je nach Auflösungsbegrenzung des CT-Systems sind auch Oberflächenanalysen der rekonstruierten Bauteilkonturen möglich. CT-Messungen werden darüber hinaus meist zur Analyse der Bauteildichte ρ und zur Porositätsbestimmung verwendet. Je nach verwendetem Werkstoff, Positionierung und Geometrie des untersuchten Prüfkörpers kann es dabei allerdings zu unerwünschten Messartefakten kommen, die das Messergebnis verfälschen [Shah et al., 2016]. Weitere Messverfahren zur Charakterisierung der Bauteildichte und Porosität, wie die in [DIN EN ISO 1183-1: 2019-09] beschriebenen Auftriebsverfahren, basieren beispielsweise auf dem archimedischen Messprinzip. Durch den Einsatz einer Präzisionswaage kann die Gewichtsanalyse zwar einfach realisiert werden, allerdings weisen besonders AM-Bauteile aufgrund der Infiltration der Eintauchflüssigkeit in die offene Porosität an den Bauteiloberflächen Probleme bei der exakten Porositätsermittlung auf.

Alle im *post-Prozess* erfassten geometrischen Abweichung μ_{post} der gefertigten AM-Bauteile sind zwar unmittelbar für die Konformität mit der geometrischen Produktspezifikation von Relevanz, wie in Abschnitt 2.3 erläutert können daraus jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf deren Entstehungsursachen im Fertigungsprozess abgeleitet werden.

2.4.3.2 Mechanische Eigenschaften

Unerwünschte Poren, Mikrorisse und Hohlräume in AM-Werkstücken wirken sich auf die mechanischen Bauteileigenschaften aus und führen im Vergleich zu Bauteilen hoher Bauteildichte unter Belastung zu einem Bauteilversagen [Kruth et al., 2010]. Die mechanischen Kenngrößen der Zugfestigkeit R_m , Bruchdehnung ε_b und des Elastizitätsmoduls E werden maßgeblich durch die bereits vorgestellten Einflussfaktoren des Energieeintrags E_V , der Temperaturführung $\vartheta(t)$ sowie der Positionierung der Bauteile im Bauraum beeinflusst [Wegner et al., 2012]. Weitere anisotrope Bauteileigenschaften, vor allem in Aufbaurichtung, wirken sich negativ auf die Festigkeit und Bruchdehnung aus. [Mani et al., 2016]

Die standardisierte mechanische Prüfung erfolgt, wie im vorliegenden Fall bei polymeren Bauteilen, überwiegend anhand zusätzlich gefertigter Zugprobekörper nach [DIN EN ISO 3167: 2014-11]. Diese werden einer zerstörenden Zugprüfung entsprechend [DIN EN ISO 527-1: 2019-12] unterzogen, wobei das Spannungs-Dehnungsverhalten bis zum mechanischen Versagen des Bauteils ermittelt wird [VDI 3405-1: 2019-01]. Dynamische Belastungstests durch den Wöhlerermüdungs-, Rotationsbiege- oder Kompaktzugtest sind weitere Möglichkeiten die zyklische Belastbarkeit der Probekörper zu bestimmen [Mani et al., 2016]. Alternativ kann eine Analyse der Eigenspannung von AM-Bauteilen anhand optischer Analysen der mechanischen Verzerrungen, durch Röntgenbeugung bzw. Raman-Spektroskopie, akustischen Ultraschallmessungen oder elektro-magnetischen Untersuchungen zur Auswertung von Spannungsrelaxationen erfolgen [Withers et al., 2001]. Aus wirtschaftlicher Sicht sollten zerstörende Stichprobenprüfungen zur finalen mechanischen Prüfung jedoch weitestgehend vermieden werden, da die getesteten Bauteile nicht weiterverwendet werden können. Ebenso sind die Ergebnisse der *post-Prozess-Analyse* nur bedingt für eine Prozessregelung zu gebrauchen.

Jedes der im Abschnitt 2.4 vorgestellten Messverfahren weist somit je nach Einsatzgebiet spezifische Vor- und Nachteile bei der Fertigungsüberwachung auf und leistet einen entsprechenden Beitrag für den Aufbau einer Prozessregelung.

2.5 Regelsysteme in der additiven Fertigung

Die Sicherstellung der Konformität der gefertigten Bauteile mit der geometrischen Produktspezifikation erfordert neben einer ganzheitlichen Qualitätskontrolle im AM einen Übergang von einer rein Prozessparameter-gesteuerten additiven Fertigung zu einer kontinuierlich überwachten Prozessregelung. Neben einer umfassenden Prozessüberwachung samt robuster, referenzierter Messdatenauswertung ist deshalb eine Analyse und Korrektur der erfassten Fertigungsabweichungen in Form eines Regelkreises unerlässlich. Nach einer kurzen Einführung der Grundstruktur eines Regelkreises aus der Regelungstechnik folgt eine Vorstellung derzeit gängiger Regelsysteme in der additiven Fertigung.

Nach *Lunze* besteht ein Regelkreis aus Eingangsgrößen, die das System beeinflussen und Ausgangsgrößen, die das resultierende Systemverhalten beschreiben. Ziel des Regelkreises nach Bild 8 ist es, die Regelgröße $y(t)$, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Geometrie der additiv gefertigten Bauteile entspricht, kontinuierlich mit der Führungsgröße $w(t)$ abzugleichen und dahingehend zu beeinflussen, dass die geforderten Produktspezifikationen eingehalten werden [Lunze, 2014].

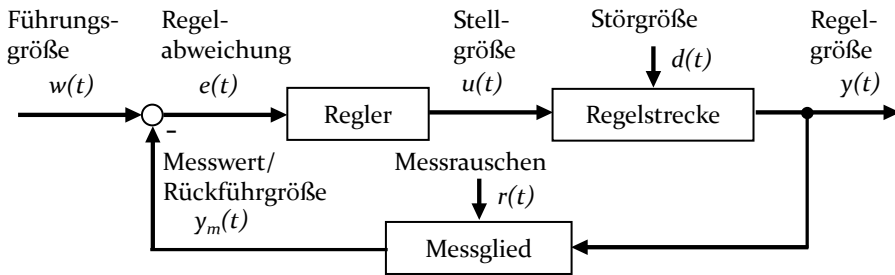


Bild 8: Grundstruktur eines Regelkreises (nach [Lunze, 2014])

Um das dynamische Mehrgrößensystem des LBM-Prozesses gezielt zu regeln, sind fundierte Kenntnisse über die steuerbaren Eingangs- und Führungsgrößen $w(t)$ erforderlich [Lunze, 2016]. Diese bestehen im vorliegenden Fall aus mehreren zeitabhängigen Faktoren des Energieeintrags $E_V(t)$ bis hin zur Temperaturführung $\vartheta(t)$ und können sich gegenseitig beeinflussen. Nicht steuerbare Größen, wie die Wellenlänge λ des verwendeten Lasers oder das festgelegte Pulvermaterial sind zusätzlich vorzugeben, spielen für die zeitabhängige Regelung jedoch eine untergeordnete Rolle [Vlasea et al., 2015]. Für die schichtweise additive Fertigung entsprechend der vorgegebenen Regelstrecke, die durch die eingestellten Fertigungsparameter charakterisiert wird, ist weiterhin die Berücksichtigung von Störgrößen $d(t)$ von Bedeutung. Dazu zählen alle in Abschnitt 2.3 beschriebenen Prozessparameterschwankungen und Unsicherheiten der materialbedingten, fertigungs- und messtechnischen Einflüsse. Die prozessbegleitende Überwachung der Regelgröße $y(t)$ erfolgt nach Abschnitt 2.4 anhand unterschiedlicher Messglieder, die umgebungsbedingtem Messrauschen $r(t)$ ausgesetzt sind und schichtweise Messwerte $y_m(t)$ als Rückführgrößen an den Regler übergeben. Nach dem regelungstechnischen Prozessschritt des Messens wird die Regelabweichung $e(t)$ durch einen Vergleich des Messwertes $y_m(t)$ mit der Führungsgröße $w(t)$ berechnet. Es erfolgt eine Umwandlung der Messdaten durch Analog-Digital-Wandler in ein digital kodierte Signal. Bei der digitalen Regelung im LBM-Prozess wird die Stellgröße $u(t)$ je nach Fertigungsschritt nicht kontinuierlich, sondern nur zu bestimmten Abtastzeitpunkten taktgebunden an die Regelgröße $e(t)$ und Führungsgröße $w(t)$ angepasst. Somit wird basierend auf den dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke im Prozessschritt des Stellens die Stellgröße $u(t)$ ermittelt, die die Regelgröße $y(t)$ entsprechend nachführt [Lunze, 2014; Föllinger, 2016]. Das vom Regler errechnete digitale Signal wird anschließend durch Digital-Analog-Wandler zurück in ein analoges Signal überführt. [Lunze, 2016]

Neben der Hauptanforderung der Stabilität an die Regelkreissteuerung, die beinhaltet, dass die Führungs- und Sprungantwort nach einem ausreichend

langen Zeitintervall und Einschwingvorgang einen festen Wert annehmen, wird weiterhin eine stationäre Genauigkeit gefordert [Föllinger, 2016]. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der dynamische Regelkreis zwei grundlegende Eigenschaften gewährleisten: Die *Steuerbarkeit* und die *Beobachtbarkeit*. Das dynamische System muss in der Lage sein, durch die Steuerbarkeit der Fertigungsanlage einen beliebigen Ausgangszustand entsprechend der Stellgröße $u(t)$ innerhalb eines endlichen Zeitintervalls in einen vordefinierten Zielzustand zu überführen [Lunze, 2016]. Trotz der Komplexität des LBM-Prozesses und zahlreicher Einflussfaktoren auf die Regelgröße $y(t)$ muss weiterhin eine umfassende messtechnische Erfassbarkeit und Rekonstruierbarkeit des Ausgangszustandes in einem definierten Zeitintervall durch die Messglieder gegeben sein [Lunze, 2016]. Diese zweite Forderung der Beobachtbarkeit beinhaltet eine exakte, referenzierte Zuordenbarkeit der Messdaten zu jedem Zeitpunkt des Fertigungsprozesses. Die Beobachtbarkeit ist erforderlich, um einen beliebigen Systemzustand durch Kenntnisse über die Ausgangsgröße $y(t)$ und eine geeignete Wahl der Führungsgrößen $w(t)$ zu bestimmen [Lunze, 2012].

Im Rahmen der Prozessregelung kommen verschiedene Kontrollstrategien der prozessbegleitenden Regelung über alle Phasen des additiven Fertigungsprozesses zum Einsatz, die den gestellten Anforderungen der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit der Messgrößen gerecht werden müssen. Im Nachfolgenden wird deshalb besonders auf Regelstrategien eingegangen, die auf die Erfassung und Korrektur geometrischer Fertigungsabweichungen abzielen. Derzeit verbreitete industrielle Prozessregelung im AM lassen sich dabei überwiegend auf energieeintrags- und temperaturgesteuerte Ansätze zurückführen. [Vlasea et al., 2015] Korrekturverfahren wie ein erneuter Pulverauftrag (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.1), die auf Messdaten von optisch detektierten Mängeln beim Pulverauftrag basieren, werden zwar auch zur Prozesssteuerung verwendet, weisen jedoch einen schwer zu quantifizierenden Einfluss auf die Bauteilgeometrie auf und werden deshalb nicht weiter beleuchtet.

Bei der Messdatenerfassung kommen neben kamerabasierten Messsystemen [Hofman et al., 2012] auch Thermografiesensoren in Kombination mit numerischen Analysen der Temperaturverteilung des Schmelzbades zum Einsatz [Birnbaum et al., 2003; Devesse et al., 2014; Mireles et al., 2015]. Entsprechend der erfassten inhomogenen Temperaturverteilungen des Schmelzbades und daraus resultierender Geometrieabweichungen wird in nahezu allen regelkreisbasierten Anwendungen eine prozessbegleitende Anpassung der Laserleistung oder Scanstrategie vorgenommen. Ein erneutes Aufschmelzen, das sogenannte *Remelting* der obersten Fertigungsschicht, ist jedoch

meist die einzige Möglichkeit, energieeintragsbedingte Fertigungsfehler zu kompensieren. Dadurch kann neben einer Steigerung der Bauteildichte ρ auch die Oberflächengüte nachweislich verbessert werden. Ein zu großer flächenmäßiger Energieeintrag E_A kann jedoch nicht korrigiert werden. Insgesamt sollte eine unmittelbare, rückgeführte Regelung der Prozessparameter während des Prozesses angestrebt werden. Grund hierfür ist, dass das erneute Aufschmelzen mit einer ungleichmäßigen Energieeinbringung E_V in z-Baurichtung sowie einer verlängerten Produktionszeit einhergeht [Yasa et al., 2011; Kruth et al., 2010]. Ziel sollte demnach eine kontinuierliche Regelung der Laserleistung sein, die das analog aufgezeichnete Output-Signal des Lasers wie bei der Firma SLM Solutions entsprechend detektierter Schwankungen der Laserleistung nachregelt [Wohlers et al., 2019].

In Ergänzung dazu können Temperaturunterschiede im Schmelzbad und daraus resultierende Bauteilspannungen durch eine geregelte Temperierung der Baukammer reduziert werden. Zwar kann eine globale thermische Homogenisierung des Schmelzbades bereits gut regelungstechnisch umgesetzt werden, eine lokale kontrollierte Abkühlung tiefer gelegener Fertigungsschichten stellt jedoch eine große Herausforderung dar [Everton et al., 2016; Herzog, 2016; Töppel et al., 2016].

2.6 Wissenschaftliche Zielsetzung

Nachdem in den vorausgegangenen Abschnitten einige Defizite sowohl im Rahmen der Prozessüberwachung, als auch bei der Implementierung von Regelsystemen in der additiven Fertigung deutlich wurden, gilt es die Schwachstellen bisheriger Lösungsansätze im Rahmen der Überwachung und Korrektur geometrischer Fertigungsabweichungen aufzugreifen und einen wissenschaftlichen Ansatz für die vorliegende Arbeit abzuleiten. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Einflussfaktoren und Wechselwirkungen zwischen den Prozesskenngrößen stellt die Zuordnung der Entstehungsursache geometrischer Abweichungen aus fertigungsmesstechnischer Sicht eine wesentliche Herausforderung dar, die es für eine umfassende Qualitätssicherung zu bestimmen gilt. Zwar gibt es einen zunehmenden Trend zeitaufwendige, unwirtschaftliche, zerstörende *post-Prozess*-Analysen zu Gunsten von prozessbegleitenden *in situ*- und *in-Prozess*-Kontrollen auf ein Mindestmaß zu begrenzen (vgl. Abschnitt 2.4), insgesamt mangelt es dabei jedoch an Qualitätsstandards bezüglich eines einheitlichen Vorgehens zur Fertigungsüberwachung und Prozessregelung [Kaddar, 2010; Schmid, 2015a; Fulga et al., 2016].

Ziel dieser Arbeit soll daher sein, einen messtechnischen Ansatz für eine präzise, referenzierte Erfassung von Fertigungsabweichungen bereit zu stel-

len. Dieser soll als Grundlage für weiterführende Arbeiten dienen, um eine schichtweise Korrektur detektierter geometrischer Abweichungen durch eine prozessbegleitende Regelung während der additiven Fertigung vornehmen zu können. Die Auswertung der Messdaten basiert auf einem an die messtechnischen Herausforderungen im LBM-Prozess angepassten Kantendetektionsalgorithmus nach *John F. Canny* [Canny, 1986]. Dieser ermöglicht eine schichtweise Konturerfassung des Schmelzbades. Lokal auftretende Abweichungen, die durch materialspezifische oder kristallisationsbedingte Schwindung in der Abkühlphase hervorgerufen werden und in den Baufaktor τ eingehen, sollen durch die *in-Prozess*-Auswertung bereits prozessbegleitend kompensiert werden. Die *in-Prozess*-Überwachung bedarf einer prozessbegleitenden Erfassung und Auswertung referenzierter Schmelzbadkonturen, die als Datengrundlage für die Korrektur lateraler Fertigungsabweichungen benötigt werden. Die schichtweise *in-Prozess*-Analyse ist weiterhin für eine Beurteilung der in der GPS geforderten Maßhaltigkeit, Form- und Lagetoleranzen der AM-Bauteile erforderlich. Ein Nachweis der in Abschnitt 2.5 geforderten Beobachtbarkeit der Messgrößen erfolgt bisher jedoch nur vereinzelt durch unzufriedenstellende Referenzierungsansätze über Bauraumkanten oder zusätzlich additiv gefertigte Referenzmarker (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.4). Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein weiteres Referenzierungsverfahren zur präzisen Lagebestimmung des Schmelzbades im Bauraum zur Verfügung gestellt werden, das weniger anfällig gegen fertigungs- und temperaturbedingte Prozesseinflüsse ist. Dadurch wird auch eine verbesserte Zuordenbarkeit einzelner Fertigungs- und Messabweichungen angestrebt. Mit Hilfe dieses Referenzierungssystems, bestehend aus vier in das Pulverbett integrierten Quarzglasrohren, soll der Messkreis verkürzt und eine präzise, referenzierte Messdatenerfassung zur Beurteilung der Beobachtbarkeit der Messgrößen gewährleistet werden. [Hausotte, 2015]

Die optische *in-Prozess*-Überwachung außerhalb des Bauraums eignet sich besonders für die referenzierte Messdatenerfassung geometrischer Fertigungsabweichungen (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.3). Durch die optische Erfassung und Auswertung der Positionsstabilität des Referenzierungssystems relativ zum Kamerasystem wird eine Beurteilung von Messabweichungen vorgenommen. Dabei wird untersucht, ob neben Projektionsabweichungen in Folge der Kalibrierung auch Messabweichungen, die durch eine temperaturbedingte Drift des Anlagerahmens oder der Halterung der Kamerasysteme hervorgerufen werden, in den Fehlerterm ε aus Gleichung 2.3.1 eingehen. Mittels eines weiteren koaxial in den optischen Strahlengang des Lasers integrierten Kamerasystems soll zusätzlich eine Überprüfung der fertigungsbedingten Wiederholpräzision des Scanners erfolgen. Weitere prozessbedingte Einflüsse der Pulverbettabsenkung und des Pulverauftragssystems können durch

das Referenzierungssystem genauer charakterisiert werden. Abschließend werden die analysierten, systematischen Fertigungs- und Messabweichungen gegenübergestellt.

Eine zusätzliche Beurteilung der Steuerbarkeit der verwendeten LBM-Forschungsanlage ermöglicht darüber hinaus eine Einschätzung der erzielbaren Maß- und Formhaltigkeit der untersuchten AM-Probekörper.

Aus den Untersuchungsergebnissen wird abschließend eine Empfehlung für die Durchführung einer referenzierten *in-Prozess*-Überwachung geometrischer Fertigungsabweichungen abgeleitet sowie mögliche Strategien zur Korrektur lateraler geometrischer Fertigungsabweichungen erarbeitet. In Ergänzung zu derzeit üblichen pulverauftrags-, energieeintrags- oder temperaturgesteuerten Regelstrategien (vgl. Abschnitt 2.5) wird im Ausblick ein Regelkonzept zur schichtweisen Anpassung des Rohdatensatzes auf Grundlage der referenzierten lateralen Konturverschiebungen erläutert. Insgesamt soll durch die referenzierte *in-Prozess*-Überwachung und -auswertung ein weiterer Beitrag hin zu einem standardisierten Vorgehen bei der Qualitätskontrolle von AM Bauteilen geleistet werden.

3 Konzeption, Entwicklung und Realisierung der Messsysteme

Wie aus der wissenschaftlichen Zielsetzung ersichtlich wird, steht die methodische Entwicklung und Realisierung eines Messverfahrens für die referenzierte *in-Prozess*-Überwachung geometrischer Fertigungsabweichungen in der pulverbettbasierten additiven Fertigung im Fokus der nachfolgenden Untersuchungen. Nach der Vorstellung des Gesamtkonzeptes, das einen neuartigen Referenzierungsansatz zur Beurteilung der Beobachtbarkeit der Messgrößen beinhaltet, erfolgt eine Auswahl und Vorstellung der realisierten *in-Prozess*-Messsysteme. Auf Grundlage der dargelegten Messprinzipien zur referenzierten Konturerfassung und der Analyse durchschimmernder Schmelzbadkonturen soll mit Hilfe des Referenzierungssystems ein Nachweis schichtweiser lateraler Konturverlagerungen erbracht sowie eine Überprüfung der Wiederholpräzision des Galvanometer-Scanners ermöglicht werden.

3.1 Gesamtkonzept

Der von *Hausotte* im Rahmen der Grundlagenforschung des Sonderforschungsbereichs Additive Fertigung (SFB 814) vorgestellte Ansatz zur referenzierten *in-Prozess*-Überwachung dient der messtechnischen, prozessbegleitenden Erfassung und Analyse von Fertigungs- und Messabweichungen [Hausotte, 2015]. Durch geringe Anlagenmodifikationen und eine Integration zusätzlicher Messsysteme soll anhand exemplarischer Untersuchungen mit einer EOSINT P 380 LBM-Forschungsanlage am bayerischen Laserzentrum (blz) in Erlangen eine erweiterte *in-Prozess*-Analyse zur Sicherstellung der Konformität geometrischer Produktspezifikationen ermöglicht werden. Das nachfolgend vorgestellte Gesamtkonzept in Bild 9 gibt dabei Aufschluss über die methodische Umsetzung der referenzierten *in-Prozess*-Überwachung. Diese bildet die Grundlage für die Realisierung der in den folgenden Abschnitten vorgestellten Messprinzipien der referenzierten Bilderfassung, der Beurteilung der Wiederholpräzision des Scanners sowie der Analyse schichtweiser, lateraler Bauteilverlagerungen.

3.1.1 Prinzip der referenzierten Konturerfassung

Im Fokus der Arbeit steht die referenzierte Erfassung additiv gefertigter Bauteilkonturen im Arbeitsbereich (ROI) der Baufläche sowie eine messtechnische Evaluierung der Beobachtbarkeit geometrischer Messgrößen durch die Kamerasysteme während des AM-Fertigungsprozesses. Die referenzier-

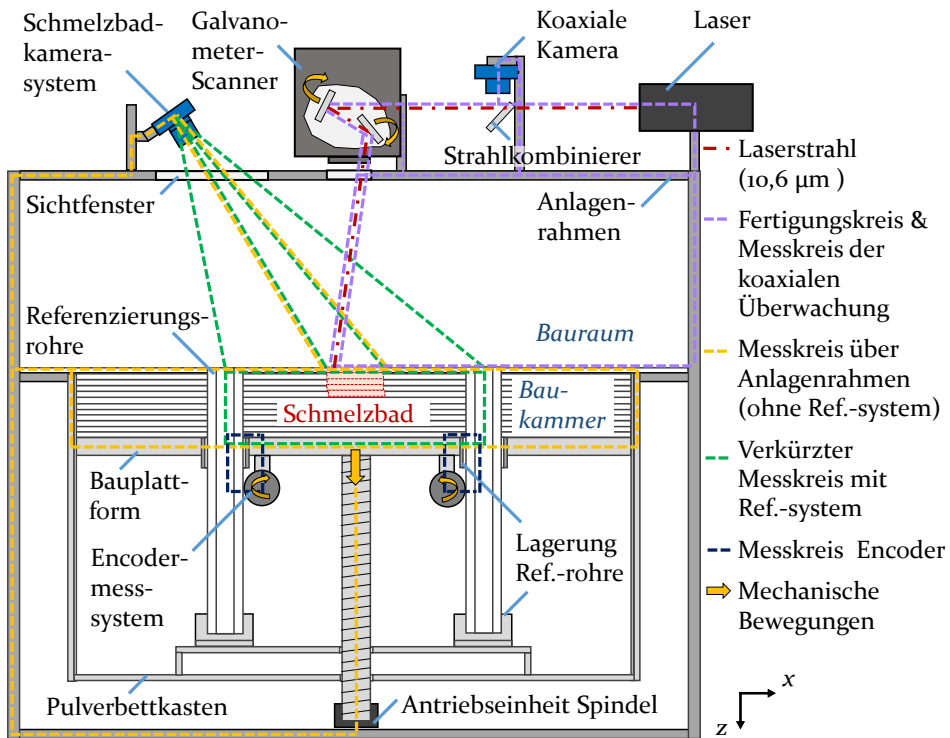


Bild 9: Gesamtkonzept der *in-Prozess*-Überwachung mit verkürztem Messkreis mit Referenzierungssystem im Pulverbett (in Anlehnung an [Hausotte, 2015])

te Konturauswertung, die durch Abstandsmessungen der Schmelzbadkonturen zum Referenzierungssystem charakterisiert wird, ist für die Bildgebung von besonderer Bedeutung. Durch die Referenzierung wird erst eine Analyse unterschiedlicher Entstehungsursachen geometrischer Fertigungs- und Messabweichungen ermöglicht. Da eine *in-Prozess*-Referenzierung der Schmelzbadkonturen aufgrund der unpräzisen Lagebestimmung des Koordinatenursprungs der Fertigungsanlage im Pulverbett erschwert wird, ist für den LBM-Prozess ein weiteres Bezugssystem erforderlich. Im Gegensatz zur herkömmlichen Referenzierung über Bauraumkanten oder zusätzlich additiv gefertigten Referenzmarkern (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.4) wird im Rahmen dieser Arbeit ein Referenzierungskonzept mit Quarzglasrohren im Pulverbett vorgestellt. Die ausdehnungsarmen Referenzierungsrohre wurden nach Bild 9 in die Bauplattform integriert. Mit Hilfe des Referenzierungssystems soll eine erhöhte Bezugsgenauigkeit im Rahmen der Messdatenauswertung erzielt werden. Durch eine optische Erfassung der runden Referenzgeometrielemente kann nach [DIN EN ISO 17450-4: 2018-05] ein flächenbezogener

Referenzraum definiert werden, insofern für jeden Referenzierungspunkt eine zugehörige lokale Messunsicherheit angegeben wird.

Nach *Loderer* sollte im Rahmen der Prozessüberwachung eine Reduktion fertigungsmesstechnischer Abweichungen entlang der Messkette angestrebt werden, um eine möglichst realitätsnahe geometrische Auswertung zu gewährleisten [Loderer, 2017]. Der ursprüngliche, in Bild 9 orange dargestellte Messkreis, der nach der Definition aus Abschnitt 2.3.4 über das Kamerasystem, die Halterungen, den kompletten Anlagerahmen, die Antriebseinheit, die Bauplattform und das Pulver bis zum Schmelzbad führt, ist jedoch sehr sensitiv gegenüber thermischen und mechanischen Einflüssen während der Prozessüberwachung. Der deutlich verkürzte, grün dargestellte Messkreis zur Konturbestimmung ist hingegen unempfindlicher gegenüber temperaturbedingten Dehnungen des Anlagerahmens. Dieser Messkreis umfasst neben dem Schmelzbadkamarasystem lediglich die im Pulverbett integrierten Referenzierungsrohre, die Bauplattform und das Schmelzbad. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil des vorgestellten Referenzierungskonzeptes dar, der den Messprozess invarianter gegenüber temperaturbedingten Einflüssen macht (vgl. Abschnitt 6.2.1). Zusätzlich können durch die Referenzierungsrohre auch die dunkelblau dargestellten Messkreise der Encodersysteme deutlich verkürzt werden. Dadurch können Messunsicherheiten bei der Ermittlung der Absenkung der Bauplattform reduziert werden, was bessere Rückschlüsse auf die einzelnen Pulverschichtdicken ermöglicht. Weiterhin kann durch die Integration der Referenzierungsrohre in den Randbereichen der ROI auch der Arbeitsbereich der Kameras deutlich kleiner gewählt werden, da nicht die ganze Baufläche samt Bauraumkanten erfasst werden muss. Damit wird eine höhere Pixeldichte der Kamerabilder in Bezug zum kleineren Arbeitsbereich realisiert, was im Vergleich zur globalen Bilderfassung zu einer höheren realisierbaren Bildauflösung führt.

3.1.1.1 Vorversuch zur Integration beleuchteter Referenzierungsrohre in die Bauplattform

In unveröffentlichten Vorversuchen von *Galovskyi* am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik zur konstruktiven Umsetzung des vorgestellten Referenzierungsansatzes konnte nachgewiesen werden, dass eine zusätzliche LED-Beleuchtung der Referenzierungsrohre zu einer verbesserten Konturerfassung im Rahmen der Kantendetektion beiträgt. Zur Überprüfung, ob eine Beleuchtung der Referenzierungsrohre durch das Pulverbett möglich ist, wurden Referenzierungsrohre aus Kunststoff in einen Prüfstand mit einer gestuften Bauplattform aus Bild 10 verbaut. Die LED-Beleuchtung erfolgte von der Unterseite der optisch transparenten Referenzierungsrohre. Diese leiteten das Licht durch die unterschiedlichen Pulverschichtdicken bis zur Baufläche.



Bild 10: Versuchsstand zur Integration beleuchteter Referenzierungsrohre in eine gestufte Bauplattform zur Analyse des Beleuchtungseinflusses durch unterschiedliche Pulverschichtdicken

Gleichzeitig bestand die Möglichkeit durch eine Absaugung der Referenzierungsrohre durch den Pulverauftrag bedingte Pulverpartikel auf der Oberseite der Referenzierungsrohre zu entfernen, um diese für die Kantendetektion freizulegen. Es konnte gezeigt werden, dass eine annähernd homogene Beleuchtung der Referenzierungsrohre unabhängig von der zurückgelegten Strecke des Lichtes durch das Pulverbett gewährleistet werden kann. Im Vergleich zu einem unbeleuchteten Referenzierungssystem konnte insgesamt ein besserer Kontrast zum umgebenden weißen PA12-Pulverbett erzielt werden, der auch für den nachfolgenden Versuchsaufbau essentiell für eine reproduzierbare Kantendetektion der runden Rohrenden als Referenzierungsmarker ist.

3.1.1.2 Konstruktive Umsetzung des Referenzierungssystems

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Vorversuchs wurden vier optisch transparente, ausdehnungsarme Referenzierungsrohre aus ilmasil PN Quarzglas mit einem Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{\text{Quarzglas}}$ von $5,5 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{K}}$ verwendet [Qsil, 2013]. Die vom Kamerasystem erfassten, trenngeschliffenen und feuerpolierten runden Rohrenden besaßen einen vom Hersteller tolerierten Außendurchmesser von $20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ und einen Innendurchmesser von $10 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$, bei einer Gesamtlänge von $320 \text{ mm} \pm 2,0 \text{ mm}$ [Qsil, 2014].

Die Referenzierungsrohre wurden nach Bild 9 in vorgesehene Bohrungen in der Bauplattform eingebracht. Eine zugehörige technische Zeichnung des durch die Referenzierungsrohre definierten Arbeitsbereiches um das Bau-raumzentrum ist Unterabschnitt 4.3.4.2 zu entnehmen. Die laterale Führung der Referenzierungsrohre erfolgte maßgeblich durch gefederte Wälzlager in Lagerbuchsen, die nach Bild 11 a) direkt unterhalb der Bohrungen der Bauplattform angebracht wurden. Die unteren Enden der Referenzierungsrohre steckten in Lagerhülsen, die auf einem Rahmen des Pulverbettkastens befes-

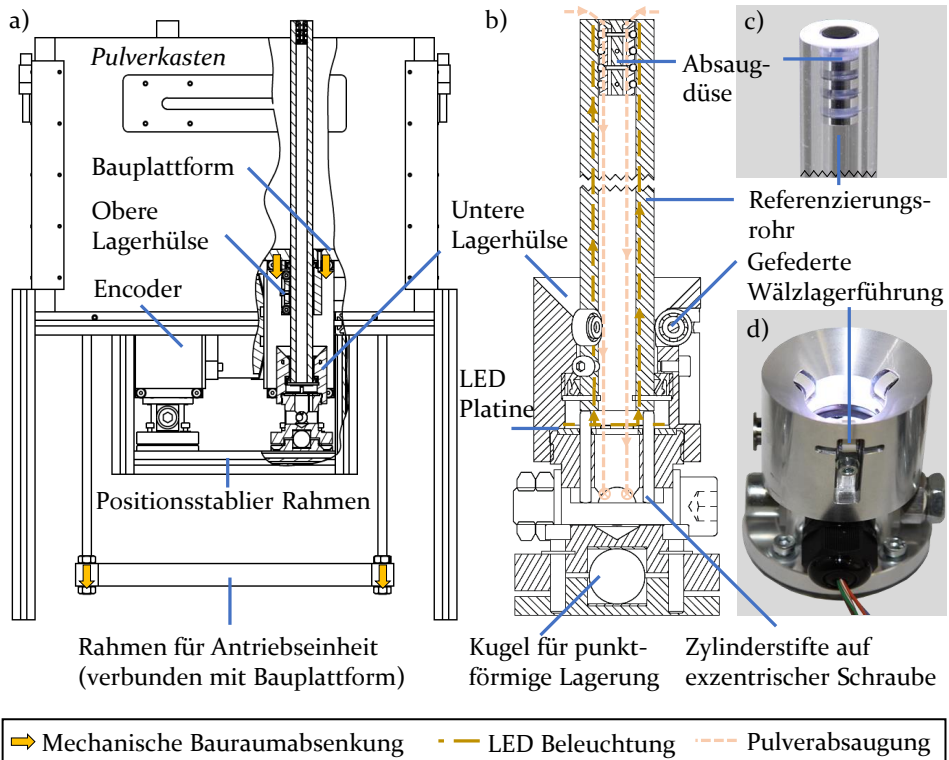


Bild 11: Konstruktive Umsetzung: a) Pulverbettkasten mit integrierten Referenzierungsrohren [Lerchen et al., 2021b], b) Technische Zeichnung der unteren Lagerhülle, c) Oberseite Referenzierungsrohr, d) Beleuchtete untere Lagerhülle

tigt waren. Die unteren Lagerbuchsen aus Bild 11 b) und d) wiesen zusätzliche Wälzlagerführungen auf. Durch eine punktwise vertikale Auflage der unteren Lagerhülle konnten geringe laterale Positionsabweichungen beim vertikalen Einsetzen der Rohre oder in Folge des Pulverauftrags kompensiert werden. Die Referenzierungsrohre verblieben während des schichtweisen Fertigungsprozesses und der Absenkung der Bauplattform immer auf gleicher Höhe, wurden zusätzlich lateral durch das umgebende Pulverbett gestützt und bei der Pulverbettabsenkung vertikal durch dieses geschoben. Eine Höhenjustierung im Vorfeld des Fertigungsprozesses war erforderlich, um eine Kollision mit dem Pulverauftragssystem während des Pulverauftrags zu verhindern und gleichzeitig möglichst wenig Pulver auf den sichtbaren Enden der Referenzierungsrohre zu erhalten. Sollten die Rohrenden aufgrund eines ungleichmäßigen Pulverauftrags nicht vollständig freigelegt sein, bestand weiterhin die Möglichkeit einer zusätzlichen Pulverentfernung mittels einer gerichteten Absaugung durch die Referenzierungsrohre. Eine in der Helligkeit einstellbare LED-Platine sorgte nach Bild 11 c) für eine Ausleuchtung

der Referenzierungsrohre, die zu einer Kontrastverstärkung am oberen Ende der Referenzierungsrohre führte. Die Höheneinstellung der Quarzglasrohre wurde durch exzentrische Schrauben in den Lagerhülsen realisiert, die über aufliegende Zylinderstifte die vertikale Position des Referenzierungsrohrs vorgeben. Mit Hilfe von Fühlerlehren konnte ein definierter Abstand von 20 µm zum Pulverauftragssystem eingestellt werden. Die vier Referenzierungsrohre im Pulverbett bildeten ein gemeinsames laterales Referenzsystem für die additiv gefertigten Bauteile im betrachteten Arbeitsbereich. [Hausotte, 2019; Lerchen et al., 2021b]

3.1.2 Prinzip zum Nachweis der Wiederholpräzision des Scanners

Scannerbedingte Fertigungsabweichungen können durch die mechanische Führung des Laserstrahls durch die Scannerspiegel verursacht werden. Sie sind nach *Moylan et al.* eine mögliche Entstehungsursache von Positionsungenauigkeiten des Schmelzbades im Pulverbett [Moylan et al., 2012]. Nur wenn jede Position in der ROI reproduzierbar und positionsgenau vom Galvanometer-Scanner angefahren werden kann, ist die Grundlage für den schichtweisen Aufbau maßhaltiger AM-Bauteile gegeben. Durch die Fokussierung einer koaxialen Kamera auf die Baufläche kann die aktuelle Position des Laserspots verfolgt werden [Kruth et al., 2009]. Weiterhin ist nach Bild 9 in Kombination mit dem Referenzierungssystem eine Beurteilung der Wiederholpräzision des Galvanometer-Scanners durch ein wiederholtes Anfahren der definierten Bauraumpositionen möglich. Unter der Wiederholpräzision wird dabei die Übereinstimmung von Messwerten aus wiederholten Messungen am gleichen oder ähnlichen Messobjekten verstanden, die in einer kurzen Zeitspanne mit einem vorgegeben Messverfahren, dem gleichen Bediener und Messsystem sowie unter gleichen Umgebungsbedingungen erfolgen [VIM, 2012]. Im Kontext der additiven Fertigung stellt die Wiederholpräzision somit ein Maß für die Kurzzeit-Wiederholbarkeit der Positionierung des Laserspots durch den Scanner dar. Bei sich ändernden Bedingungen über längere Messzeiträume, die beispielsweise neue Kalibrierungen, Bediener oder Messsysteme erfordern, ist weiterhin die Vergleichspräzision zu ermitteln [VIM, 2012].

Um die geforderten homogenen Umgebungsbedingungen zu überwachen, erfolgten prozessbegleitende Temperaturmessungen entlang des Messkreises in der Optikebene, an den Stativen des Galvanometer-Scanners und des koaxialen Kamerasystems (vgl. Abschnitt 4.2). Zeitgleich wurden die Enden der Referenzierungsrohre im Pulverbett erfasst, die mehrfach ohne einen Energieeintrag des Lasers angefahren wurden (vgl. Abschnitt 4.3.3). Basierend

auf den detektierten Schwerpunktverschiebungen der Referenzierungsrohre in den Kameraaufnahmen wurde auf den scannerbedingten Positionsversatz beim Energieeintrag während des Fertigungsprozesses rückgeschlossen (vgl. Abschnitt 6.3).

3.1.3 Prinzip zum Nachweis schichtweiser lateraler Konturverlagerungen

Das Referenzierungssystem kann weiterhin als Bezugssystem zum Nachweis schichtweiser lateraler Konturverlagerungen herangezogen werden. Die globale Erfassung des Schmelzbades samt den Referenzierungsrohren erfolgte mit Hilfe eines Schmelzbadkamarasystems, das nach Bild 9 durch ein Sichtfenster auf den Arbeitsbereich ausgerichtet wurde. Wenn sich der Querschnitt der AM-Bauteile nicht ändert und homogene Fertigungsbedingungen vorherrschen, bildeten die referenzierten Positionen der schichtweise detektierten Schwerpunkte der Schmelzbadkonturen ein weiteres Maß zur Beurteilung der Wiederholpräzision des Scanners. In diese Auswertung gingen jedoch erneut temperaturbedingte Messabweichungen ein, die aus einem Versatz des Kamerasystems relativ zum Messobjekt resultierten und bei der Analyse lateraler Konturverlagerungen berücksichtigt werden mussten. Zur Beurteilung der temperaturbedingten Lageabweichungen des Kamerasystems war deshalb eine wiederholte, prozessbegleitende Auswertungen des ausdehnungsarmen Referenzierungssystems erforderlich.

Der Nachweis resultierender fertigungsbedingter lateraler Konturverlagerungen wurde durch einen Abgleich der referenzierten Positionen der Schmelzbadkonturen nach dem Energieeintrag des Lasers und dem Pulverauftrag erbracht. Dazu war es notwendig, sowohl die Schmelzbadkontur unmittelbar nach dem Aufschmelzen zu erfassen, als auch die durchschimmernde Bauteilkontur durch die ca. 100 µm dicke PA12-Pulverschicht nach der Beschichtung. Durch den direkten Vergleich der referenzierten Positionen des Schmelzbades vor und nach dem Pulverauftrag konnte der mechanische Einfluss des Pulverauftragssystems als weitere Entstehungsursache lateraler Konturverlagerungen beurteilt werden. [Lerchen et al., 2021a]

3.2 In-Prozess-Messsysteme

Die Realisierung der *in-Prozess*-Fertigungsüberwachung bedarf einer auf die Fertigungsbedingungen im LBM-Prozess angepassten Auswahl an Messsystemen, die hinsichtlich ihrer messtechnischen Randbedingungen auf ihre zugehörigen Messaufgaben abgestimmt sind. Zur Umsetzung des Gesamtkonzeptes aus Bild 9 war neben kleinen anlagentechnischen Umbaumaßnah-

men eine entsprechende Integration zusätzlicher Messsysteme erforderlich. Neben der optischen Erfassung des Arbeitsbereiches sollte weiterhin eine präzise Messung der Pulverbettabsenkung ermöglicht sowie Temperaturdifferenzen entlang der Fertigungs- und Messkreise überwacht werden.

Eine Erweiterung mit zusätzlichen in den Strahlengang des Lasers integrierten Sensoren, wie beispielsweise Leistungsmesssystemen oder Fotodioden war für eine umfassende Prozessüberwachung zu empfehlen. Als Ergänzung zu diesen in der Literatur bereits ausführlich behandelten Messverfahren zur *in-Prozess*-Regelung des Energieeintrags des Lasers im LBM-Prozess (vgl. Abschnitt 2.4.2) soll in dieser Arbeit der Fokus jedoch gezielt auf die schichtweise, referenzierte Konturerfassung von geometrischen Fertigungs- und Messabweichungen gelegt werden.

3.2.1 Pulverbettabsenkung

Mit Hilfe zweier absoluter Winkelmessgeräte mit Eigenlagerung, die nach Bild 9 direkt unter der Bauplattform angebracht wurden, konnte die schichtweise Pulverbettabsenkung während des LBM-Prozesses und somit die eingestellte schichtweise Bauteilhöhe überwacht werden. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten unterhalb der Bauplattform wurden bei den vorliegenden Analysen zwei parallelgefederte Rotationsencoder-Messsysteme nach Bild 12 verbaut. Diese rollten entlang der Referenzierungsrohre 2 und 4 ab und ermöglichten eine Messung der vertikalen Bewegung der Pulverbettplattform. Da die ausdehnungsarmen Referenzierungsrohre nach ihrer Justierung auf Pulverbethöhe in ihrer vertikalen *z*-Position auf konstanter Höhe verblieben (vgl. Unterabschnitt 3.1.1.2), konnte mit Hilfe der Encoder eine präzise Überprüfung der maschinenseitig eingestellten Absenkung der Bauplattform in *z*-Richtung erfolgen.

Die verwendeten Encoder-Messsysteme der Heidenhain-Modellreihe RCN 2510 wiesen eine Systemgenauigkeit von $\pm 2,5 \text{ } \mu\text{m}$ bei einer Auflösung von 28-bit Positionswerten pro Umdrehung auf. Dies entsprach, unter Einbeziehung der in Abschnitt 4.1 ermittelten Abrolldurchmesser der auf den Encoderwellen aufgebrachten O-Ringen einer Auflösung des Encodersystems von ca. $0,2 \text{ nm}$ [Heidenhain, 2015]. Die Hohlwellen der eigengelagerten Rotationsencoder rollten auf, in Nuten eingebrachten O-Ringen mittig entlang der Referenzierungsrohre ab. Um Abweichungen durch die Anpresskraft der parallelgefederten Encoderwellen auf die Quarzglasstäbe zu kompensieren und dadurch resultierende Messabweichungen zu vermeiden, wurde je eine weitere Gegenrolle mit Parallelfederung gleicher Federsteifigkeit vorgesehen.

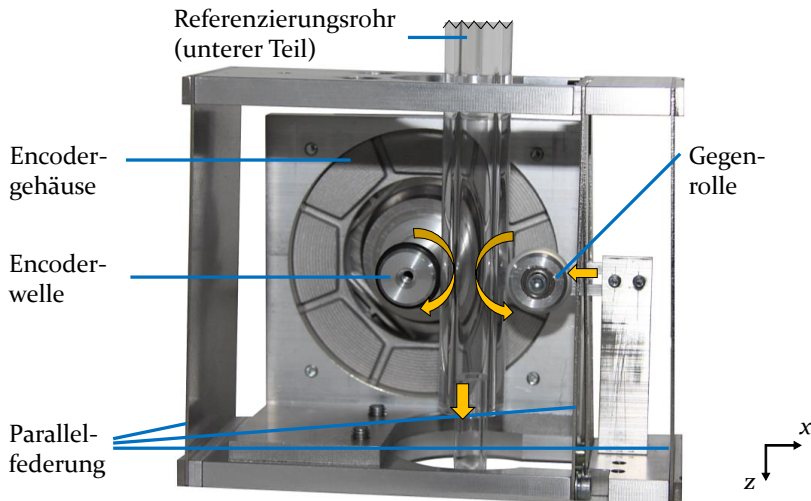


Bild 12: Parallelgefedertes Rotationsencoder-Messsystem am Referenzierungsrohr (Ref. 2) zur Analyse der Pulverbettabsenkung (im nicht eingebauten Zustand)

3.2.2 Temperatur

Die prozessbegleitende Überwachung und Steuerung der Anlagentemperatur erfolgte durch eine auf die Baufläche ausgerichtete, gekühlte Thermografiekamera IRCAM Millenium 1310k M pro [IRCAM, 2014]. Die Kalibrierung der IR-Thermografiekamera wurde von *Laumer et al.* mit Hilfe von Thermoelementen durchgeführt [Laumer et al., 2014]. Dabei wurde auch der Emissionskoeffizient $\varepsilon(t)$ des verwendeten PA12 Pulvers bestimmt und am Messsystem eingestellt. Da lokale temperaturbedingte Abweichungen des Schmelzbades innerhalb der Baukammer als beherrschbare Entstehungsursachen von Fertigungsabweichungen bereits ausführlich in der Literatur analysiert wurden (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.5), liegt der Fokus in dieser Arbeit auf zusätzlichen thermischen Messungen entlang der Fertigungs- und Messkreise außerhalb der beheizten LBM-Prozesskammer. Infolge der Aufheizphase und inhomogenen, prozessbegleitenden Temperaturschwankungen konnte es nicht nur zur direkten Beeinflussung der Messsysteme kommen, sondern auch zu temperaturbedingten Längenänderungen des Anlagerahmens und der daran befestigten Stative der Messsysteme. Um die dadurch verursachten temperaturbedingten Messabweichungen durch relative Lageänderungen der Messsysteme zu den Messobjekten besser abschätzen zu können, wurden zusätzliche Platin-Widerstandsthermometer (Pt100) entlang der Fertigungs- und Messkreise angebracht (vgl. Abschnitt 4.2). Die bis zu einer Temperatur von 260 °C beständigen Pt100-Oberflächenfühler der Klasse A wurden in einer Vierleiterschaltung mit einem Datenlogger (Schaltssystem Keysight

34972A + 20-Kanal-Multiplexer Modul 34901A) verbunden, um vor allem den temperaturabhängigen Kabelwiderstand der 3 m langen Zuleitungen nicht mit zu messen [Otom, 2020].

3.2.3 Aufschmelzen und Schmelzbad

Zur Erfassung und Analyse des Aufschmelzvorgangs sowie des resultierenden Schmelzbades eigneten sich beim LBM besonders optische *in-Prozess*-Messsysteme (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.3). Diese wurden hermetisch von der Baukammer entkoppelt in der Optikebene verbaut, um eine Pulverkontamination größtenteils zu verhindern. Allerdings resultierten im vorliegenden Fall aufgrund der ca. 600 mm langen Messstrecken vom Sensor bis zur Pulverbettoberfläche und den Umgebungsbedingungen weitere Anforderungen an die verwendeten Messsysteme [Schmid, 2015b]. Dazu zählten neben rein optischen Anforderungen wie beispielsweise dem Auflösungsvermögen, der Brennweite und Fokussierung unter anderem auch die Temperaturbeständigkeit sowie die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren, die die Auswahl eines geeigneten *in-Prozess*-Kamerasystems erschwerten. Im folgenden Unterabschnitt wurden deshalb anhand eines Vorversuches die auftretenden Strahlungsintensitäten und Wellenlängenspektren der im LBM-Prozess analysiert, die die Kamerasysteme beeinflussten. Neben einer koaxial im Strahlengang des Lasers integrierten Kamera zur Beurteilung der Wiederholpräzision des Scanners wird weiterhin ein Fotogrammetrie-Kamerasystem zur Erfassung des Schmelzbades vorgestellt.

3.2.3.1 Vorversuch zur Analyse prozessbedingter Strahlungsintensitäten und Wellenlängenspektren

Um abgesehen von den Anforderungen an das Auflösungsvermögen und die Temperaturbeständigkeit eine Auswahl für die optischen *in-Prozess*-Messsysteme treffen zu können, war auch die spektrale Empfindlichkeit der Kameras geeignet zu wählen. Weiterhin war zu prüfen, inwieweit die Kamerasensoren gegen eine erhöhte Strahlungsintensität geschützt werden müssen. Dazu waren genaue Kenntnisse über die emittierten und reflektierten Wellenlängenspektren sowie deren Strahlungsintensitäten während des LBM-Prozesses erforderlich.

Deshalb wurde zunächst das vom IR-Heizsystem emittierte Wellenlängenspektrum unter Prozessbedingungen im Bauraum mit Hilfe eines Spektrometers (CCS200 der Firma Thorlabs) bestimmt. Nach der spektroskopischen Auswertung in Anhang A.1 lag das Wellenlängenspektrum im sichtbaren roten und nahen infraroten Bereich. Die emittierte Strahlungsintensität war sehr gering und daher unschädlich für die Kamerasysteme.

Eine weitere vom Kamerasystem detektierte Strahlung stammte von der diffus streuenden Laserstrahlung, die von der Pulverbettebene reflektiert wurde. Um diese, mit einer Laserleistung von $P = 50 \text{ W}$ eingebrachte, relativ energiearme Strahlung mit einer Wellenlänge $\lambda_{\text{CO}_2} = 10,6 \mu\text{m}$ und einer Wellenzahl $\nu = 1/\lambda_{\text{CO}_2} = 943 \text{ cm}^{-1}$ [Schmid, 2015a] auch im Hinblick auf eine mögliche Beschädigung der Kamerasensoren besser abschätzen zu können, wurde ein Vorversuch mit sogenannten Ulbricht-Kugeln nach [DIN 5036-3: 1979-11] durchgeführt. Dazu wurde ein Laserstrahl nach Bild 13 auf eine dünne, auf einen Probehalter aufgebrachte Pulverschicht geführt. Anhand der gemessenen Strahlungsanteile aus den goldbeschichteten sphärischen Kugeln wurden die optischen Eigenschaften des Werkstoffes infolge der Laser-Pulver-Interaktion bestimmt. Dabei konnte aus dem reflektierten Anteil der Laserstrahlung, die unter einem Winkel von 8° auf die diffus streuende Pulverschicht traf, die Reflexionsrate R_r im Vergleich zu einer Referenzmessung mit eingelegtem Goldspiegel ($R_{\text{Au}} > 98\%$) bestimmt werden. Weiterhin ermöglichte eine zweite Ulbricht-Kugel auch den transmittierten Strahlungsanteil der Laserstrahlung zu ermitteln, der durch die Pulverschicht gelangte. Dieser war abhängig von der Pulverkorngößenverteilung, Schichtdicke und Verdichtung des Pulvers. Durch einen Abgleich mit einem Referenzwert ohne eingelegten Probehalter, ließ sich damit die Transmissionsrate T_r bestim-

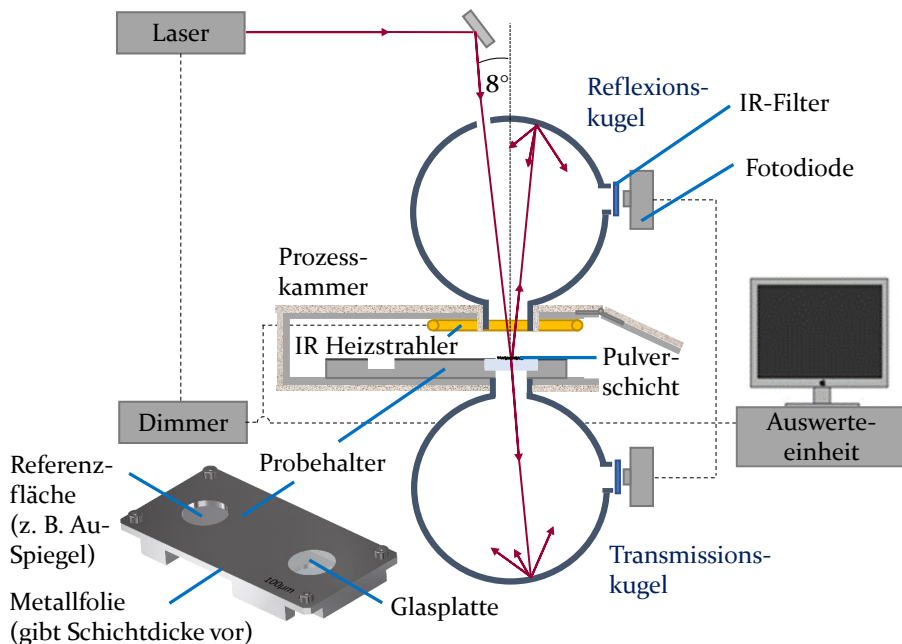


Bild 13: Ulbricht-Kugel-Messaufbau zur Analyse der aggregatzustandsabhängigen, optischen Werkstoffigenschaften [Heinl et al., 2018b]

men. Nach dem Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz aus Gleichung 3.2.1 konnte anhand der generierten Messwerte die vom PA₁₂-Pulver absorbierte Strahlung A_r des Lasers berechnet werden. [Schmid, 2015a; Laumer et al., 2016]

$$A_r = 1 - R_r - T_r \quad (3.2.1)$$

Um mit Hilfe des Ulbricht-Kugel-Messaufbaus eine bessere Vergleichbarkeit mit realen Fertigungsbedingungen beim LBM zu erzielen, wurde in Ergänzung zu [DIN 5036-3:1979-11] um den Probehalter eine zusätzliche beheizbare Prozesskammer angebracht. Dadurch konnten auch die aggregatzustandsabhängigen optischen Eigenschaften über den gesamten temperierten Fertigungsprozess von der Aufheiz- bis zur Abkühlphase ermittelt werden [Heinl et al., 2018b]. Die Reflexionsrate R_r fiel bei einer Wellenlänge λ_{CO_2} von 10,6 μm bei der Analyse einer einzelnen 100 μm dicken Pulverschicht in Bild 14 a) mit ca. 4 % temperaturunabhängig gering aus und war aggregatzustandsunabhängig nahezu konstant. Nur ein für den Kamerasensor unkritischer Bruchteil der Laser-Strahlung wurde zum Kamerasystem gestreut. Beim Übergang des pulverförmigen Werkstoffes in den schmelzförmigen Zustand war hingegen ein deutlicher Anstieg der Transmissionsrate T_r zu verzeichnen. Dieser führte zu einem Eindringen des Lasers in tiefere Pulverschichten. Nach dem anfänglich hohen Absorptionsgrad A_r des PA₁₂-Pulvers ließ sich nach dem Phasenübergang in den schmelzförmigen und nachfolgend wieder festen Aggregatzustand eine deutlich geringere Absorptionsrate des Werkstoffes feststellen. Bei dicken Pulverschichten im LBM-Fertigungsprozess kann die

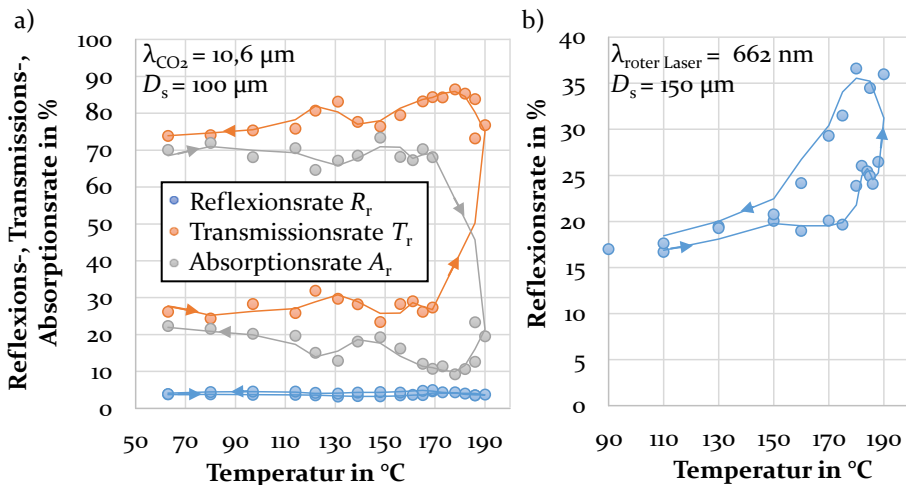


Bild 14: Analyse der optischen Eigenschaften des PA₁₂-Werkstoffes unter realen Prozessbedingungen mit einem a) 10,6 μm – Laser, b) roten Laser [Heinl et al., 2018b]

Absorptionsrate aufgrund der guten Einkopplung der 10,6 μm -Strahlung in das Pulver über 90 % betragen [Kaddar, 2010].

Um weiterhin den Einfluss der sichtbaren, im Rahmen der Spektroskopie detektierten Umgebungsstrahlung auf die optische Bildgebung zu spezifizieren, wurde zusätzlich die Reflexionsrate eines roten Lasers (vgl. Bild 14 b)) analysiert. Der 662 nm-Laser wurde auf eine 150 μm dicke Pulverschicht fokussiert, die im vorliegenden Fall der maximalen Eindringtiefe des roten Lichts entsprach. Bei dieser Wellenlänge konnte insgesamt eine erhöhte Reflexionsrate R_r im Vergleich zur 10,6 μm -Strahlung beobachtet werden. Bei der Phasenumwandlung des festen zum flüssigen Aggregatzustand nahm die Reflexion der spiegelnden Schmelze kurzfristig auf ca. 35 % zu. Übertragen auf den LBM-Fertigungsprozess bedeutete das, dass es bei der Phasenumwandlung des PA12-Pulvers zu kurzfristigen gerichteten Reflexionen kommen konnte, die hauptsächlich durch die Heizstrahler verursacht wurden. Da die in situ-Erfassung der Schmelzbadkonturen jedoch immer in einem festgelegten Zeitintervall zwischen 5 s – 10 s nach dem Energieeintrag erfolgte (vgl. Abschnitt 6.4.2), in dem ein vergleichbarer schmelzförmiger Aggregatzustand vorlag, war mit einem vernachlässigbaren Einfluss der reflektierten Strahlung bei der Konturauswertung zu rechnen.

Abschließend wurde die emittierte Wärmestrahlung des Schmelzbades bei einer Schmelztemperatur ϑ_m von 185 °C ($T_m \approx 458$ K) als weiterer Strahlungseinfluss betrachtet. Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz in Gleichung 3.2.2 trat die ermittelte Wellenlänge mit maximaler Lichtintensität λ_{max} bei 6,33 μm und somit im mittleren Infrarotbereich auf.

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897,8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{T_m} \quad (3.2.2)$$

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde versucht, durch eine geeignete Wahl des Messspektrums der Kamerasysteme eine Beeinflussung der optischen Messung durch die emittierte IR-Wärmestrahlung gering zu halten. Der sichtbare Anteil der Wärmestrahlung der Schmelzbadkonturen durch dünne Pulverschichten konnte darüber hinaus aber auch zum Nachweis schichtweiser Konturverlagerungen genutzt werden (vgl. Abschnitt 3.1.3). Im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführung wurden Kamerasysteme eingesetzt, die sensitive Spektren zwischen ca. 600 nm – 1 μm aufweisen, um die Schmelzbadkontur umfassend zu analysieren.

3.2.3.2 Koaxiale Kamera

Basierend auf Voruntersuchungen des vorausgegangenen Abschnitts wurde eine monochrome, 1,3 Megapixel Hochgeschwindigkeitskamera (CL 600 x 2/ M) der Firma Optronis mit einer Pixelgröße von $14\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m}$ als koaxiale Kamera ausgewählt [Optronis, 2010]. Ein Makro-Objektiv ermöglichte die Fokussierung auf die Baufläche. Die Kamera wurde in der Optikebene mittels eines für IR-Strahlung transparenten und für sichtbares Licht reflektierenden Strahlkombinierers in den Strahlengang des Lasers integriert (vgl. Bild 15). Die von der Baufläche reflektierte Strahlung konnte bei ausreichender Beleuchtung mit Hilfe der Kamera über den Galvanometer-Scanner erfasst werden (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.3). Die Bildinformationen konnten weiterhin zur *in-Prozess*-Erfassung des Laserspots mit einer Bildfrequenz von bis zu 500 fps eingesetzt werden. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde die koaxiale Kamera jedoch zur Beurteilung der Wiederholpräzision des Galvanometer-Scanners verwendet (vgl. Abschnitt 3.1.2). Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse in der Optikebene wurde die Kamera direkt hinter dem Galvanometer-Scanner verbaut. Dadurch resultierte eine Strecke entlang des Scanner-geführten Strahlengangs bis zum Pulverbett von insgesamt 1000 mm. Durch den Abstand zur beheizten Prozesskammer war keine zusätzliche Kühlung der koaxialen Kamera erforderlich (vgl. Unterabschnitt 6.2.1.2). Ein zusätzlicher, auf das Objektiv geschraubter Bandpassfilters (BP-540-300 HT) wurde jedoch benötigt, um den sensitiven Kamerasensor vor der IR-Strahlung zu schützen.

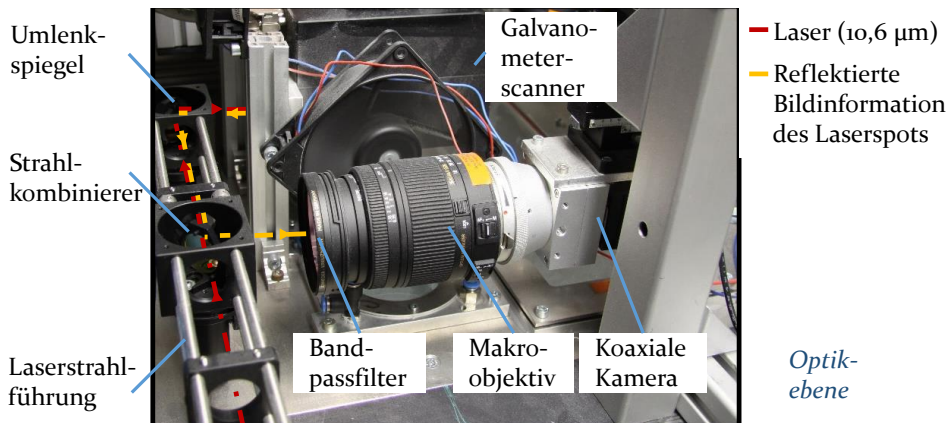


Bild 15: Integration der koaxialen Kamera in optischen Strahlengang

3.2.3.3 Schmelzbad- bzw. Fotogrammetriekameras

Zusätzlich zur koaxialen Kamera diente ein Fotogrammetriesystem der globalen Erfassung des 150 mm x 170 mm großen Arbeitsbereiches (ROI) samt der referenzierten Schmelzbadkonturen. Bei den im Folgenden bezeichneten Schmelzbadkameras handelt es sich um zwei monochrome, hochauflösende 26 Megapixel Stereovisionssysteme (Genie NanoXL-M5100) mit einer Pixelgröße von $4,5\ \mu\text{m} \times 4,5\ \mu\text{m}$ und einer resultierenden lateralen Auflösung von ca. $27\ \mu\text{m}$ auf dem Pulverbett. Die Kameras wurden nach Bild 16 a) über ein Sichtfenster unter einem Betrachtungswinkel von 18° auf das Pulverbett ausgerichtet. Sie wiesen eine Temperaturbeständigkeit bis $60\ ^\circ\text{C}$ sowie eine spektrale Empfindlichkeit zwischen $300\ \text{nm} - 1100\ \text{nm}$ auf [Stemmer, 2016]. Aufgrund der geringen, diffus streuenden, detektierten Strahlung des Lasers aus Bild 14 a) war für diese Kameras kein zusätzlicher Schutz durch ein IR-Sperrfilter erforderlich. Um im Rahmen der *in situ*-Messdatenerfassung (vgl. Abschnitt 4.3.4) die Baufläche mit einer entsprechenden Schärfentiefe erfassen zu können, wurden nach Bild 16 b) die Makro-Objektive (en-Zeiss Interlock 2/50) mit zusätzlichen *Tilt-Shift*-Adaptoren ausgestattet. Durch eine Schrägstellung der Sensoren der Kameras konnte damit das Scheimpflug Prinzip realisiert werden, was es ermöglichte, eine Anpassung der achsfernen Schärfentiefen vorzunehmen [Scheimpflug, 1904]. Weiterhin konnte dadurch eine Fokussierung der Messobjekte in der betrachteten Baufläche, nahezu unabhängig von deren Abstand zur Kamera, gewährleistet werden [Zur Jacobsmühlen et al., 2013].

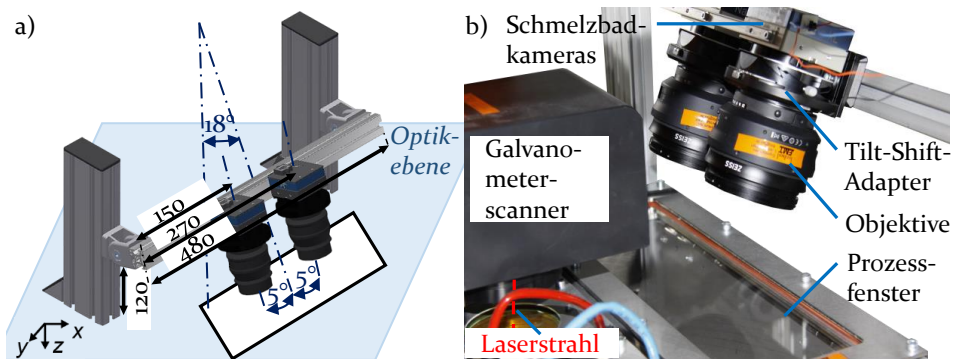


Bild 16: Schmelzbadkameras a) prinzipieller Aufbau mit Abmaßen (in mm), b) realer Aufbau in LBM-Fertigungsanlage [Heinl et al., 2018a]

4 Versuchsdurchführung

Nachdem die einzelnen Messsysteme vorgestellt und entsprechend des Messkonzeptes zur *in-Prozess*-Überwachung nach Bild 9 in die EOSINT P380-Forschungsanlage integriert wurden, konnten Messdaten während des LBM-Prozesses erhoben werden. Für jedes Messsystem wurden zunächst Kalibrier- bzw. Referenzmessungen durchgeführt, die für die Versuchsdurchführung und nachfolgende Auswertungen der aufgezeichneten Messdaten erforderlich waren. Bei der Messung der Pulverbettabsenkung und der thermischen Analyse entlang der Fertigungs- und Messkreise erfolgte eine kontinuierliche *in-Prozess*-Überwachung. Die koaxiale Kamera wurde hingegen zur *in situ*-Erfassung der Positionen der im Pulverbett integrierten Referenzmarker im Bauraum zum Nachweis der Wiederholpräzision des Scanners, verwendet. Einzelne, schichtweise aufgezeichnete Bilder der Baufläche wurden zudem von den Schmelzbadkameras in den Prozessnebenzeiten aufgenommen, die die Grundlage der anschließenden Konturauswertung bilden.

4.1 Messung der Pulverbettabsenkung

Bei der Messung der Pulverbettabsenkung mit Hilfe der Rotationsencoder (vgl. Abschnitt 3.2.1) wurden die Encoderpositionen kontinuierlich erfasst. Jedoch waren nur die in regelmäßigen Abständen erfolgenden Messwertänderungen für die Auswertung relevant, da diese den durchgeführten Schichtabsenkungen entsprachen. Für die Umrechnung der reibungsbedingten Drehbewegung der Encoderwellen in eine entsprechende Längenbewegung der Bauplattform in z-Richtung waren zudem Kenntnisse über den abgerollten Umfang erforderlich. Um den Umfang der in einer Nut auf den Encoderwellen eingebrachten O-Ringe zu bestimmen und zugleich den Einfluss der Verkipfung der Pulverbettplattform beurteilen zu können, wurde in einem Vorversuch eine Referenzmessung durchgeführt. Diese erfolgte mit Hilfe eines hochauflösenden, interferometrischen Messtasters (LM 20/50), mit einer Auflösung von 0,1 nm an 5 verschiedenen Messstellen im Arbeitsbereich zwischen den Referenzierungsrohren [SIOS Meßtechnik GmbH, 2018]. Die Messpositionen befanden sich im Zentrum des Bauraums, an den Referenzrohren (Ref. 2 und Ref. 4), an denen auch die Encoder-Messsysteme angebracht waren sowie an der Vorder- und Hinterseite der ROI. Insgesamt wurden in diesem Vorversuch an jeder Position jeweils 24 Messungen bei einer eingestellten Absenkung der Bauraumplattform von 100 µm durchgeführt. Wie aus der Varianzanalyse und anschließenden Boxplotauswertung des Vorversuches aus Anhang A.2 hervorgeht, konnte über alle 120 Messdaten der Referenzmessung eine durchschnittliche Absenkung von 97,186 µm beob-

achtet werden. Somit wurde eine prozessbedingte Schichtdickenabweichung von ca. 3 % nachgewiesen. Zwar konnten im Zentrum der Bauplattform geringfügig kleinere Absenkungen gemessen werden als an den Randbereichen des Arbeitsbereiches, insgesamt lag jedoch (mit $p > 0,05$) keine signifikante Mittelwertverschiebung zwischen den Messpositionen vor. Bei der zentrumsnahen Längenmessung der Bauplattformabsenkung entlang der Referenzierungsrohre konnte somit davon ausgegangen werden, dass die Beeinflussung des analysierten Arbeitsbereiches durch eine Verkippungen der Bauplattform gering ausfiel. Weiterhin konnte mit Hilfe der hochauflösenden Interferometermessung und der zeitgleichen Erfassung der Encoder-Messdaten eine Kalibrierung der Rotationsencoder erfolgen. Die Abrolldurchmesser der O-Ringe betragen nach der Referenzmessung $D_{oEnc.1} = 21,039$ mm bzw. $D_{oEnc.2} = 20,746$ mm. Auf Grundlage dieser Referenzwerte wurden mit Hilfe der schichtweisen Auswertung der Encodermessdaten die entsprechenden Pulverbettabsenkungen in z-Richtung ermittelt (vgl. Abschnitt 6.1). Dabei wurden Messdaten zu den Zeitpunkten der Bauraumabsenkung von 20 Messreihen mit jeweils zehn Pulverbettabsenkungen von 100 μm während des LBM-Prozesses erhoben.

4.2 Temperaturmessung entlang der Fertigungs- und Messkreise

Der Temperatureinfluss entlang der einzelnen Elemente der Fertigungs- und Messkreise führte teilweise zu einer Drift des Kamerakoordinatensystems bzw. Bildkoordinatensystems relativ zum Maschinenkoordinatensystem, was Temperaturmessung mit den Pt100-Sensoren (vgl. Abschnitt 3.2.2) notwendig machte [Cooke et al., 2011]. Um den temperaturbedingten Einfluss in Folge der Aufheizung der Anlage besser beurteilen zu können, erfolgte die Messung über einen Zeitraum von 3 Stunden während des LBM-Fertigungsprozesses. Dabei wurde die Temperatur kontinuierlich über alle Phasen des Aufheizprozesses von Raumtemperatur bis hin zur eigentlichen Bauphase bei einer annähernd konstanten Prozesstemperatur von ca. 168 °C überwacht. Die prozessbedingten Temperaturänderungen wurden am Anlagerahmen sowie an den Messsystemen und zugehörigen Stativen der Schmelzbadkameras, des Scanners und der koaxialen Kamera in der Optikebene erfasst. Unterhalb der Baukammer erfolgte die Temperaturerfassung an den Encoder-Messsystemen und der Aufhängung der Antriebseinheit des Pulverbettkastens. Um weiterhin einen Zusammenhang zur Bauraumtemperierung und inhomogenen Temperaturschwankungen während der Bauphase herstellen zu können, wurde eine weitere *in-Prozess*-Messung mittels eines freischwebenden Platin-Widerstandsthermometers im Bauraum durchgeführt. Die erhobenen Tem-

peraturmessdaten wurden somit lokal entlang der in Bild 9 dargestellten Messkreise erfasst, um die Entstehungsursache detektierter geometrischer Abweichungen genauer spezifizieren zu können.

4.3 Optische in situ-Messung der Baufläche

Da für eine realitätsnahe Kontur- und Referenzauswertung der aufgezeichneten optischen Messdaten eine entsprechend gute Bildqualität erforderlich ist, musste bei der Durchführung der optischen Messungen besonders auf eine möglichst homogene Beleuchtung geachtet werden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde im Anschluss an die Justierung und Fokussierung der Kamerasysteme auf die Baufläche ein zusätzliches Beleuchtungssystem in die Baukammer integriert. Dieses sollte für eine gerichtete homogene Bauraumausleuchtung während der Messdatenerfassung sorgen. Es folgte eine Kalibrierung der einzelnen Kamerasysteme, die die Grundlage für die anschließende verzerrungskorrigierte Darstellung der skalierten Messobjekte bildete. Dadurch wurde erst eine Auswertung geometrischer Längenabweichungen möglich. Mit Hilfe der Messdatenerfassung der wiederholt angefahrenen Positionen des Referenzierungssystems durch die koaxiale Kamera konnte weiterhin die Wiederholpräzision des Scanners nachgewiesen werden. Die schichtweise *in situ*-Konturerfassung der additiv gefertigten Schmelzbadkonturen im Arbeitsbereich zwischen den Referenzierungsrohren diente abschließend als Datengrundlage für den Nachweis lateraler, prozessbedingter Konturverlagerungen.

4.3.1 Anpassung der Szenen durch Beleuchtungssysteme

Intensitätsschwankungen des IR-Heizsystems führten zu einer inhomogenen Ausleuchtung des Bauraums während des LBM-Prozesses. Aufgrund der dadurch verursachten ungleichmäßigen Objektausleuchtung und dem Messrauschen war für die optische *in-Prozess*-Überwachung eine Anpassung der Szenen durch zusätzliche Beleuchtungssysteme erforderlich.

Nach *Cooke et al.* bedarf eine solide bildgebende Konturauswertung eines kontrastreichen, scharfen Übergangs zu beiden Seiten der interessierenden Kontur zur Umgebung [Cooke et al., 2011]. Um eine kontrastreiche Messobjektdarstellung zu einem möglichst homogenen Bildhintergrund zu erreichen, war eine vollständige Ausnutzung des Quantisierungsbereiches zu empfehlen. Die Grauwerte der erfassten Bildpixel sollten sich dabei auf das gesamte 8-bit schwarz-weiß Spektrum der 255 Graustufen erstrecken, wodurch eine bessere Abgrenzung charakteristischer Grauwertpeaks des Messobjektes zur Umgebung möglich wurde. [Neumann, 2005] Zahlreiche Publika-

tionen haben zudem bestätigt, dass eine breite Grauwertverteilung durch zusätzliche Beleuchtungssysteme zu realitätsnahen Ergebnissen bei der Kantendetektion des Schmelzbades beitrug [Lott et al., 2011, Caltanissetta et al., 2018, Zur Jacobsmühlen et al., 2019]. Durch die Verwendung unterschiedlicher Beleuchtungssysteme zur direkten Ausleuchtung des Schmelzbades konnte eine deutliche Verbesserung des Kontrastes zum umgebenden Pulverbett der unterschiedlichen AM-Prozesse nachgewiesen werden. Wie sich weiterhin in Vorversuchen von *Heinl et al.* zeigte, führte eine externe Beleuchtung mit Weißlicht zu guten Ergebnissen bei der Konturanalyse von AM-Bauteilen [Heinl et al., 2018a]. Deshalb wurden im Rahmen der *in-Prozess-Überwachung* beim LBM-P drei Weißlichtquellen in die Seitenwände der Prozesskammer integriert. Deren Lichtleiter wurden zueinander mit einem Winkel von 120° angeordnet und waren mit einem Winkel von ca. 45° auf das Zentrum des Pulverbettes ausgerichtet. Bei den Lichtleitern handelte es sich um temperaturbeständige Glasfasern, die mit Hilfe von Fokussierlinsen ein gerichtetes Auflicht mit einer Lichtleistung von 700 lm auf der Pulverbettebene ermöglichten. Durch die Mehrfachbeleuchtung von den verschiedenen Seiten konnten kontrastreiche Konturbilder mit scharfen Übergängen zwischen der diffus streuenden, homogen ausgeleuchteten Pulverbettsoberfläche und den gerichtet reflektierenden Schmelzbadkonturen erzeugt werden. Eine Über- bzw. Unterbelichtung der spiegelnden Schmelzbadkonturen sollte aufgrund sonst entstehender unerwünschter Messartefakte weitestgehend zu vermeiden, da diese zu Abweichungen bei der Kantendetektion führten. [Neumann, 2005, Hartmann et al., 2012]

Zwar ermöglichte die gerichtete Ausleuchtung eine annähernd homogene Helligkeitsverteilung im Messbereich des betrachteten LBM-Prozesses, allerdings ließ sich nach der Auswertung der Grauwertverteilung in Bild 17 a) immer noch ein Helligkeitsabfall vom Bauraumzentrum zu den Bildrändern verzeichnen. Dieser Helligkeitsabfall wurde durch die Defokussierung des Lichts weg vom Bauraumzentrum verursacht. Ein vergleichbares optisches Problem, das in der Bildgebung auch als *Vignettierung* bekannt ist, tritt vor allem bei Weitwinkelobjektiven auf [Szeliski, 2010]. Da im vorliegenden Fall im Zentrum des Arbeitsbereiches jedoch eine nahezu gleichmäßige Grauwertverteilung des ausgeleuchteten PA12-Pulvers vorlag, war nach den Bildern 17 a) und b) eine ausreichend gute Abgrenzung zu den Schmelzbadkonturen in der ROI gegeben.

Neben der globalen Ausleuchtung durch das Weißlicht ermöglichte auch die zusätzliche LED-Beleuchtung der Referenzierungsrohre (vgl. Unterabschnitt 3.1.1.2) einen besseren Kontrast der Referenzmarker zur Umgebung. Nach der Helligkeitsauswertung in Bild 17 setzten sich die Referenzierungs-

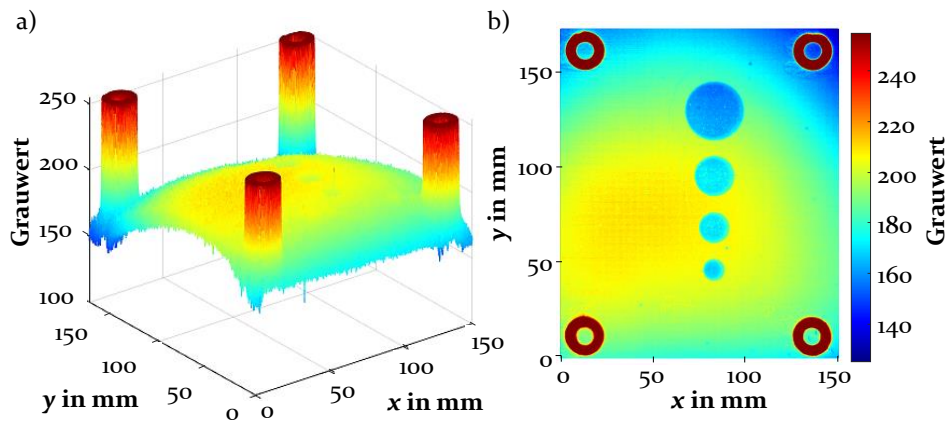


Bild 17: Auswertung der Ausleuchtung des Arbeitsbereiches (ROI) der Baufläche mit Grauwertverteilung in a) 3-D-Darstellung b) x-y-Baufläche

rohre in den Randbereichen der ROI deutlich vom Hintergrund ab, was die Grundlage für die Konturauswertung bildete.

Zusätzlich zur Bauraumbeleuchtung, die zu einer besseren Bildqualität bei der optischen Messdatenerfassung führte, ist für die Konturauswertung eine Kontrastanpassung im Rahmen der Bildaufbereitung zu empfehlen (vgl. Abschnitt 5.1.2).

4.3.2 Kamerakalibrierung und Bildskalierung

Nachdem die Lichtverhältnisse angepasst und die Kamerasysteme für die optische Messdatenerhebung möglichst positionsstabil an Stativen in der Optikebene befestigt wurden, galt es, durch eine Kamerakalibrierung die genaue Lage der Sensoren zu der Messebene zu ermitteln. Zudem wurde das erfasste Messobjekt in globale Weltkoordinaten überführt und grundlegende Kameraparameter für die perspektivische Korrektur abgeleitet. Um dies zu gewährleisten, waren im Vorfeld des AM-Prozesses Kalibriermessungen für die verwendeten Messsysteme erforderlich. Diese sollten vorzugsweise bei Betriebstemperatur stattfinden, um möglichst geringe temperaturbedingte Lageabweichungen der kalibrierten Positionen des Messsystems bei der anschließend durchgeführten Messung zu erhalten [Hartmann et al., 2012]. Da eine Kalibrierung bei einer Bauraumtemperatur von ca. 168 °C während des LBM-P-Prozesses nur bei geöffnetem und dadurch inhomogen temperierten Bauraum mittels eines temperaturstabilen Kalibriermusters möglich war, erfolgte die Kalibrierung der Kamerasysteme, wie standardmäßig üblich, bei Raumtemperatur. Dadurch wurde eine systematische Kali-

brierabweichung in Kauf genommen, die am Ende dieses Abschnitts näher betrachtet wird.

Als Kalibriermuster wurde das in Bild 18 dargestellte Schachbrettmuster verwendet. Prinzipiell kommen für vergleichsweise Kalibrierungen auch oft strukturierte Kalibrierobjekte wie Punkt- oder mehrskalige, merkmalsbasierte Kalibriersysteme (z. B. mit Buchstabenzyklindern) zum Einsatz [Zhang, 2000; Cooke et al., 2011; B. Li et al., 2013; Loderer, 2017]. Von dem jeweiligen Kalibriermuster sollten nach Empfehlungen von *Bouguet* Bilder in verschiedenen Lagen und Orientierungen im Messraum aufgezeichnet werden, wobei mindestens 10 – 20 Aufnahmen für eine entsprechend gute Kalibrierqualität erforderlich waren. Die Kalibrierbilder wurden in einem nächsten Schritt, je nach verwendetem Kamerasystem, durch die „(Stereo) Camera Calibration“ der Computer Vision Toolbox von MATLAB ausgewertet [Bouguet, 2015]. Hierbei konnten die extrinsischen und intrinsischen Kalibrierparameter entsprechend der detektierten Positionen der erfassten Bildmerkmale zum Kamerasystem abgeleitet und dadurch die relative Lage und Orientierung des Kalibrierusters zum Kamerasystem bestimmt werden.

Bei der durchgeführten Kalibrierung mit Hilfe des Schachbrettmusters wurden in jedem Bild die Stützpunkte zwischen den kontrastreichen, 10 mm breiten Kacheln von jeweils vier benachbarten Quadraten nach Bild 18 a) erfasst. Das 3-D-Kamerakoordinatensystem $[X_K Y_K Z_K]^T$ wurde für jedes Bild mittels einer euklidischen Transformation in ein 3-D-Weltkoordinatensystem $[X_W Y_W Z_W]^T$ überführt. Der Ursprung des jeweiligen Bildkoordinatensystems befand sich dabei standardmäßig in der linken oberen Bildecke. Grundlage für die Bildtransformation bildeten die extrinsischen Kennwerte, die durch den 3×1 -Translationsvektor \underline{t} sowie der rotatorischen 3×3 -Matrix \underline{R} beschrieben werden. In die rotatorische Matrix \underline{R} gingen weiterhin die entsprechenden Drehwinkel um die einzelnen Rotationsachsen ein. Eine per-

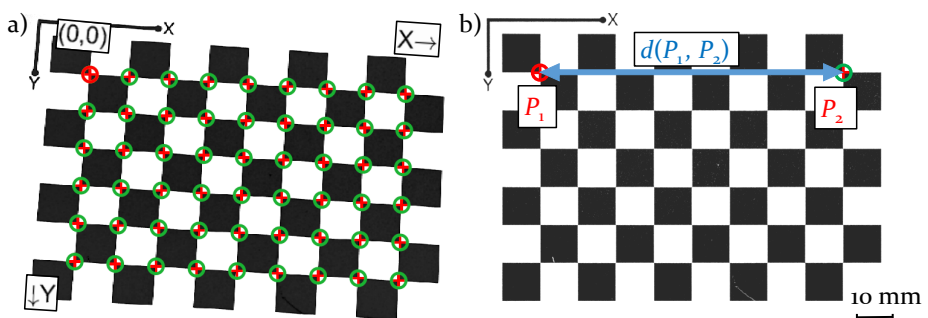


Bild 18: Kalibrierung mittels Schachbrettmuster durch a) Erfassung der Stützpunkte, b) Ausrichtung, perspektivische Korrektur und Längenzuordnung durch Messen im Bild

spektivische Transformation in die zugehörigen, mit dem Faktor w skalierten 2-D-Bildpunkte $[x \ y]^T$, erfolgte nach Gleichung 4.3.1 mit Hilfe der intrinsischen Matrix \underline{K} . Neben den Fokusslängen f_i und dem Scherfaktor k_s der Bildachsen wurde die intrinsische Matrix \underline{K} durch die Verschiebungsvektoren $[u_o, v_o]^T$ zum Bildkoordinatenursprung charakterisiert. [Heikkilä et al., 1997; Zhang, 2000; Schreer, 2005; Bouguet, 2015]

$$w \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \underline{K} [\underline{R} \ \underline{t}] \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \text{mit } \underline{K} = \begin{bmatrix} f_x & k_s & u_o \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

Anhand der Maximum-Likelihood-Abschätzung aller n analysierten Kalibrierbilder b mit jeweils $m = 54$ erfassten Stützpunkten aus Bild 18 a) konnten die extrinsischen und intrinsischen Kalibrierparameter für den vorliegenden Messaufbau berechnet werden. Nach *Zhang* war für ein gutes Kalibrierergebnis eine nichtlineare Minimierung der Residuen aus Formel 4.3.2 erforderlich [Zhang, 2000]. Diese basierte im vorliegenden Fall auf dem Levenberg-Marquardt Algorithmus [Ranganathan, 2004]. Damit wurde versucht, den Abstand der projizierten Bildpunkte im Bild $\hat{b}(\underline{K}, k_1, k_2, \underline{R}_i, \underline{t}_i, P_j)$ zu den wahren Bildpunkten zu reduzieren. In die Projektion gingen für jeden Bildpunkt P_{ij} mit den zugehörigen Weltkoordinaten $[X_{Wj} \ Y_{Wj} \ Z_{Wj}]^T$ im Bild i auch die Koeffizienten der radialen Verzeichnung k_1, k_2 sowie die intrinsischen und extrinsischen Parameter ein.

$$\min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| b_{i,j} - \hat{b}(\underline{K}, k_1, k_2, \underline{R}_i, \underline{t}_i, P_j) \right\|^2 \right) \quad (4.3.2)$$

Durch die Kalibrierung war eine eindeutige Zuordnung eines jeden metrischen 3-D-Raumpunktes mit seiner projizierten Abbildung in der 2-D-Bildebene in Pixelkoordinaten gegeben [Schreer, 2005].

Um diese Zuordnung entsprechend der vorgegebenen Bildskalierung näher zu spezifizieren, wurde in einem weiteren Vorversuch nach Bild 18 b) ein perspektivisch korrigiertes Bild b' des Schachbrettmusters auf Grundlage der Kalibrierparameter berechnet. Der Bildskalierungsfaktor verhalf dabei die Rasterung des rektifizierten Bildes anzupassen. Nach dem Shannon'schen Abtasttheorems durfte die Rasterbreite der Bildsegmente maximal der halben geometrischen Ausdehnung des kleinsten Objektdetails entsprechen. Der Skalierungsfaktor sollte deshalb so gewählt werden, dass bei der nachfolgenden Kantendetektion keine Bildinformationen aufgrund einer zu kleinen

Darstellung verloren gingen. Gleichzeitig wurde aber auch von einer überdimensionierten Skalierung der vorgegebenen Anzahl an Bildpixeln abgeraten, um unnötige Interpolationsfehler zu vermeiden. [Neumann, 2005]

Bei der vorliegenden Bildgebung wurde daher ein Skalierungsfaktor von 15 px/mm gewählt, der rechnerisch eine Größenordnung eines Pixels von 66,667 μm zur Folge hatte. Wie aus Abschnitt 5.2 hervorgeht, konnte damit eine solide Objekterkennung gewährleistet werden. Aufgrund der begrenzten Auflösung des Kamerasystems von ca. 27 μm (vgl. Unterabschnitt 3.2.3.3) war bei dieser Pixelauflösung jedoch die Interpretation der Messergebnisse kritisch zu betrachten, was dazu führte, dass im Rahmen dieser Arbeit nur Trendanalysen durchgeführt werden konnten.

Anhand des Abgleichs des vorgegebenen Abstands der Kacheln mit der vorhandenen Pixelanzahl aus Bild 18 b) wurde in einem nächsten Schritt der Umrechnungsfaktor der Pixel in metrische Koordinaten durch eine Längenmessung im Bild überprüft. Der euklidische Abstand $d(P_1, P_2)$ der Bildpunkte $P_1(x_1, y_1)$ und $P_2(x_2, y_2)$ wurde dabei nach Gleichung 4.3.3 berechnet [Neumann, 2005].

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.3.3)$$

Zwischen den betrachteten acht Kacheln des Schachbrettmusters aus Bild 18 b), die insgesamt 1199,67 Bildpixel beinhalteten, ergab sich ein Punktabstand $d(P_1, P_2)$ von 79,97 mm. Dieser Punktabstand wurde im Rahmen einer optischen Längenmessung durch ein Multisensor-Koordinatenmessgerät (Video-Check IP 250 3-D) bestätigt. Dadurch ergab sich ein experimentell ermittelter Umrechnungsfaktor von 66,660 μm pro Pixel, der in den nachfolgenden Untersuchungen herangezogen wurde.

Abschließend sollte berücksichtigt werden, dass die Kalibrierung mit einer Unsicherheit behaftet war, die maßgeblich durch Projektionsabweichungen bedingt wurde. Bei der Projektionsabweichung handelt es sich um ein qualitatives Maß zur Beschreibung der Abstandsabweichung der korrespondierenden detektierten mit den projizierten Bildpunkten. Diese traten in Folge der Rektifizierung und Transformation in das Weltkoordinatensystem auf. Es resultieren lokale Positionsabweichungen zwischen den erfassten Kontrollpunkten des Kalibrieremusters und den zugehörigen rückprojizierten Weltkoordinatenpunkten. Diese wurden exemplarisch für jeden Stützpunkt des Kalibrieremusters berechnet und variierten je nach Bildposition unterschiedlich stark. Die zugehörigen Projektionsabweichungen wurden in der Kalibrierdatei für die jeweiligen lokalen Abweichungen in x -, als auch in y -Richtung ausgewiesen.

Tabelle 2: Temperaturabhängige Projektionsabweichung der Schmelzbadkameras in beiden Raumrichtungen (von je 25 ausgewerteten Kalibrierbildern)

Projektions- abweichung in μm	Kamera links				Kamera rechts			
	23 °C		168 °C		23 °C		168 °C	
	x	y	x	y	x	y	x	y
Mittelwert \bar{f}_{kal}	-0,1	0,1	-1,3	-0,8	0,1	-0,1	1,3	0,7
MAE	16,1	16,3	18,8	18,3	18,7	18,4	22,4	21,2
RMSE	19,4	19,9	23,4	22,7	22,9	23,0	28,4	26,5

Im vorliegenden Fall der Kalibrierung des Schachbrettmusters aus Bild 18 waren die Mittelwerte der Projektionsabweichung \bar{f}_{kal} der beiden Schmelzbadkameras nach Tabelle 2 bei Raumtemperatur im Bereich von $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Die mittlere Projektionsabweichung aller Bildpunkte ergab demnach zwar einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die laterale Positionsbestimmung, dennoch konnten vereinzelt lokale kalibrierbedingte Abweichungen auftreten. Dies wurde auch anhand des *mean square error* (MAE) ersichtlich, der den Mittelwert der betragsmäßigen Projektionsabweichungen angibt. Die mittleren absoluten Projektionsabweichungen fielen bei Raumtemperatur kamera- und richtungsspezifisch mit ca. $16 \mu\text{m} - 19 \mu\text{m}$ unterschiedlich groß aus. Im vorliegenden Fall traten lokale Positionsabweichungen bei Raumtemperatur bis ca. $\pm 30 \mu\text{m}$ auf. Diese ermittelten Abweichungen gingen auch in den sogenannten *root mean square error* (RMSE) ein. Dieser spezifische Kennwert errechnet sich aus der Wurzel der normierten, aufsummierten quadratischen Projektionsabweichungen der einzelnen Bilder und basiert auf einer Differenzbildung der Position der detektierten zu den projizierten Bildpunkten. Der einzige Unterschied zur Berechnung der Standardabweichung ist, dass die Normierung des Kennwertes unter der Wurzel nur mit dem Faktor $\frac{1}{n}$ und nicht, wie bei der Standardabweichung, mit $\frac{1}{n-1}$ erfolgt. [Chai et al., 2014; Bouguet, 2015]

Die ermittelten lokalen Kalibrierabweichungen betragen bei Raumtemperatur zwischen $19 \mu\text{m} - 23 \mu\text{m}$. Dies deutete auf projektionsbedingte Schwankungen der ermittelten Bildpunkte hin, die damit einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis ausübten und daher als Messabweichung in der Auswertung berücksichtigt werden sollten. Insgesamt wies die linke Schmelzbadkamera geringere Projektionsabweichungen auf als die rechte Kamera, weshalb diese bevorzugt zur 2-D-Bilderfassung der Baufläche eingesetzt wurde. Weiterhin fiel die Projektionsabweichung bei Raumtemperatur kleiner

aus als unter Prozessbedingungen von ca. 168 °C, was auf erhöhte temperaturbedingte Abweichungen rückgeführt werden konnte.

4.3.3 Koaxiale Messdatenerfassung

Die *in situ*-Messdatenerfassung der koaxial integrierten Kamera aus Unterabschnitt 3.2.3.2 erfolgte zur Analyse der Wiederholpräzision des Scanners (vgl. Abschnitt 3.1.2). Im Nachgang an die durchgeführte Kalibrierung der koaxialen Kamera an den vier Ecken des Arbeitsbereiches, in denen sich die Referenzierungsrohre befanden, wurde zunächst die zugehörige Position des Galvanometer-Scanners bestimmt. Dies erfolgte durch eine systematische gesteuerte Verstellung der Scannerspiegel, bis die Referenzierungsrohre im Kamerabild erschienen.

Jede der vier Positionen der Referenzierungsrohre wurde nun, wie in Bild 19 skizziert, 20 mal hintereinander sowohl bei Raumtemperatur, als auch unter Prozessbedingungen von ca. 168 °C angefahren. Dabei wurden Kamerabilder über den Strahlkombinierer-Spiegel mit einer Fokussierung auf die Pulverbettenebene aufgenommen. Dadurch konnte der temperaturbedingte Einfluss auf die Positionsgenauigkeit des Scanners untersucht werden (vgl. Abschnitt 6.3).

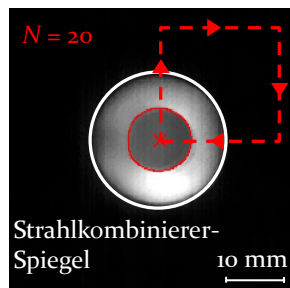


Bild 19: Schwerpunktauswertung eines aufgezzeichneten Bildes (Ref. 2 bei Raumtemperatur) mit der koaxialen Kamera

4.3.4 Referenzierte Konturerfassung durch Schmelzbadkameras

Durch eine schichtweise, globale Erfassung des Arbeitsbereiches (ROI) durch die Schmelzbadkameras in den Prozessnebenzeiten der LBM-P-Fertigung wurde weiterhin die Datengrundlage für die Auswertung der referenzierten, lateralen Fertigungsabweichungen gelegt. Zum Nachweis der geforderten Beobachtbarkeit geometrischer Messgrößen (vgl. Abschnitt 2.5) wurde dabei zunächst die Positionstabilität des Referenzierungssystems

im Pulverbett bei unterschiedlichen thermischen Umgebungsbedingungen und infolge des Pulverauftrags überprüft. Nach Voruntersuchungen zur Beurteilung der Wiederholpräzision der Konturerfassung des referenzierten Schmelzbades von zylindrischen AM-Probekörper durch das Fotogrammetriesystem unter Prozessbedingungen (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2) erfolgte der Nachweis lateraler, prozessbedingter Konturverlagerungen, auf Grundlage der schichtweisen *in situ*-Messdaten. Eine zusätzliche Analyse weiterer additiv gefertigter Probekörper (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.3) gab Aufschluss über den Einfluss der durchschimmernden Wärmestrahlung tiefer gelegener Fertigungsschichten auf die Konturerfassung.

4.3.4.1 Erfassung des Referenzierungssystems

Zur Beurteilung der Positionsstabilität des Referenzierungssystems relativ zu den Kamerasystemen wurde zunächst der temperaturbedingte Einfluss auf die optisch erfassten Positionen der ausdehnungsarmen Referenzierungsrohre aus Quarzglas überprüft. Um keine zusätzliche Beeinflussung durch die Bauraumbeleuchtung zu erhalten, wurden die folgenden Messungen der beleuchteten Referenzierungsrohre ohne eine Zusatzbeleuchtung durch Weißlichtquellen und Heizstrahler durchgeführt. Dadurch wurde ein optimaler Kontrast der Referenzierungsrohre zur Umgebung gewährleistet, was eine reproduzierbare Konturerfassung ermöglichte. Um eine Vergleichbarkeit der temperaturbedingten Wechselwirkungen auf die Positionsstabilität des Referenzierungssystems zu erhalten, wurden je 30 Wiederholmessungen bei Raumtemperatur und unter Prozessbedingungen von ca. 168 °C durchgeführt. Zur Beurteilung der Kurzzeit- und Langzeitstabilität erfolgten die Messungen sowohl in kurzen Zeitintervallen von wenigen Sekunden, als auch über einen Zeitraum von 90 Minuten. Neben der zeitgleichen, in Abschnitt 4.2 geschilderten Temperaturmessung, fand eine optische Erfassung des Referenzierungssystems durch die Schmelzbadkameras während des Aufheizvorgangs statt. Die Datenerfassung erfolgte in Temperaturschritten $\Delta\vartheta$ von jeweils 10 K. Die Zeitpunkte der Datenerhebung wurden aufgrund der anfänglich schnelleren Anlagenheizung bis ca. 120 °C mit Heizraten von 2 K/min und der anschließend langsameren Bauraumaufheizung von ca. 0,5 K/min angepasst.

Eine weiterführende Analyse der euklidischen Abstände zwischen den Referenzierungsrohren sollte eine bessere Einschätzung der Zuverlässigkeit der referenzierten Längenmessungen bei den unterschiedlichen Prozessbedingungen ermöglichen (vgl. Abschnitt 6.2). Zur abschließenden Beurteilung der rotatorischen Positionsstabilität der Kameras relativ zum Referenzierungssystem wurden weiterhin auch die Rotationswinkel der aufgezeichneten schichtweisen Messdaten miteinander verglichen. Für die Analyse der Positionsstabilität des Referenzierungssystems infolge des Pulverauftrags

wurde das Referenzierungssystem im Pulverbett jeweils bei Raumtemperatur und unter Prozessbedingungen von den Schmelzbadkameras erfasst (vgl. Abschnitt 6.2.2). Zur Überprüfung, ob die detektierten Lageabweichungen durch eine Kraftübertragung des aufgetragenen Pulvers hervorgerufen wurden, erfolgte zudem eine Referenzmessung durch einen überwachten Pulverauftragsprozess bei Raumtemperatur ohne Pulver.

4.3.4.2 Referenzierte in situ-Überwachung der schichtweisen additiven Fertigung zylindrischer Probekörper

Die prozessbegleitende *in situ*-Überwachung erfolgte am Beispiel der additiven Fertigung von vier zylindrischen Probekörpern mit unterschiedlichen Durchmessern von 10 mm, 15 mm, 20 mm und 30 mm. Es wurden rotationssymmetrische Standardgeometrielemente ausgewählt, die nach [DIN EN ISO 17450-1: 2012-04] durch einfache Elementoperatoren beschrieben werden können. Die simple Geometriekomplexität verminderte eine zusätzliche Beeinflussung der Bauteilgeometrie auf die referenzierte Lagebestimmung der ermittelten Schwerpunkte der Schmelzbadkonturen. Durch die unterschiedlichen Größen der additiv gefertigten Probekörper bestand dennoch die Möglichkeit, den Einflussfaktor der variierenden Wärmehaushalte der Schmelzzonen auf die fertigungsbedingte Maßhaltigkeit zu beurteilen. Wie der technischen Zeichnung aus Bild 20 zu entnehmen ist, wurden die vier runden Querschnitte im Zentrum des Bauraums zwischen den vier Referenzierungsrohren positioniert, um die laserstrahlbasierten Winkelabweichungen beim Energieeintrag möglichst gering zu halten [Foster et al., 2015]. Die Platzierung der Zylinder erfolgte entsprechend der Empfehlungen der Ausrichtung von AM-Bauteilen in z-Richtung der Bauplattform, um Schrägen und Stufeneffekte an den Mantelflächen zu vermeiden. Dadurch wiesen die rotationssymmetrischen Probekörper eine geringe Angriffsfläche in Bewegungsrichtung des Pulverauftragsystems auf. Dies hatte eine minimale und gleichmäßige laterale Verschiebung der Schmelzbadkonturen zur Folge. [Kaddar, 2010]

Die schichtweise überwachte AM-Fertigung der kreisrunden Querschnitte erfolgte bei einer maschinenseitig begrenzten Auflösung der Laserpositionierung von $3,6 \mu\text{m}$ unter Prozessbedingungen von 168°C . Die Laserleistung betrug 50 W bei einer Scangeschwindigkeit von $800 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und einem vorgegeben Hatchabstand der Laserlinien von $0,2 \text{ mm}$. Nur mit diesen experimentell ermittelten Fertigungsparametern ließen sich nach zahlreichen Vorversuchen reproduzierbare, mehrschichtige PA12-Zylinder mit der LBM-Forschungsanlage fertigen. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass die verwendete volumetrische Energiedichte E_V des durchgeführten LBM-

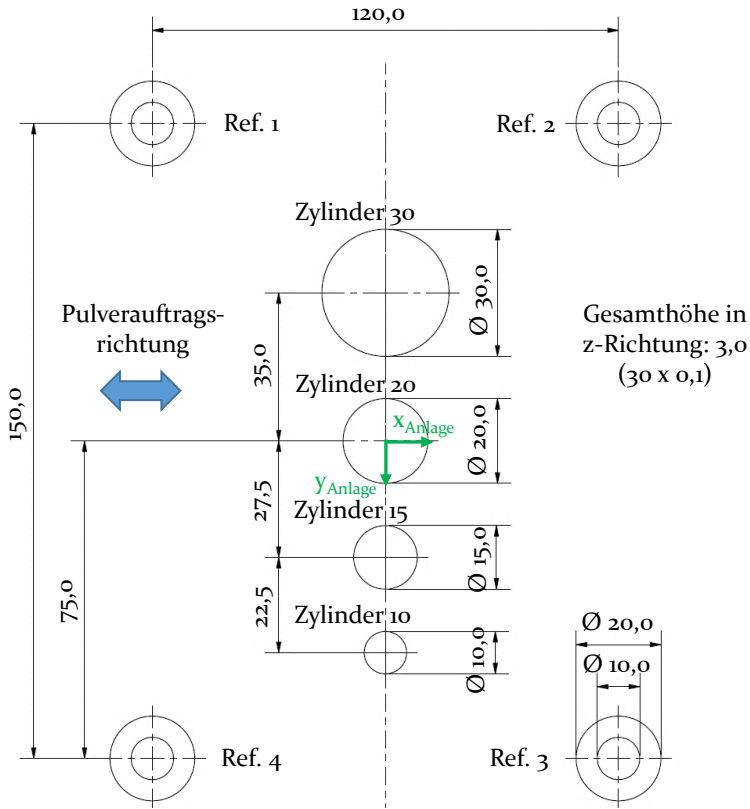


Bild 20: Technische Zeichnung der vier zylindrischen Probekörper im Arbeitsbereich zwischen den Referenzierungsrohren

Baujobs im Vergleich zum üblichen, in der Literatur empfohlenen Energieeintrag von $0,4 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ deutlich größer gewählt werden musste, um überhaupt mehrere Fertigungsschichten auswerten zu können. Wie aus Kapitel 7 hervorgeht, lag die Ursache dafür in den inhomogenen Fertigungsbedingungen und der mangelnden Steuerbarkeit der AM-Forschungsanlage. In dieser Arbeit steht daher nicht die reproduzierbare Fertigung maßhaltiger AM-Bauteile im Vordergrund, sondern die Methodik der referenzierten, schichtweisen Konturerfassung.

Um durch die referenzierte, schichtweise optische Erfassung und anschließende Auswertung der Schwerpunkte der Kreisquerschnitte zusätzliche Messabweichungen besser spezifizieren zu können, wurde zudem die Wiederholpräzision der Konturerfassung analysiert (vgl. Abschnitt 6.4). Dazu wurde zunächst ein Bild der referenzierten Schmelzbadkonturen unter Prozessbedingungen und einer nahezu homogenen Bauraumausleuchtung durch die

Schmelzbadkameras aufgezeichnet. Durch eine wiederholte Auswertung mit unterschiedlichen Parametern der Bildgebung sollten einerseits angepasste Einstellungen der Kantendetektion nach *Canny* gefunden (vgl. Abschnitt 5.2) und andererseits die Reproduzierbarkeit des Auswertalgorithmus nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 6.4.1). Zur Beurteilung des Einflusses von Rauscheffekten auf die Konturerfassung wurde das betrachtete Bild zudem mit einem sogenannten „weißen Rauschen“ überlagert.

Durch weitere 30 Kurzzeitmessungen derselben Szene wurde anschließend die Wiederholpräzision der Konturauswertung beurteilt (vgl. Abschnitt 6.4.2). Die Messungen erfolgten in einem Zeitintervall von wenigen Sekunden nach dem Energieeintrag des Lasers. Ziel dieser Voruntersuchung war es, einen einheitlichen Zeitpunkt der Datenerfassung nach dem Energieeintrag festzulegen, der weder durch die unmittelbare Phasenumwandlung des aufgeschmolzenen PA12-Pulvers, noch durch bereits einsetzende Kristallisationseffekte geprägt war.

Anhand schichtweiser *in situ*-Aufnahmen des Arbeitsbereiches im Nachgang an die letzte eingebrachte Fertigungsschicht durch den Laser sollte zudem der Einfluss der durchschimmernden Wärmestrahlung des Schmelzbades auf die Konturerfassung beurteilt werden. Dabei wurden die *in situ*-Messdaten der durchschimmernden Konturen nach jedem Auftrag des PA12-Pulvers von jeweils 100 µm bis zu einer Schichtdicke von insgesamt 1,5 mm aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 6.4.3).

In einem weiteren Vorversuch erfolgte eine globale Datenerfassung des kompletten Bauraums, samt der Bauraumkanten des Pulverbettkastens (vgl. Abschnitt 6.4.4). Hintergrund dieser Messdatenerfassung war die Fragestellung, ob der neue Referenzierungsansatz mit den Quarzglasrohren Vorteile gegenüber der in der Literatur bekannten Referenzierung über die Bauraumkanten aufwies.

Die eigentliche LBM-Fertigungsüberwachung von 30 gefertigten Schichten der zylindrischen PA12-Probekörper erfolgte anschließend durch die Schmelzbadkameras in den Prozessnebenzeiten und bildete die Grundlage für die Konturauswertungen (vgl. Abschnitt 6.5). Da im Rahmen der Untersuchungen laterale 2-D-Verschiebungen der additiv gefertigten Bauteilkonturen nachgewiesen werden sollten, war prinzipiell die Auswertung einer Schmelzbadkamera ausreichend. Um dennoch besser einschätzen zu können, ob eine nahezu zeitgleiche Messdatenerfassung durch die Schmelzbadkameras aus verschiedenen Betrachtungswinkeln nach Bild 16 a) zu verschiedenen Ergebnissen bei der Konturauswertung führte, wurden verschiedene Bildpaare während des LBM-Prozesses erzeugt. Diese wurden bezüglich der detektierten Positionsabweichungen verglichen (vgl. Abschnitt 6.4.5).

Für die Auswertung hinsichtlich pulverauftragsbedingter, lateraler Konturverschiebungen wurden, neben der schichtweisen Erfassung der eingebrachten Schmelzbadkonturen, auch Aufnahmen des Arbeitsbereiches unmittelbar nach dem zugehörigen Pulverauftrag aufgezeichnet. Mit Hilfe des Messprinzips aus Abschnitt 3.1.3 sollte eine Auswertung der Positionsstabilität der erfassten Schwerpunkte der aufgeschmolzenen und aufgetragenen, durchschimmernden Bauteilkonturen erfolgen (vgl. Abschnitt 6.5.1).

4.3.4.3 Referenzierte in situ-Überwachung weiterer AM-Probekörper

Der Einfluss durchschimmernder Bauteilkonturen tiefer gelegener Fertigungsschichten bei der *in situ*-Konturerfassung sollte anhand weiterer AM-Probekörper im Arbeitsbereich zwischen den Referenzierungsrohren analysiert werden. Der in Bild 21 a) dargestellte Stufenversatzkörper wies einen rechteckigen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 30 mm auf. Nach jeweils 15 Fertigungsschichten mit Schichtdicken D_s von jeweils 100 μm erfolgte eine systematische Versetzung in beiden lateralen Raumrichtungen um eine halbe Kantenlänge. Anhand der referenzierten Kantendetektion der Rechtecke sowie der überlappenden durchschimmernden Flächen wurde eine Beurteilung des Einflusses der Wärmestrahlung durch die PA₁₂-Pulverschichten vorgenommen (vgl. Unterabschnitt 6.4.3.2).

Um neben dem Stufenversatz auch kleinere Einflüsse von Konturverlagerungen auf das Ergebnis der Kantendetektion beurteilen zu können, wurde weiterhin eine doppelseitige Schräge aus Bild 21 b) gefertigt. Diese wies einen

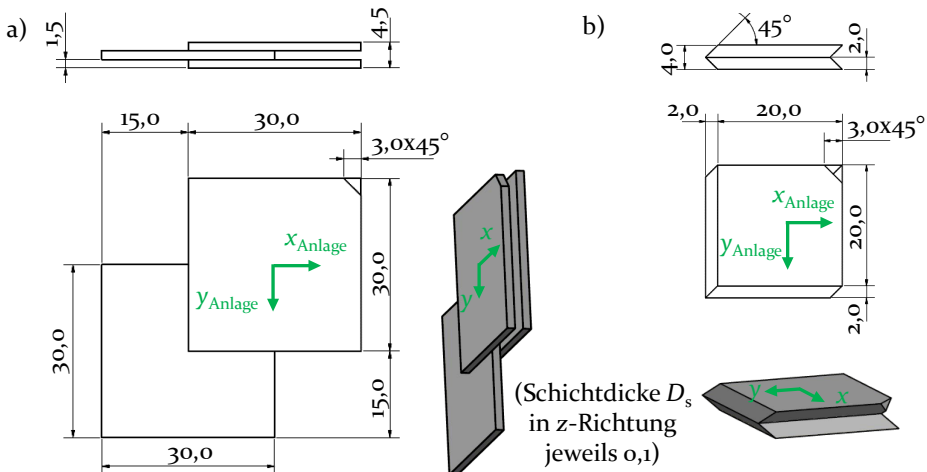


Bild 21: Technische Zeichnung der gefertigten AM-Probekörper: a) Stufenversatzkörper b) Doppelseitige Schräge

schichtweise eingestellten lateralen x - y -Versatz von je $100\ \mu\text{m}$ auf. Damit sollte der Einfluss benachbarter durchschimmernder Bauteilkontur tiefer gelegener Fertigungsschichten auf die Kantenfindung analysiert werden (vgl. Unterabschnitt 6.4.3.2).

4.4 Optische post-Prozess-Vermessung der gefertigten AM-Bauteile

Alle gefertigten AM-Bauteile wurden abschließend einer optischen *post-Prozess*-Analyse unterzogen, um die Form- und Maßhaltigkeit der Gesamtgeometrie zu beurteilen. Hierbei kam neben einem Streifenlichtprojektions-Messsystem (GOM - Atos Compact Scan 2M) auch ein Messgerät (Alicona - InfiniteFocus System G4) zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit zum Einsatz. Die *post-Prozess*-Messungen fanden in einem temperierten Messlabor statt, um die in Abschnitt 2.4.3 geforderten Prüfbedingungen einzuhalten.

Die Messung der Gesamtgeometrie erfolgte mittels Streifenlichtprojektion, die auf dem Messprinzip der aktiven Triangulation basiert. Ein strukturiertes, periodisches Streifenmuster wurde auf die Bauteiloberfläche projiziert und mit einem Kamerasystem mit einer lateralen Auflösung von $75\ \mu\text{m}$ erfasst [GOM, 2012]. Über die detektierten lokalen Verformungen des Musters und die Entfernung der Kameras zueinander konnte auf die Bauteilgeometrie zurück geschlossen werden.

Die Oberflächenanalyse sollte an den Seitenflächen der AM-Bauteile in z -Baurichtung zur Charakterisierung der Formabweichungen vorgenommen werden und basierte auf dem Messprinzip der Fokusvariation. Anhand der Auswertung der Schärfentiefe konnte die Profilhöhe $z(x, y)$ der Bauteile als Abstand zum Sensor bei einer vertikalen Auflösung des Messsystems von $400\ \text{nm}$ und einer lateralen Auflösung von $2\ \mu\text{m}$ ermittelt werden. [DIN EN ISO 25178-6: 2010-06; Heidl et al., 2020a]

Die gefertigten Probekörper der untersuchten LBM-Forschungsanlage wurden zusätzlich mit weiteren, baugleichen Testkörpern einer industriellen EOS Formiga P 110 LBM-Anlage verglichen. Dadurch konnten Rückschlüsse auf die reproduzierbare, maßhaltige Fertigung der einzelnen LBM-Anlagen gezogen werden. Diese Vergleichsmessung war erforderlich, um beurteilen zu können, ob eine vergleichbare Reproduzierbarkeit bei der AM-Fertigung mit der untersuchten LBM-Forschungsanlage vorlag. Die *in situ*-Messdatenerfassung konnte zwar nach einer eingehenden Parameterstudie der LBM-Forschungsanlage reproduzierbar umgesetzt werden, allerdings führten prozessbedingte Inhomogenitäten, eine fehlende Inertgas-Atmosphäre und eine nicht steuerbare Abkühl- bzw. Kristallisationsphase zu

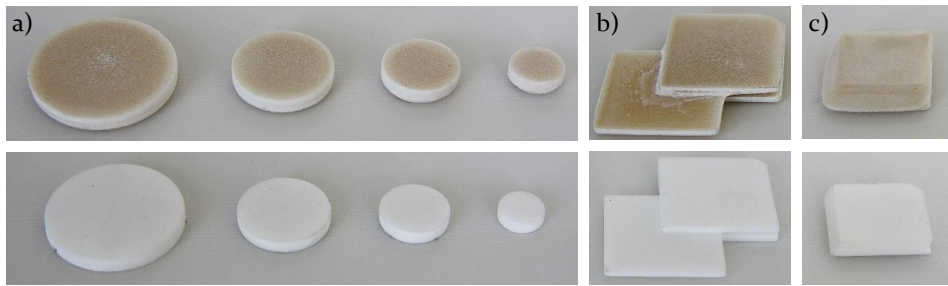


Bild 22: Gefertigte AM-Bauteile mit LBM-Forschungsanlage (obere Reihe) und industrieller LBM-Anlage (untere Reihe): a) Zylinder, b) Stufenversatzkörper, c) Doppelseitige Schrägen

geometrischen Abweichungen der AM-Bauteile. Dies ging bereits aus dem visuellen Vergleich der gefertigten Probekörper der Forschungsanlage mit den industriell hergestellten Bauteilen aus Bild 22 hervor. Die in der oberen Reihe dargestellten Probekörper der LBM-Forschungsanlage wiesen deutliche Verfärbungen auf, was auf den erforderlichen erhöhten Energieeintrag des Lasers zurückgeführt werden konnte. Weiterhin besaßen die Bauteile an den Randbereichen schwer lösbare Pulverrückstände. Diese führten dazu, dass die Probekörper größer ausfielen, als die industriell hergestellten AM-Bauteile. Inwieweit diese subjektive Einschätzung durch *post-Prozess-Analysen* bestätigt werden konnte, wird in Kapitel 7 näher untersucht.

5 Kontur- und Referenzauswertung

Für eine realitätsnahe Auswertung der *in situ*-Messdaten aus dem vorhergehenden Kapitel musste eine entsprechend gute Bildqualität vorliegen. Um dieser Anforderung nachzukommen war eine Bildaufbereitung erforderlich, um geometrische Maß-, Form- und Lagetoleranzen prozesssicher und realitätsnah auswerten zu können. Damit wurde die Grundlage für die referenzierte Konturauswertung gelegt, um Fertigungsabweichungen zwischen intrinsischen Bauteilmerkmalen und den zugeordneten Geometrieelementen nach [DIN EN ISO 17450-1: 2012-04] genauer zu spezifizieren.

Die folgenden Bildverarbeitungen und anschließenden Bildauswertungen wurden anhand verschiedener MATLAB-Softwarepakete der Firma MathWorks vorgenommen. Die einzelnen Auswertungsprogramme sind den jeweiligen Auswertungen beigelegt.

5.1 Bildaufbereitung

Nach der schichtweisen optischen Erfassung des Schmelzbades und des Referenzierungssystems im LBM-Prozess folgte mit der Bildaufbereitung ein erster Schritt der Bildverarbeitung. Erst durch eine Korrektur perspektivischer Deformationen, einer Bereichseingrenzung und Anpassung inhomogener Bildausleuchtungen sowie einer anschließenden Filterung konnte eine ausreichende Bildqualität für die geometrische Kontur- und Referenzauswertung gewährleistet werden [Neumann, 2005].

5.1.1 Perspektivische Korrektur und Bereichseingrenzung

Eine wesentliche Grundvoraussetzung für den Nachweis der Beobachtbarkeit geometrischer Merkmale war eine verzerrungs- und verzeichnungsfreie Positions- und Abstandsbestimmung der Messobjekte in den aufgezeichneten Bildern. Perspektivische Deformationen werden in den meisten Fällen durch eine von der Orthogonalen der Messebene abweichende Betrachtungsrichtung des Bildsensors verursacht. Sie können aber auch durch die Optik (z. B. durch radiale Linsenverzeichnungen) oder eine ungleichmäßige Objektabtastung (z. B. bei Zeilenkameras) entstehen. Sofern die Ursachen der Deformation, die zum Beispiel auf den Beobachtungswinkel in der Fertigungsanlage zurückzuführen sind, nicht im Vorfeld der Messdatenerfassung behoben werden können, ist eine perspektivische Korrektur erforderlich. Diese sogenannte *Rektifizierung* basiert auf den extrinsischen und intrinsischen Abbildungsparametern der Kamerakalibrierung (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Mit deren Hilfe konnte eine Umkehrtransformation errechnet werden, um die perspektivische Deformation auszugleichen. Jedes Originalbild (b_i) mit den verzerrten Bildpunkten $P(x,y)$ wurde anschließend, wie exemplarisch in Bild 23 gezeigt, in ein korrigiertes Bild (b'_i) mit den zugehörigen Bildpunkten $P'(x', y')$ überführt. [Neumann, 2005]

Bei der perspektivischen Projektion wurden die Weltkoordinatenpunkte entsprechend der Rotations- und Translationsmatrix neu berechnet, wodurch eine nicht formverhaltende Transformation des rektifizierten Bildes erfolgte [Heikkilä et al., 1997]. Wie aus dem Vergleich der Bilder 23 a) und b) hervorgeht, war die perspektivische Korrektur anhand der eingezeichneten Hilfslinien und angepassten Randbereiche des korrigierten Bildes zu erkennen. Die Rektifizierung der im Ausgangsbild enthaltenen Schmelzbadkonturen und Referenzierungsrohre war ein wesentlicher Prozessschritt für die geometrische Auswertung [Zur Jacobsmühlen et al., 2016b]. Der Arbeitsbereich (ROI) mit den relevanten Messobjekten sollte sich möglichst im Zentrum des ausgerichteten Sichtfensters der Kameras befinden, da dort der Einfluss der Transformation am geringsten ausfiel.

Um nur relevante Bildinhalte der ROI auszuwerten, wurde im nächsten Bearbeitungsschritt eine Bereichseingrenzung auf den in Bild 23 b) gekennzeichneten Bildausschnitt zwischen den Referenzierungsrohren vorgenommen. Nach *Li et al.* kann dies bei komplexeren Bauteilquerschnitten auch auf Grundlage des eingelesenen Rohdatensatzes und dessen vorgegebener Positi-

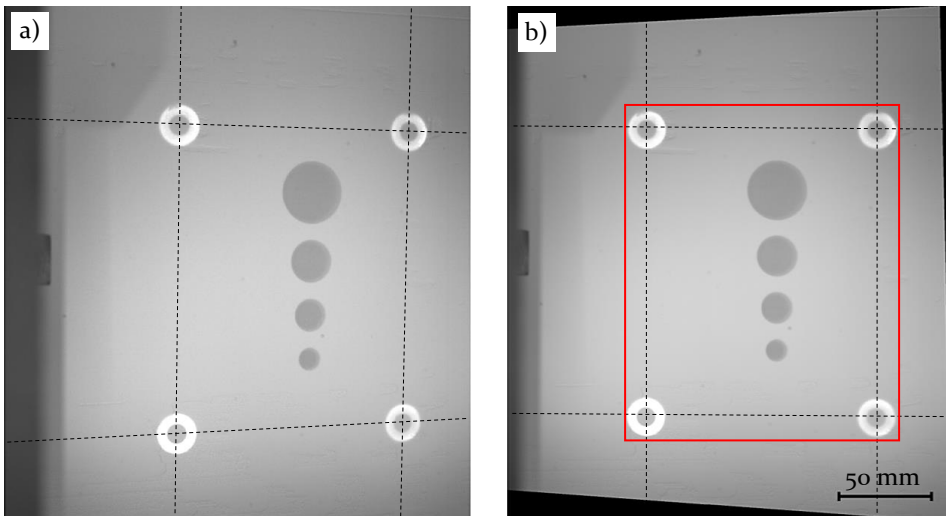


Bild 23: Anpassung des a) Originalbildes (b_9) in ein b) korrigiertes Bild (b'_9) mit anschließender Bereichseingrenzung auf die ROI [Lerchen et al., 2021a]

on im Bauraum erfolgen [Z. Li et al., 2018]. Dadurch wurde die Anzahl unrelevanter Bildinformationen bei der Kantendetektion eingegrenzt. Ebenso wurden störende Randeinflüsse, wie beispielsweise der links im Bild dargestellte Schattenwurf des Pulverauftragssystems, ausgeschlossen. Als weiterer Vorteil der Bereichseingrenzung, die zu stabileren Ergebnissen der Kantendetektion führte war, neben einem reduzierten Speicherplatz, auch ein geringerer Rechenaufwand im Rahmen der Konturerfassung zu nennen.

5.1.2 Kontrastanpassung

Im Nachgang an die Bereichseingrenzung war eine Helligkeitsanpassung der perspektivisch korrigierten Bilder zur Kontrastoptimierung erforderlich. Aufgrund der zusätzlichen Beleuchtung durch integrierte ringförmige LED-Platinen in den Lagerbuchsen wurde bei den Referenzierungsrohren bereits eine kontrastreiche, reproduzierbare Kantendetektion des Referenzierungssystem ermöglicht (vgl. Abschnitt 4.3.1). Da eine homogene Ausleuchtung des Schmelzbades durch die ungleichmäßige Wärmestrahlung des Infrarot-Heizsystems nur teilweise durch das integrierte Weißlicht-Beleuchtungssystem kompensiert wurde, war eine ergänzende Homogenisierung des Bildhintergrundes notwendig. Durch die zusätzliche Kontrastanpassung wurde das Ziel verfolgt, einen möglichst scharfen Kontrast der relevanten Bildmerkmale der Schmelzbadkonturen zum umgebenden, weißen PA12-Pulverbett zu erzeugen. Für eine scharfe Abgrenzung der Konturen war eine Schwellwertfindung der Grauwertgradienten im Rahmen einer sogenannten *Flatfield*- oder *Shading*-Korrektur erforderlich. Dabei wurde jedes perspektivisch korrigierte Bild (b'_i) des schichtweisen LBM-Prozesses nach Gleichung 5.1.1 mit einem Referenzbild (r'_0) des Pulverbettes ins Verhältnis gesetzt.

$$\text{Helligkeitkorrigiertes Bild } b''_i = \frac{\text{aktuelles Bild } b'_i}{\text{Referenzbild } r'_0} \cdot \bar{r}'_0 \quad (5.1.1)$$

Als Referenz der Kontrastanpassung wurde nach Bild 24 a) ein perspektivisch korrigiertes und Gauß-gefiltertes Bild (r'_0) des Pulverbettes verwendet (vgl. Abschnitt 5.1.3), das unmittelbar vor dem LBM-Fertigungsprozess aufgezeichnet wurde. Durch eine Multiplikation mit dem gemittelten Grauwertbereich des Referenzbildes (\bar{r}'_0) erfolgte eine Grauwertspreizung, die zu einer breiten Verteilung im Intervall des gesamten Grauwertspektrums von [0; 255] führte. Damit wurde der Grauwertkontrast zwischen den Schmelzbadkonturen und dem umgebenden Pulverbett weiterhin verstärkt. Dies führte zu besseren Ergebnissen bei der Kantendetektion, auch wenn durch die Grauwertspreizung eine geringfügigere Verschlechterung der Auflösung in Kauf genommen

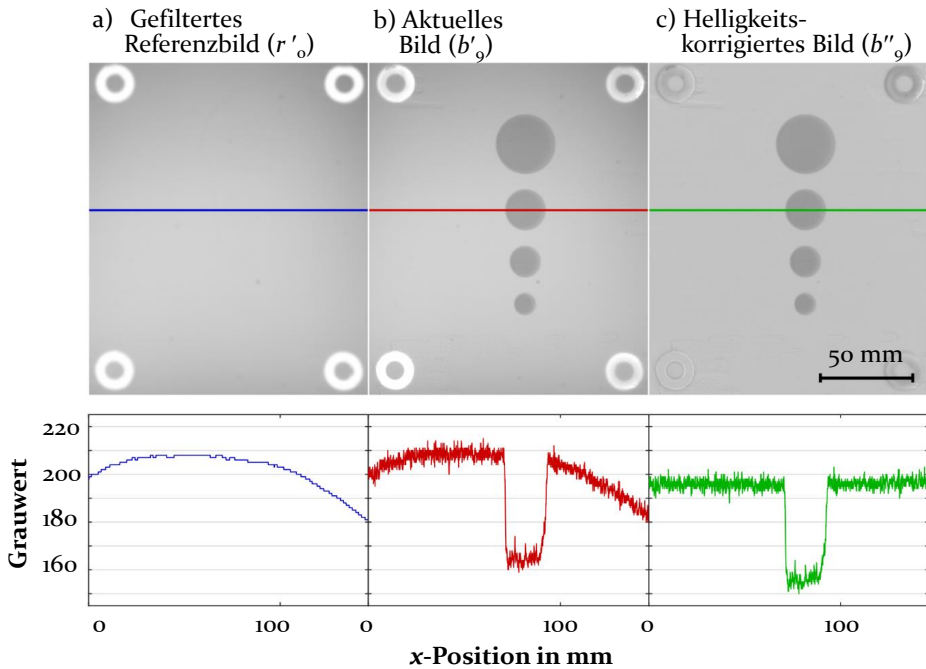


Bild 24: Kontrastanpassung und Homogenisierung der Grauwertverteilung der perspektivisch korrigierten Bilder (b'_i) mit gefiltertem Referenzbild (r'_0) [Lerchen et al., 2021a]

wurde. Wie aus der exemplarisch betrachteten linienförmigen Grauwertauswertung im unteren Teil aus Bild 24 hervorgeht, resultierte eine deutliche Reduktion der Helligkeitsverteilung des korrigierten Bildes (b''_9) in Bild c) im Vergleich zum perspektivisch korrigierten Ausgangsbild (b'_9) aus Bild b). Durch die Homogenisierung der Grauwerte wurde ein weiterer Schritt für eine reproduzierbare, realitätsnahe Kantendetektion erbracht. [Neumann, 2005; Seibert et al., 1998]

5.1.3 Filterung

Um eine Beeinflussung der angepassten Bilder durch Rauschen zu reduzieren, war eine zusätzliche Filterung für die Bildauswertung erforderlich [Neumann, 2005]. Hierbei sollte bereits im Rahmen der Kontrastanpassung darauf geachtet werden, dass im Referenzbild enthaltene systematische Grauwertabweichungen nicht in die nachfolgende schichtweise Bildauswertung eingehen. Aus diesem Grund wurde das korrigierte Referenzbild (r'_0) aus Bild 24 a) im Vorfeld der Helligkeitsanpassung einer standardmäßigen linearen Gauß-Filterung unterzogen. Dabei erfolgte eine Faltung des Bildes in beiden Raumrichtungen mit Hilfe der Gaußfunktion $g(x, y)$ nach Gleichung 5.1.2, die

zu einer Glättung des Bildes unter Einbeziehung der Grenzwellenlänge λ_c bzw. der zugehörigen Standardabweichungen σ der Gaußfunktion führte [DIN EN ISO 16610-61: 2020-05; Xiao et al., 2020].

$$g(x, y) = \frac{\pi}{\ln 2 \cdot \lambda_c^2} \cdot e\left(-\frac{\pi^2}{\ln 2} \cdot \frac{x^2 + y^2}{\lambda_c^2}\right) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1.2)$$

$$\text{mit } \sigma^2 = \frac{\ln 2}{2} \cdot \frac{\lambda_c^2}{\pi^2}$$

Bei der bildgebenden Analyse der Messobjekte im Arbeitsbereich waren vor allem die langwelligen Profianteile des detektierten Schmelzbades von Interesse, die als Formabweichungen erster Ordnung die geometrische Ausprägung der AM-Bauteile maßgeblich charakterisierten. Kurzwellige Anteile und Gestaltabweichungen höherer Ordnungen, zu denen die Welligkeit und Rauheit gezählt werden, wurden bei der vorliegenden Auswertung durch eine Tiefpassfilterung unterdrückt [DIN 4760: 1982-06, Krystek, 2009]. Die Grenzwellenlänge λ_c ist dabei ein Kennwert zur Trennung kurzer und langer Wellenlängenbereiche in der Form, dass ein sinusförmiges Primärprofil durch die Filterung auf die halbe Amplitude gedämpft wird [DIN EN ISO 16610-1: 2015-11; DIN EN ISO 16610-61: 2020-05; Krystek, 2009].

Werden im Rahmen einer Voruntersuchung die Ergebnisse der Kantendetektion in Bild 25 mit und ohne vorausgehende, lineare Flächenfilterung verglichen, so wurde ersichtlich, dass eine Filterung des Hintergrundrauschens für eine robuste Kantendetektion zwingend erforderlich war. Ohne Profilfilterung in Bild 25 a) lieferte der in Abschnitt 5.2 verwendete Kantendetektionsalgorithmus nach *Canny* keine brauchbaren Ergebnisse. [Lerchen et al., 2021a]

Nach [DIN EN ISO 16610-1: 2015-11] waren neben der linearen Gauß-Filterung aus Bild 25 b), die bis auf vereinzelte zusätzlich gefundene Kanten

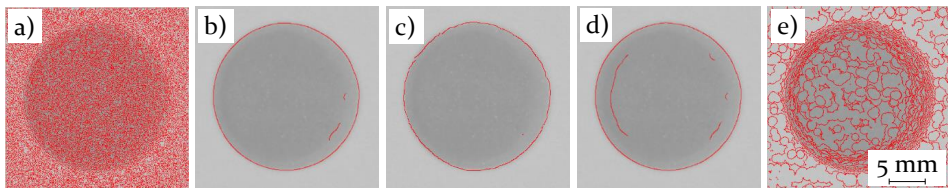


Bild 25: Vorversuch zur Analyse des Einflusses der Filterung auf die Kantendetektion (am Beispiel des Zylinders 20 mit $\sigma = 8$ px): a) Ohne Filterung, b) Lineare Gauß-Filterung, c) Robuste Gauß-Regressionfilterung, d) Lineare Spline-Filterung, e) Morphologische Filterung

die Schmelzbadkontur realitätsnah abbildete, auch weitere grundlegende Filterkonzepte zur Separierung der unterschiedlichen Gestaltabweichungen denkbar. Für die vorliegende Untersuchung wurde die standardmäßig beim *Canny*-Algorithmus durchgeführte Gauß-Filterung durch weitere Filteransätze ersetzt. Hierbei wurden die Ergebnisse der Kantendetektion, basierend auf einem robusten Gauß-Regressionsfilter, einem Spline-Filter, und einem morphologischen Filter, miteinander verglichen.

Robuste Filter kommen bei der Bildgebung im AM überwiegend dann zum Einsatz, wenn mit extremen Ausreißern der detektierten Bildpixel zu rechnen ist. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich einzelne angeschmolzene Partikel, infolge eines unregelmäßigen Pulverauftrags, im Arbeitsbereich befinden. Das in [DIN EN ISO 16610-31: 2017-03] beschriebene robuste Gauß-Regressionsfilter war im Vergleich zum herkömmlichen Gaußfilter unempfindlicher gegenüber zusätzlich detektierten Messpunkten, die weit entfernt von bzw. nicht verbunden mit den restlichen agglomerierten Messdaten lagen [Krystek, 2009]. Zwar lieferte die robuste Gauß-Regressionsfilterung aus Bild 25 c) wenige bis gar keine überflüssige Kanten, jedoch wurden die gefilterten Bildpunkte iterativ mit aufwendigen Matrizenmultiplikationen aus einer Regressionsfunktion ermittelt. Dies erforderte einen hohen Rechenaufwand und hatte eine lange Auswertedauer zur Folge. Für die prozessbegleitende Auswertung der *in situ*-Datensätze und eine zeitnahe Implementierung von Korrekturansätzen beim LBM war dieser zeitaufwändige Filteransatz daher eher unpraktikabel.

Im Gegensatz dazu eigneten sich lineare Spline-Filter nach [DIN EN ISO 16610-22: 2016-04] als reine Digitalfilter zur zeitnahen, prozessbegleitenden Auswertung großer Messdaten. Die Mittellinie der gefilterten Kontur wurde durch einen sogenannten *Spline* approximiert, der aus abschnittswisen kubischen Polynomen bestand, die stetig miteinander verbunden waren. Im Vergleich zum Gauß-Filter lieferte das lineare Spline-Filter aufgrund einer steileren Übertragungsfunktion und besseren Kompensation von Randeffekten zwar theoretisch eine bessere Formapproximation, allerdings fiel die Kantendetektion beim Vorversuch der runden Standardgeometrieelemente in Bild 25 d) sehr ähnlich aus. [Krystek, 2009]

Das morphologische Filterverfahren nach [DIN EN ISO 16610-41: 2015-12], das mit einer mechanischen, taktilen Antastung des Profils mit einer Kreisscheibe verglichen werden kann, bewirkte eine Glättung durch die morphologischen Operatoren der Dilatation bzw. Erosion. Wie sich weiterhin in Bild 25 e) bei der exemplarisch betrachteten morphologischen Flächenfilterung mit einem *Opening*-Operator und einem kugelförmigen Strukturelement mit einem Radius von 8 px ($\cong 533 \mu\text{m}$) zeigte, lieferte diese Form der

Filterung neben einem breiten einhüllenden Bereich um die erwartete Kante keine brauchbaren Ergebnisse der Konturanalyse. Es eignete sich daher eher weniger für eine prozessnahe digitale Rekonstruktion der Schmelzbadkonturen. [Krystek, 2009]

Im vorliegenden Anwendungsfall der LBM-P-Konturanalyse einfacher Standardgeometrielemente aus PA₁₂ wurde somit auf das lineare Gauß-Filter zurückgegriffen, das bereits standardmäßig im *Canny*-Kantendetektionsalgorithmus implementiert wurde.

Durch die einzelnen Verfahrensschritte der Bildaufbereitung wurde insgesamt eine wesentliche Grundlage der Bildbearbeitung zur Quantifizierung der Schmelzbadkonturen gelegt, die eine verbesserte Zuordnung der Grauwerte zu den Bildpixeln im Rahmen der Kantendetektion ermöglichte [Neumann, 2005].

5.2 Bildverarbeitung mit Kantendetektionsalgorithmus nach Canny

Basierend auf den aufbereiteten Bilddatensätzen erfolgte die eigentliche Bildauswertung mit MATLAB anhand eines erweiterten Kantendetektionsalgorithmus nach *John Francis Canny* [Canny, 1986]. Bei dem *Canny*-Algorithmus handelt es sich, im Vergleich zu den ersten entwickelten Verfahren zur Konturbeschreibung anhand von Geraden- und Kreissegmenten nach *Hough* und Differenzoperatoren zur Bildfilterung nach *Roberts* bzw. *Prewitt*, um einen der meist verwendeten, robusten Kantendetektionsalgorithmen zur Auswertung von Grauwertbildern [Hough, 1962; Roberts, 1965; Prewitt, 1970; Biswas et al., 2012]. Der verbreitete *Sobel*-Operator, dessen Kantenfindungen auf einer zweidimensionalen Grauwertverstärkung mit anschließender Gradientenanalyse beruht, erwies sich als ungeeignet für die Kantenfindung der schichtweisen Bilder des LBM-Prozesses [Chandwadkar et al., 2013; Zur Jacobsmühlen et al., 2019; Neumann, 2005]. Dies ging unter anderem aus Voruntersuchungen von *Heinl et al.* zur *Sobel*-Kantendetektion hervor. Darin konnte bestätigt werden, dass ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu einer fehlerhaften oder unvollständigen Kantenfindung führte. Der *Canny*-Algorithmus war hingegen weniger anfällig gegenüber Rauscheffekten und eignete sich auch zur Quantisierung schwacher und kontrastarmer Objektmerkmale. [Heinl et al., 2018a]

Der *Canny*-Algorithmus verfolgt das Ziel, drei wesentliche Anforderungen zu erfüllen: Die Kantenerfassung sollte geringe Fehlerraten aufweisen, eine exakte Lokalisierung der tatsächlichen Kontur ermöglichen und als

Ergebnis genau eine einzige Kontur im eingegrenzten Bildsegment liefern [Canny, 1986]. In einem ersten Schritt des *Canny*-Algorithmus wird dazu eine standardmäßige Filterung des Bildes entsprechend der vorgestellten Gaußfunktion vorgenommen (vgl. Abschnitt 5.1.3). Um eine gute Übereinstimmung der erfassten mit den realen Konturen zu gewährleisten, wird zu Beginn der Bildauswertung ein geeigneter Sigma-Wert oder eine entsprechende Grenzwellenlänge nach Gleichung 5.1.2 anhand des Referenz- und ersten Schmelzbadbildes festgelegt. Dies ist für eine vergleichbare Auswertung der unterschiedlichen Objektmerkmale in den einzelnen Fertigungsschichten erforderlich, da ein variierender Sigma-Wert einen systematischen Einfluss auf das Ergebnis der Kantenfindung ausüben kann (vgl. Abschnitt 6.4.1). Im Verlauf der *Canny*-Kantendetektion werden weiterhin die Intensitätsgradienten und deren Raumrichtungen durch partielle Ableitungen der gefilterten Grauwerte im Bild ermittelt. Da sich neben dem Gradienten der tatsächlichen Kontur weitere kontrastreiche Merkmale im betrachteten Bildausschnitt befinden können, wird anschließend eine sogenannte *Non-Maximum Suppression* durchgeführt. Dabei wird durch einen Vergleich benachbarter Bildpixel und deren Gradientenrichtungen jeder Grauwert mit Ausnahme des größten lokalen Maximums unterdrückt. Auf Grundlage der vorherigen Verfahrensschritte erfolgt die eigentliche Kantendetektion mittels einer doppelten Schwellwertfindung und Konturverfolgung entsprechend einer Hystereseffektfunktion. Jeder Gradient der einzelnen Grauwerte der Bildpixel wird dabei mit angepassten Schwellwerten T_{i1} und T_{i2} hinsichtlich der jeweiligen Grauwertverteilung verglichen. Fällt der lokale Gradient entsprechend größer aus als der größere Schwellwert T_{i2} , wird das entsprechende Bildpixel als relevantes Kantenpixel deklariert. Falls der Gradient hingegen kleiner als T_{i1} ausfällt, handelt es sich um ein irrelevantes Bildpixel, das verworfen wird. Für das Intervall zwischen den vorgegebenen Schwellwerten wird in einem vorgegebenen Bereich um das aktuelle Bildpixel nach weiteren Gradienten gesucht, die größer als T_{i2} ausfallen und daher in Folge einer Anbindung zu bereits gefundenen relevanten Kantenpixeln beibehalten werden. [Canny, 1986; Xiao et al., 2020]

Neben den automatisch ermittelten Schwellwerten T_i wurde bei der vorliegenden Auswertung der Schmelzbadkonturen ein konstanter Sigma-Wert von $\sigma = 12$ px vorgegeben, was nach Auswertungen der ersten Fertigungsschichten zu einer guten Rekonstruktion der runden Bauteilquerschnitte des betrachteten LBM-Fertigungsprozesses führte. Sollte die ermittelte Bauteilkontur dennoch im Verlauf des Fertigungsprozesses unvollständig erfasst werden, war für die Ermittlung der Flächenschwerpunkte eine Verbindung naheliegender Kantenpixel zu prüfen. Dazu konnte eine maximale Distanz zwischen unverbundenen Kantenpunkten vorgegeben werden, innerhalb der eine Interpola-

tion zur Konturschließung durchgeführt wurde. Dieses Intervall sollte jedoch auf ein Minimum beschränkt werden, da durch die Interpolation zwischen den Bildpixeln auch die Schwerpunktermittlung beeinflusst wurde. Trotz der Anpassungen ergaben sich nach Bild 25 infolge der *Canny*-Kantendetektion der gefilterten Bilder immer noch überflüssige Kantensegmente. Diese irrelevanten Bildinformationen, die trotz der Gauß-Filterung detektiert wurden, sollten entfernt werden, um eine realitätsnahe, unverfälschte Zuweisung der Bauteilkanten zu ermöglichen. Durch eine morphologische Operation erfolgte abschließend eine Eingrenzung auf die längste zusammenhängende Kante im vorher eingegrenzten Bildabschnitt, die in guter Übereinstimmung der tatsächlichen Kontur entsprach. Zusätzliche, aufgrund von Pulverauftragsfehlern oder Rauscheffekten detektierte Kanten im Bild wurden damit zusätzlich gefiltert, sofern sie nicht in unmittelbarer Nähe der betrachteten Kontur im eingegrenzten Bildsegment lagen.

Wie aus Bild 26 hervorgeht, lieferte die Konturanalyse der Referenzierungsrohre der betrachteten neunten Fertigungsschicht, trotz einer dünnen, ungleichmäßigen Pulverschicht eine realitätsnahe Rekonstruktion der jeweiligen Referenzmarker. Weiterhin war auch eine reproduzierbare Erfassung der Schmelzbadkonturen möglich, obwohl ein insgesamt schwacher Kontrast zum umgebenden Pulver vorlag. Hierbei ist im Nachfolgenden noch zu spezifizieren, inwieweit sich die durchschimmernde Bauteilkonturen tiefer gelegener Schichten auf die Schwerpunktermittlung der aktuellen Schmelz-

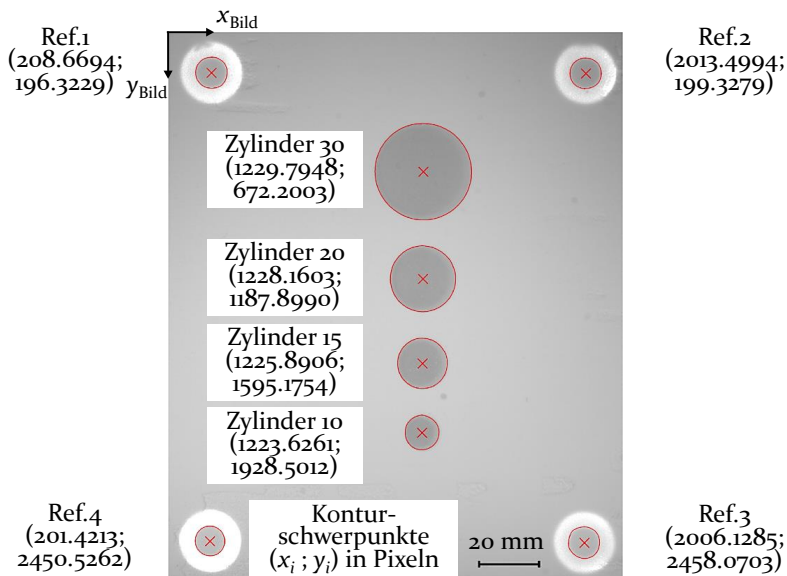


Bild 26: Ergebnis der Kantendetektion nach *Canny* mit Schwerpunktermittlung

badkontur auswirken (vgl. Abschnitt 6.4.3). Je genauer die Flächenschwerpunkte im Rahmen der Konturerfassung ermittelt werden konnten, desto aussagekräftiger war die Auswertung der schichtweisen lateralen Konturverlagerungen. Zwar wurden die Schwerpunkte der erfassten Messobjekte in Folge der MATLAB-Auswertung rechnerisch mit mehr als zehn Nachkommastellen in Pixel angegeben, aufgrund der begrenzten Auflösung des Schmelzbadkameranagements (vgl. Unterabschnitt 3.2.3.3) war diese Genauigkeit der Messwertangabe jedoch nicht aussagekräftig. Nach der *goldenen Regel der Messtechnik*, die nach [Berndt et al., 1968] besagt, dass die Messunsicherheit maximal 20% der erlaubten Toleranz betragen und auf zwei signifikante Nachkommastellen angegeben werden sollte, war bei der Messauswertung daher bereits eine Angabe der Bildpunkte im ganzstelligen Mikrometerbereich grenzwertig. Auf Grundlage der errechneten Schwerpunktkoordinaten, die besonders bei symmetrischen runden Bauteilquerschnitten nahezu unabhängig von gleichmäßigen radialen Einflüssen waren, wird im Folgenden eine Einschätzung der referenzierten geometrischen Abweichungen einzelner Messobjekte in Bezug zum Kamerasystem gegeben.

6 Verifikation der Beobachtbarkeit der Messgrößen

Die in Abschnitt 2.5 geforderte exakte Lagebestimmung der additiv gefertigten Bauteile im Pulverbett kann nur durch eine stabile, referenzierte Konturerfassung gewährleistet werden. Zur Verifikation der Beobachtbarkeit der Messgrößen als grundlegende Eigenschaft eines dynamischen Regelkreises wurden daher die Messdaten aus Kapitel 4 in Bezug zu dem Referenzierungssystem (vgl. Abschnitt 3.1.1) zum Nachweis der messtechnischen Erfassbarkeit und reproduzierbaren Auswertung geometrischer Fertigungsabweichungen herangezogen. Nach einem Abschnitt zur Analyse der Pulverbettabsenkung der Bauplattform in z-Richtung, die eine exakte Lagebestimmung in Aufbau-Richtung ermöglichte, liegt der Fokus der folgenden Abschnitte verstärkt auf dem Nachweis der Positionsstabilität des Referenzierungssystems sowie der schichtweisen, referenzierten Zuordnung der lateralen Position des Schmelzbades. Neben dem thermischen und mechanischen Einfluss auf die relativen Verschiebungen der AM-Bauteile und des Messsystems zum Referenzierungssystem, wird auch die Wiederholpräzision des Scanners und der Konturerfassung des Schmelzbades beleuchtet. Auf Basis der verifizierten Beobachtbarkeit der geometrischen Messgrößen der additiv gefertigten Bauteile im Pulverbett durch das Messsystem erfolgt ein Nachweis lateraler, prozessbedingter Konturverlagerungen. Die ermittelten geometrischen Fertigungs- und Messabweichungen werden abschließend gegenübergestellt und bilden die Datengrundlage für den Aufbau einer weiterführenden Prozessregelung.

6.1 Pulverbettabsenkung

Die Analyse der Pulverbettabsenkung, die ein Maß für die Schichtdicke der additiv gefertigten Bauteile darstellt, ermöglichte eine Vorhersage möglicher geometrischer Fertigungsabweichungen in z-Richtung während des LBM-Prozesses. Auf Grundlage der in Abschnitt 4.1 erhobenen Messdaten durch das Encoder-Messsystem von insgesamt 20 Schichten, bzw. 19 erfassten Bauraumabsenkungen mit jeweils zehn Wiederholmessungen, konnte nach Bild 27 eine Schichtdickenauswertung erfolgen. Hierbei bestätigte sich der in Anhang A.2 gezeigte und mit der interferometrischen Längenmessung ermittelte Trend, dass die gemittelten, vom Encodersystem erfassten Schichtdicken um ca. 2 % – 3 % kleiner ausfielen als die eingestellte Schichthöhe von 100 μm . Die Encodermessungen entlang der beiden Referenzierungsrohre (Ref. 2 und Ref. 4) wiesen Mittelwerte von 97,9 μm bzw. 98,3 μm auf. Diese Höhenabweichungen konnten über den mehrschichtigen AM-Bauprozess

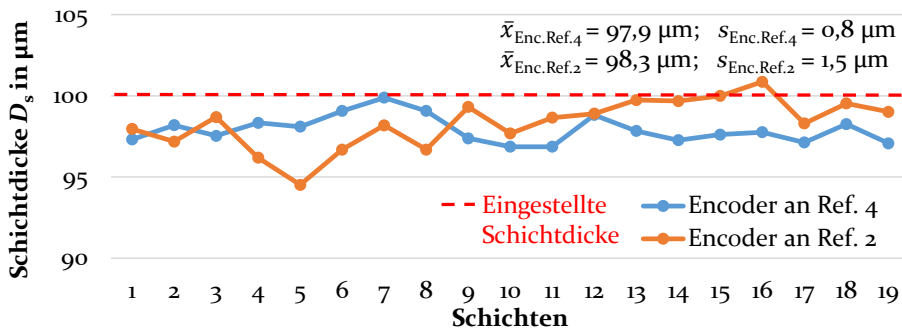


Bild 27: Auswertung der Pulverbettabsenkung durch das Encoder-Messsystem

kumulieren und zu geometrischen Gesamtabweichungen in z-Richtung von mehreren $100 \mu\text{m}$ führen. Als Ursache der detektierten Abweichungen traten neben temperaturbedingten auch mechanische Führungsabweichungen auf, die teilweise aus der einseitigen Aufhängung der Antriebseinheit an der Hinterseite der Baukammer der LBM-Anlage resultierten [Hausotte, 2015]. Eine Analyse der temperaturbedingten Längenänderung während des beheizten Fertigungsprozesses konnte anhand von Temperaturmessungen am Encoder-Messsystem abgeleitet werden (vgl. Unterabschnitt 6.2.1.2). Insgesamt fielen die ermittelten Schwankungen der Pulverbettabsenkungen im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Auflösung der Absenkung der z-Achse der EOSINT P380-Bauplatzform von $10 \mu\text{m}$ aus [EOS, 2004].

6.2 Positionsstabilität des Referenzierungssystems relativ zu den Kamerasystemen

Der Nachweis der lateralen Positionsstabilität des Referenzierungssystems erfolgte anhand der optischen Bildgebung auf Grundlage der Messdaten aus Unterabschnitt 4.3.4.1. Der Einfluss der Bauraumbeleuchtung auf die Messdatenauswertung wurde durch Messungen ohne Zusatzbeleuchtung und IR-Heizung in diesem Abschnitt weitestgehend minimiert.

Dadurch kann die Positionsstabilität der beleuchteten Referenzierungsrohre im PA12-Pulverbett nahezu unbeeinflusst von optischen Effekten der Umgebungseinflüsse analysiert werden. Im Nachfolgenden wird untersucht, inwieweit die Streuung der einzelnen Referenzierungsrohre durch eine messtechnische Betrachtung des gekoppelten Referenzierungssystems verbessert werden kann. Insgesamt wird das Ziel verfolgt, ein stabiles Bezugssystem für die Beurteilung geometrischer Fertigungsabweichungen bereitzustellen. Allerdings kann durch die Bildgebung bislang nicht differenziert werden, ob die detektierte Positionsabweichung tatsächlich auf Verschiebungen der

Referenzierungsrohre im Pulverbett zurückzuführen sind oder aufgrund mechanischer oder temperaturbedingter Versätze der Kamerasysteme resultieren. Die folgenden Abschnitte beleuchten daher die Entstehungsursache relativer Positionsverschiebungen, um abschließend die einzelnen fertigungs- und messtechnischen Abweichung besser voneinander abgrenzen zu können (vgl. Abschnitt 6.6).

6.2.1 Positionsstabilität bei Temperierung des Bauraums

Da durch die Temperierung des Bauraums aufgrund materialspezifischer Längendehnungen nicht nur die Prozesskammer und das Referenzierungssystem im Pulverbett, sondern auch die extern angebrachten Kamerasysteme und deren Halterungen in der Optikebene beeinflusst wurden, war eine Beurteilung der temperaturbedingten Positionsstabilität der Referenzierungsrohre eine wesentliche Grundlage für die Beobachtbarkeit der geometrischen Messgrößen. Das Referenzierungssystem wurde als Bezugssystem zur Analyse der relativen temperaturbedingten Lageänderungen der Kamerasysteme herangezogen. Durch die Analyse der vektoriellen Abstände B , L und D in Bild 28, die sich aus den euklidischen Schwerpunktabständen zwischen den

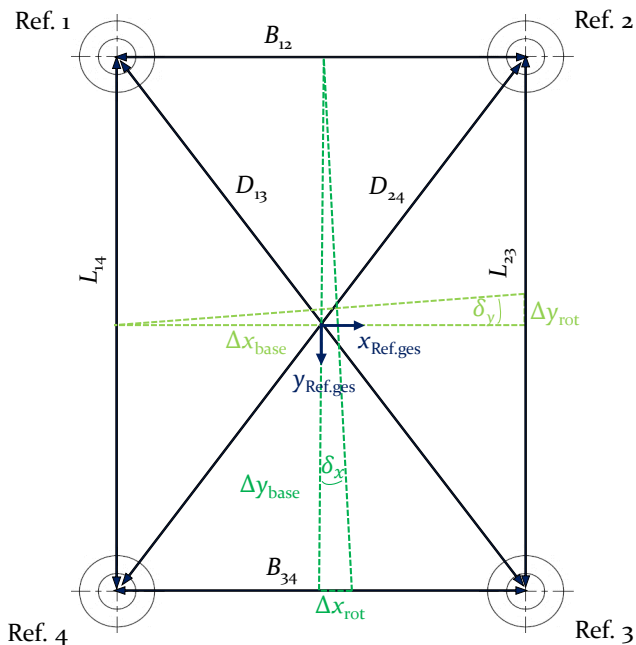


Bild 28: Definition der euklidischen Abstände (B , L und D) und Rotationswinkel (δ_x , δ_y) zwischen den Referenzierungsrohren [Lerchen et al., 2021b]

einzelnen Referenzierungsrohren nach Gleichung 4.3.3 ergaben, wurde weiterhin die Zuverlässigkeit der referenzierten Längenmessung beurteilt.

Ein weiterführender Vergleich der Rotationswinkel δ_x und δ_y , die nach Gleichung 6.2.1 und 6.2.2 berechnet wurden, gab Aufschluss darüber, ob eine Rotation der Kamera relativ zum Referenzierungssystem infolge des temperaturbedingten Prozesseinflusses stattgefunden hatte. In die Berechnung der Rotationswinkel um die x - bzw. y -Achse gingen dabei die entsprechenden relativen Verschiebungen $\Delta x, \Delta y$ der einzelnen Referenzierungsrohre der Gleichungen 6.2.3 – 6.2.6 ein, die schichtweise miteinander verglichen wurden. [Lerchen et al., 2021b]

$$\delta_x = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x_{\text{rot}}}{\Delta y_{\text{base}}}\right) \quad (6.2.1)$$

$$\delta_y = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y_{\text{rot}}}{\Delta x_{\text{base}}}\right) \quad (6.2.2)$$

mit

$$\Delta x_{\text{rot}} = \frac{(x_{\text{Ref.1}} + x_{\text{Ref.2}})}{2} - \frac{(x_{\text{Ref.3}} + x_{\text{Ref.4}})}{2} \quad (6.2.3)$$

$$\Delta y_{\text{base}} = \frac{(y_{\text{Ref.1}} + y_{\text{Ref.2}})}{2} - \frac{(y_{\text{Ref.3}} + y_{\text{Ref.4}})}{2} \quad (6.2.4)$$

$$\Delta y_{\text{rot}} = \frac{(y_{\text{Ref.1}} + y_{\text{Ref.4}})}{2} - \frac{(y_{\text{Ref.2}} + y_{\text{Ref.3}})}{2} \quad (6.2.5)$$

$$\Delta x_{\text{base}} = \frac{(x_{\text{Ref.1}} + x_{\text{Ref.4}})}{2} - \frac{(x_{\text{Ref.2}} + x_{\text{Ref.3}})}{2} \quad (6.2.6)$$

In den nachfolgenden Unterabschnitten wird weiterführend des Verhalten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen von Raumtemperatur bis zur Vorheiz- bzw. Prozesstemperatur von ca. 168 °C analysiert. Weiterhin konnte mittels Thermografiemessungen geklärt werden, ob durch die konstruktionsbedingten Bohrungen des integrierten Referenzierungssystems in der Bauplattform Wärmeverluste im Inneren der Baufläche bei Prozesstemperatur entstanden, die sich auf das Schmelzbad auswirkten.

6.2.1.1 Stabilität bei Raumtemperatur

Um die Positionsstabilität der Referenzierungsrohre bezüglich des Kamerasystems ohne temperaturbedingte Einflüsse zu untersuchen, wurden die

bei Raumtemperatur von ca. 23 °C aufgezeichneten Bilder analysiert. Die Messdaten wurden in kurzen Zeitintervallen mit einer Taktfrequenz von ca. zwei Sekunden aufgezeichnet. Bei der Auswertung der 30 ermittelten Schwerpunkte der jeweiligen Referenzierungsrohre zeigte sich nach den Streudiagrammen aus Bild 29 eine Streuung von ca. $\pm 2 \mu\text{m}$. Analog zu den errechneten Standardabweichungen der einzelnen Referenzierungsrohre fiel auch die Standardabweichung des gemeinsamen Referenzierungsursprungs mit $1,1 \mu\text{m}$ in x -Richtung und $0,4 \mu\text{m}$ in y -Richtung gering aus. Zwar konnten durch Langzeitmessungen über 90 Minuten, die mit einer Taktfrequenz von einem Bild in einem Zeitintervall von jeweils 5 Minuten aufgezeichnet wurden, leicht erhöhte Standardabweichungen von ca. $1 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden (vgl. Anhang A.3), insgesamt deutete dies aber auf ein sehr positionsstabiles Referenzierungssystem bei Raumtemperatur hin.

Die einzelnen Abstände zwischen den Referenzierungsrohren in Bild 30 a) wiesen Standardabweichungen $s < 0,7 \mu\text{m}$ auf, was auf eine sehr reproduzierbare Abstandsbestimmung hindeutete. Auch die Auswertung der Verschiebungen hinsichtlich einer resultierenden Rotation in Bild 30 b) fielen mit Standardabweichungen unter $0,4 \mu\text{m}$ sehr gering aus. Die zugehörigen Rotationswinkel δ_x und δ_y betragen unter $2,8 \cdot 10^{-5}$ rad und wiesen darauf hin, dass das Kamerasystem während der Bildaufzeichnung nicht signifikant um die optische Achse rotierte. [Lerchen et al., 2021b]

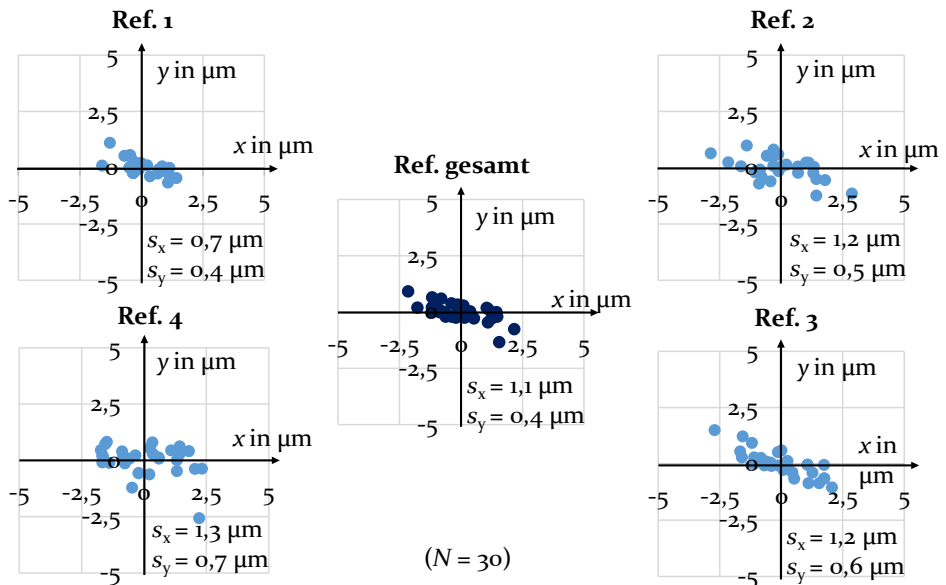


Bild 29: Positionsstabilität der Referenzierungsrohre bei Raumtemperatur

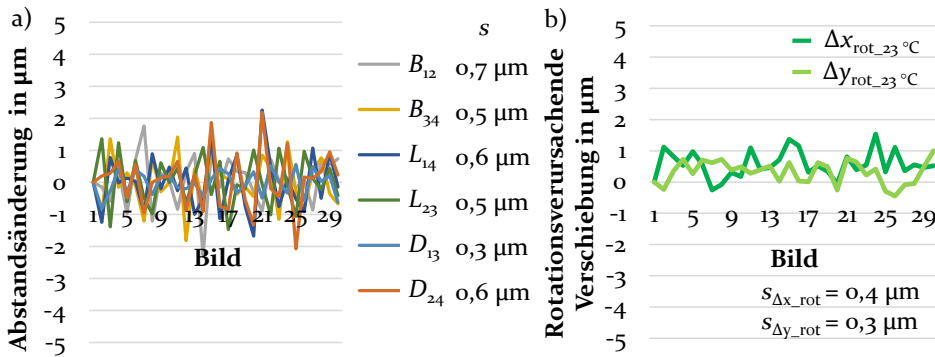


Bild 30: Auswertung der a) Schwankung der ermittelten euklidischen Abstände zwischen den Referenzierungsrohren und der b) Verschiebungen hinsichtlich einer resultierenden Rotation zwischen den Bildern bei Raumtemperatur [Lerchen et al., 2021b]

6.2.1.2 Stabilität beim Aufheizvorgang

Während des Aufheizvorgangs wurde der Bauraum nach Bild 31 durch Infrarot-Heizstrahler von ca. 23 °C Raumtemperatur auf eine Prozesstemperatur von ca. 168 °C erwärmt. Hierbei fand eine maßgebliche thermische Beeinflussung des Gesamtsystems statt. Die Bauraumtemperierung beeinflusste alle Komponenten und Messsysteme in und an der Fertigungsanlage, vom Anlagerahmen, über die Kamerasysteme, den Galvanometer-Scanner, bis hin zu den zugehörigen Haltevorrichtungen in der Optikebene. Durch temperaturbedingte Positionsverschiebungen ΔL der Messsysteme relativ zum Referenzierungssystem in der Aufheizphase wurde allerdings auch der bei Raumtemperatur kalibrierte Ausgangszustand der Kameras beeinflusst.

Aufgrund der unterschiedlichen Entfernung und Abschirmung der Messglieder von der Wärmequelle fielen im Verlauf der Bauraumtemperierung die erfassten Temperaturunterschiede $\Delta\vartheta$ bis zum Beginn des additiven Fertigungsprozesses unterschiedlich aus. Um dies näher zu analysieren wurden beispielhaft die Ausdehnungen einzelner Komponenten entlang der Fertigungs- und Messkreise analysiert. Die von der Prozesskammer entkoppelten Stative der Schmelzbadkameras und des Scanners in der Optikebene wurden in der Aufheizphase um $\Delta\vartheta_{\text{Optik}} \approx 16 \text{ K} - 18 \text{ K}$ erwärmt. Unter Berücksichtigung des spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Item-Stative aus Aluminium mit $\alpha_{\text{Al}} = 23,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ [Item, 2019] ergab sich nach Gleichung 2.3.4 eine richtungsabhängige, relative Längendehnung bis zu 0,04 %.

$$\Delta L / L_{\text{o Halterung}} = \alpha_{\text{Al}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{Optik}} = 23,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 18 \text{ K} \cdot 100 \% = 0,04 \%$$

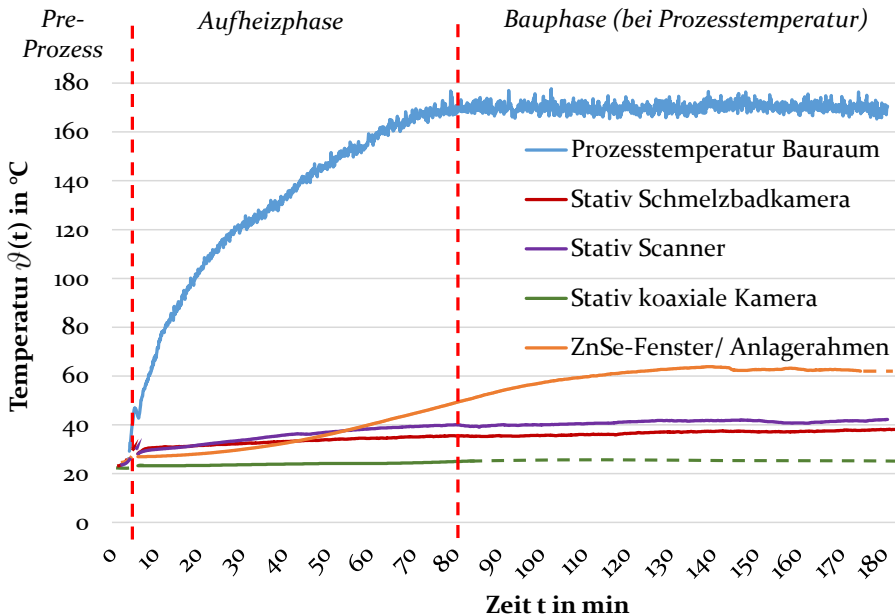


Bild 31: Pt100-Temperaturmessung im Bauraum und in der Optikebene

Dies entsprach einer absoluten Längenänderung ΔL der Halterung der Schmelzbadkamera in y -Richtung von ca. 200 μm , sofern eine Ausgangslänge der Querverstrebung von $L_{\text{Halterung}} = 480 \text{ mm}$ (vgl. Bild 16) zu Grunde gelegt wurde.

Das Stativ der coaxialen Kamera unterlag hingegen aufgrund der größeren Entfernung zur beheizten Prozesskammer und einer Temperaturdifferenz von ca. 3 K nur einer vergleichsweise geringen temperaturbedingten Längendehnung von $< 0,01 \%$. Die Längenänderung des Anlagerahmens in der Aufheizphase betragen ca. 0,05 %. Nach der Vorheizung des Bauraums, in der sich der Rahmen nach ca. zwei Stunden um insgesamt 40 K aufgewärmt hatte, traten aufgrund des geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl (S235JR) mit $\alpha_{\text{Stahl}} = 11,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ [Thyssenkrupp, 2017] nur noch sehr kleine, vernachlässigbare Längenänderung auf.

Wurden weiterhin die temperaturbedingten Längenänderungen der Referenzierungsrohre betrachtet, so wurden die materialspezifischen Vorteile des Quarzglas deutlich, welches einen vergleichsweise geringen Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_{\text{Quarzglas}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{K}}$ aufwies [Qsil, 2013]. Wie aus zusätzlichen Thermografiemessungen (vgl. Unterabschnitt 6.2.1.4) hervorging, wurde eine prozessbedingte Temperaturerhöhung an den Referenzierungsrohren auf der Pulverbettebene von $\Delta\vartheta_{\text{Ref}} \approx 120 \text{ K}$ gemessen. Bei einem

Ausgangsdurchmesser D_o von 20 mm ergab sich durch die Aufheizphase eine maximale relative Durchmesseränderung $\Delta D / D_o$ der Referenzierungsrohre von 0,01 %. Dies entsprach einer temperaturbedingten Dehnung von nur 1 μm . Im Vergleich zu den gleich temperierten Bauraumkanten aus Stahl mit einer Kantenlänge von 350 mm, die bei $\Delta\vartheta$ von 120 K eine Längendehnung von ca. 500 μm in Längsrichtung aufwiesen, fiel diese laterale Dehnung sehr gering aus. In den folgenden Auswertungen konnte diese Dehnung der Referenzierungsrohre vernachlässigt werden, da sie zudem deutlich kleiner als die Auflösung der Schmelzbadkameras war.

Weiterhin war zu prüfen, ob die temperaturbedingte Längendehnung der Referenzierungsrohre auch die Encodermessung beeinflusste. Unterhalb der Bauplattform war eine Temperaturerhöhung an der Antriebseinheit der Pulverbettabsenkung sowie dem angebrachten Rotationsencoder-Messsysteme zu verzeichnen (vgl. Anhang A.4). Der ermittelte Temperaturanstieg an den Rotationsencodern betrug ca. $\Delta\vartheta_{\text{Enc.}} \approx 45$ K. Unter der Annahme, dass die Referenzierungsrohre unterhalb der Bauplattform annähernd gleich über die gesamte Länge temperiert wurden, ergab sich bei einer Ausgangslänge der Rohre von 320 mm eine Längenänderung $\Delta L_{\text{Ref.}}$ von 8 μm . Da die Messung der Bauraumabsenkungen nur während des eigentlichen Fertigungsprozesses durchgeführt wurde, bei dem unterhalb der Bauplattform eine annähernd konstante Temperatur mit Schwankungen von ± 2 °C vorherrschte, fiel auch dieser Einfluss mit entsprechenden Längenänderungen $\Delta L_{\text{Ref.}}$ von ca. 0,7 μm sehr gering aus.

Anschließend wurde die Positionsstabilität der Schmelzbadkamera relativ zu den Bildkoordinaten der Referenzierungsrohre analysiert. Dadurch konnte eine Einschätzung der tatsächlichen, relativen temperaturbedingten Verschiebung im Rahmen der Bildauswertung erfolgen. Verglichen mit dem Ausgangszustand bei 23 °C war beim LBM-P-Prozess nach Bild 32 eine signifikante temperaturbedingte Drift bis zum Erreichen der Prozesstemperatur bei 168 °C zu verzeichnen. Im vorliegenden Fall bedingte dieser Temperatureinfluss eine relative Positionsverschiebung des Bezugskoordinatensystems des vom Kamerasystem detektierten Referenzierungssystems in Kamerakoordinaten von insgesamt 868 μm . Nach der vorherigen Analyse der Temperaturbeständigkeit des Referenzierungssystems lag daher die Vermutung nahe, dass die Ursache dieser Verschiebung maßgeblich auf Längenänderungen entlang des gesamten Anlagerahmens, sowie der Halterung des Kamerasystems relativ zu den Referenzierungsrohren zurückzuführen war. Zusätzlich war mit einem zunehmenden temperaturbedingten Einfluss von Hitzeblimmern zu rechnen. Durch aufsteigende erwärmte Luftschichten traten Luftschlieren durch einen variierenden Brechungsindex der Luft in der Prozesskammer auf,

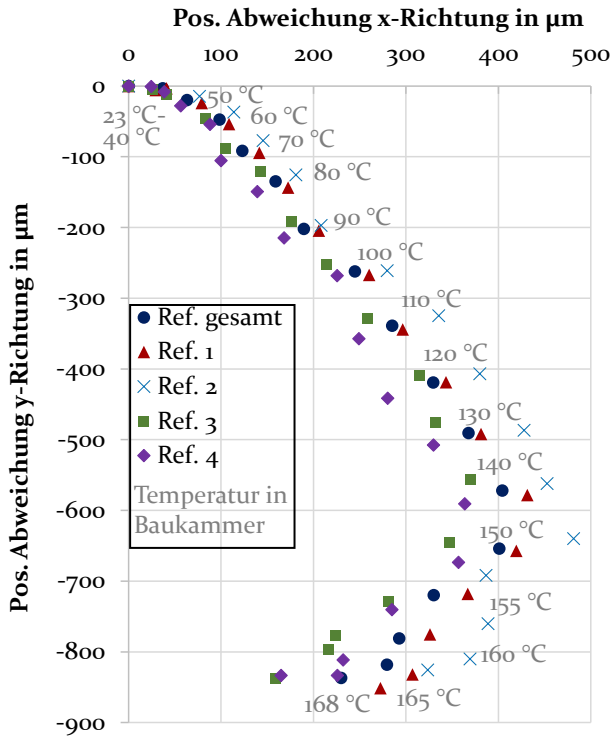


Bild 32: Temperaturbedingte Drift des Schmelzbadkamerasystems relativ zu Referenzierungsrohren bei Aufheizvorgang [Lerchen et al., 2021b]

die die optische Messung lokal beeinflussten, jedoch schwer zu quantifizieren waren [Schewe et al., 2020].

Diese Einflussfaktoren wirkten sich folglich auf die Abstandsermittlung zwischen den Referenzierungsrohren aus und bedingten nach Bild 33 a) zunehmende temperaturbedingte Messwertschwankungen. Während die Abstandsänderung bei Raumtemperatur noch ca. $\pm 1 \mu\text{m}$ betragen, traten in Folge der Aufheizphase kurz nach dem Erreichen der Prozesstemperatur von 168°C bereits Schwankungen von ca. $\pm 25 \mu\text{m}$ auf. Mit der ansteigenden Temperatur wurden auch rotatorische Verschiebungen vor allem um die x-Achse nach Bild 33 b) verzeichnet. Diese hatten signifikante rotatorische Driften mit Rotationswinkeln bis zu $4,8 \cdot 10^{-5}$ rad zur Folge. Die Korrelation der temperaturabhängigen Verschiebungen hinsichtlich einer resultierenden Rotation konnte mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten $r(\Delta x_{\text{rot}}, \Delta y_{\text{rot}}) = 0,68$ bestätigt werden. Zudem deutete der zugehörige Pearson Koeffizienten ($p = 0,001 < 0,05$) auf einen variierenden Betrachtungswinkel des Kamerasystems während der Prozessüberwachung hin. [Lerchen et al., 2021b]

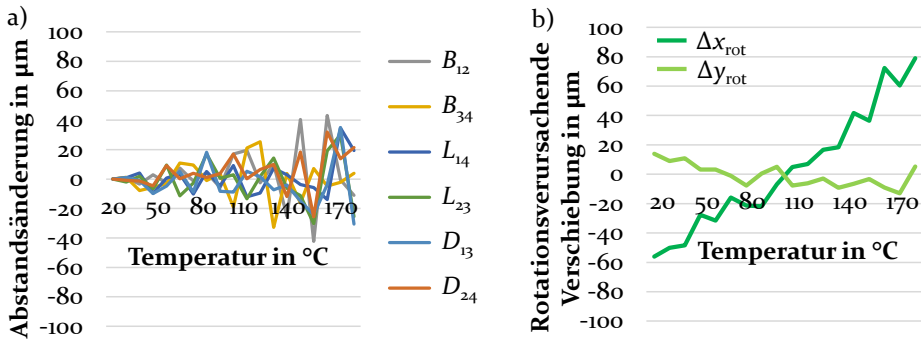


Bild 33: Auswertung der a) Schwankung der ermittelten euklidischen Abstände zwischen den Referenzierungsrohren und der b) Verschiebungen hinsichtlich einer resultierenden Rotation zwischen den Bildern während des Aufheizvorganges [Lerchen et al., 2021b]

Die beobachteten Driften fielen zwar bei der *in situ*- bzw. *in-Prozess*-Kontrolle, die bei annähernd homogenen Prozessbedingungen in der Bauphase erfolgten, deutlich kleiner aus, relative Positionsverschiebungen bei Prozesstemperatur waren dennoch nicht auszuschließen und werden daher im nachfolgenden Unterabschnitt näher beleuchtet.

6.2.1.3 Stabilität bei Prozesstemperatur

Wurde weiterführend die Kurzzeit-Positionsstabilität des Kamerasystems zum Referenzierungssystem bei annähernd homogenen Fertigungsbedingungen beim LBM-P mit einer Prozesstemperatur von ca. 168 $^{\circ}\text{C}$ betrachtet, so wurde anhand der Streudiagramme der detektierten Schwerpunkte in Bild 34 eine zufällige Streuung der einzelnen Punkte von bis zu 25 μm deutlich. Die rechnerische Mittelung (in x - und y -Richtung) der einzelnen Rohrschwerpunkte zu einem gemeinsamen Punkt im Zentrum des Arbeitsbereiches ermöglichte nahezu eine Halbierung der Gesamtstreuung auf ca. $\pm 12 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von 6,4 μm in x - bzw. 8,2 μm in y -Richtung. Diese Tendenz wurde auch bei der Langzeitmessung über 90 Minuten bei Prozesstemperatur deutlich (vgl. Anhang A.5). Die Streuung und Standardabweichung der Messdaten fiel im Rahmen der Langzeitbetrachtung des Referenzierungssystem bis auf vereinzelte, leicht erhöhte Kennwerte ähnlich zu den Standardabweichungen der Kurzzeitmessungen aus. Bei homogenen Prozessbedingungen während der Bauphase war nach Bild 31 an den Halterungen in der Optikebene eine maximale Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta_{\text{Optik}} < 3 \text{ K}$ vorhanden. Diese ging, in Analogie zu den Betrachtungen des vorausgegangenen Unterabschnitts 6.2.1.2, mit einer prozentualen Längendehnung des Item-States der Schmelzbadkamera von $\Delta L / L_{\text{o Halterung}} < 0,01 \%$ einher und fiel damit deutlich kleiner aus als in der Aufheizphase.

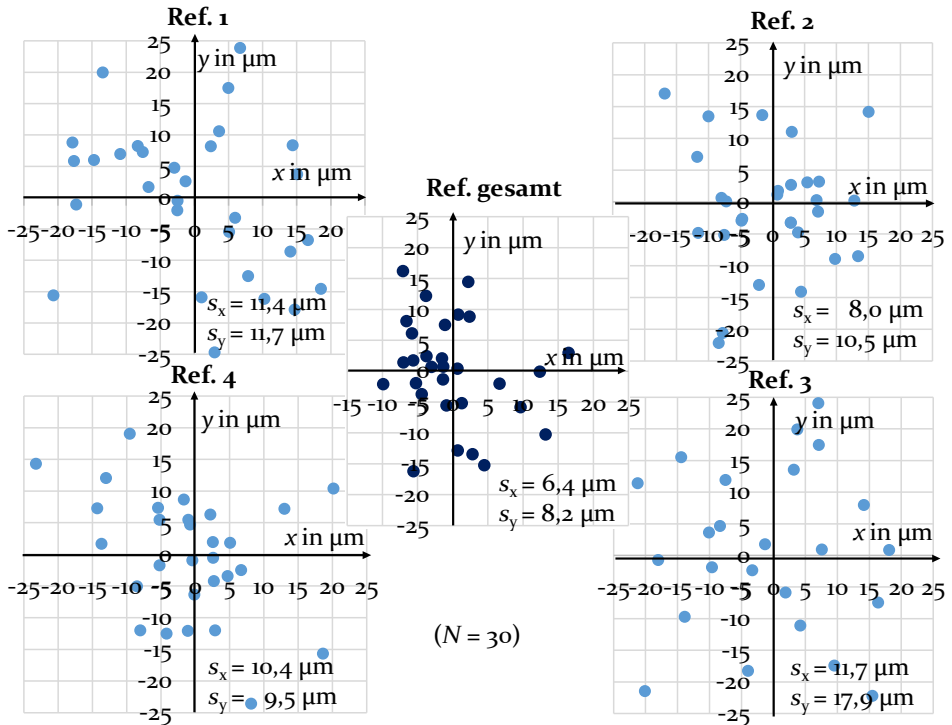


Bild 34: Positionsstabilität der Referenzierungsrohre bei Prozesstemperatur [vgl. Lerchen et al., 2021b]

Das Referenzierungssystem war zwar durch seine Positionierung inmitten der temperierten Prozesskammer höheren Temperaturschwankungen von bis zu $\Delta\vartheta_{\text{Bauraum}} \approx 10 \text{ K}$ ausgesetzt, der verkürzte Messkreis der Quarzglasrohre, der Bauplattform und des PA12-Pulvers wies aufgrund der geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien jedoch geringere relative Längendehnungen auf. Im Vergleich zur herkömmlichen Referenzierung, die über die Bauraumkanten aus Stahl erfolgte (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.4), besaß das im Pulverbett integrierte Referenzierungssystem aus Quarzglas weitere deutliche Vorteile bei der Erfassbarkeit und der Auswertung der verkürzten Messabstände (vgl. Abschnitt 6.4.4).

Nach Bild 35 a) wurden weiterhin die Abstandsänderungen zwischen den Referenzierungsrohren unter Prozessbedingungen von ca. 168°C ausgewertet. Die ermittelten Standardunsicherheiten der euklidischen Abstände betragen ca. $13 \mu\text{m} - 19 \mu\text{m}$. Dies deutete erneut darauf hin, dass die Längenmessung durch einzelne Elemente infolge der Temperaturschwankungen entlang des Messkreises beeinflusst wurde. Zwar traten auch geringe Schwankungen der Verschiebungen hinsichtlich einer resultierenden Rotation auf, die nach

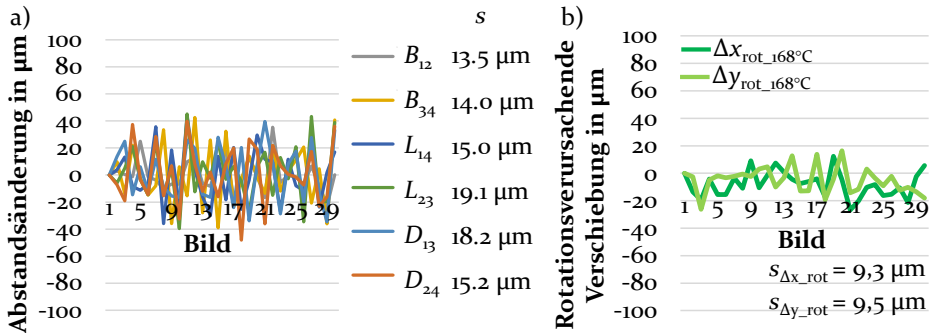


Bild 35: Auswertung der a) Schwankung der ermittelten euklidischen Abstände zwischen den Referenzierungsrohren und der b) Verschiebungen hinsichtlich einer resultierenden Rotation zwischen den Bildern unter Prozessbedingungen von ca. 168 °C [Lerchen et al., 2021b]

Bild 35 b) Standardabweichungen von ca. 9 μm aufwiesen, diese waren jedoch nicht signifikant. Die entsprechenden Rotationswinkel fielen mit $2,3 \cdot 10^{-5}$ rad erneut vergleichsweise klein aus und deuteten nur auf eine unwesentliche Rotation des Kamerasystems zum Referenzierungssystem unter Prozessbedingungen hin. [Lerchen et al., 2021b]

Auf Grundlage der ermittelten Positionsstabilität des Referenzierungssystems im Pulverbett wurde im Rahmen der nachfolgenden Referenzierung das Ziel verfolgt, die laterale Lage der einzelnen Bauteilkonturen in den einzelnen Schichten zueinander bereits vor der Entnahme der gefertigten AM-Bauteile genau zu ermitteln. Wie sich in den vorausgegangenen Auswertungen gezeigt hatte, ermöglichten die mit der Bauplattform verbundenen, im Pulverkuchen eingebetteten Referenzierungsrohre hierbei einen besseren Bezug als die Bildkoordinaten der Kameras mit temperaturbedingten Driften.

6.2.1.4 Temperaturbedingte Beeinflussung des Pulverbettes durch das Referenzierungssystem

Da eine temperaturbedingte Beeinflussung des Pulverbettes durch das in vier Bohrungen der Bauplattform eingebrachte Referenzierungssystem (vgl. Unterabschnitt 3.1.1.2) bei Prozesstemperatur nicht auszuschließen war, erfolgte eine thermografische Analyse der Wärmeverteilung der Baufläche mit Hilfe der IR-Thermografiekamera (vgl. Abschnitt 3.2.2). Wie aus Bild 36 hervorgeht, wurden die Randbereiche des Arbeitsbereiches (ROI) zwar durch die vier im Pulverbett integrierten Referenzierungsrohre lokal thermisch beeinflusst, im Zentrum der Baufläche lag jedoch eine sehr homogene Temperaturverteilung der PA12-Pulverschicht vor. Hier wurden die materialspezifischen Vorteile der geringen spezifischen Wärmekapazität ($c_{p_{\text{Quarzglas } 168^\circ\text{C}}} \approx 0,9 \text{ J/gK}$) und Wärmeleitfähigkeit

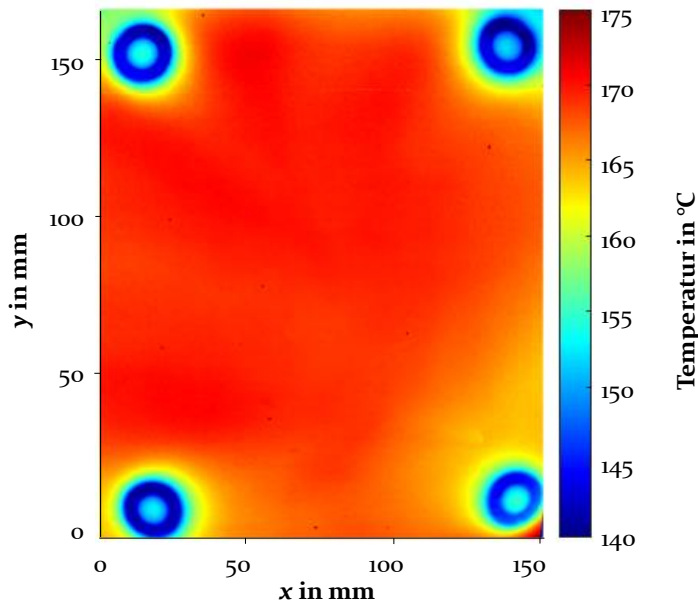


Bild 36: Thermografiebild der Baufläche

($\lambda_{\text{therm Quarzglas } 168^\circ\text{C}} \approx 1,2 \text{ W/mK}$) der verwendeten Referenzierungsrohre aus Quarzglas ersichtlich [Qsil, 2020]. Anders als das auf Prozesstemperatur von ca. 168°C temperierte Pulverbett, erwärmten sich die Referenzierungsrohre nur auf ca. $140^\circ\text{C} - 145^\circ\text{C}$. Die temperaturbedingte Beeinflussung des Pulverbettes fiel insgesamt sehr lokal in einem Radius von wenigen Millimetern um die Referenzierungsrohre aus, da die Wärmeleitfähigkeit des Pulvers parallel zur Sinterschicht (mit $\lambda_{\text{therm PA12}} = 0,127 \text{ W/mK}$) ungefähr um den Faktor 10 kleiner ausfiel als die der Quarzglasrohre (DIN 52616: 1977-11). Daraus resultierte eine vernachlässigbar kleine, temperaturbedingte Beeinflussung des im Fertigungsprozess eingebrachten Schmelzbades im Zentrum des Arbeitsbereiches ROI.

6.2.2 Positionsstabilität bei Pulverauftrag

Eine weitere Entstehungsursache der Positionsverschiebungen des Pulverbettes mit den Bauteilkonturen und des Referenzierungssystems war auf den Einfluss des Pulverauftrags zurückzuführen. Obwohl die Referenzierungsrohre knapp unterhalb des Pulverauftragssystems positioniert wurden (vgl. Unterabschnitt 3.1.1.2) und kein direkter, mechanischer Kontakt zum Raketel bestand, waren dennoch laterale Verschiebungen durch eine Kraftübertragung über das Pulver möglich. Im direkten Vergleich des Rakeleinflusses aus Bild 37 bei Raumtemperatur mit und ohne Pulver im Pulverauftragsbehäl-

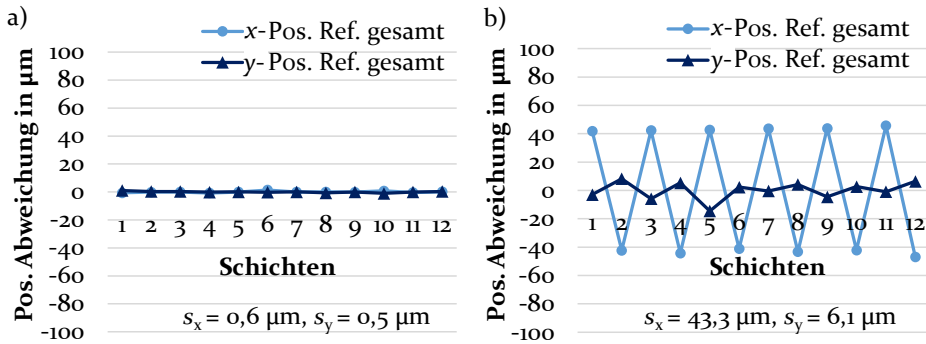


Bild 37: Einfluss des Pulverauftrags auf das Referenzierungssystem bei Raumtemperatur a) ohne Pulver, b) mit Pulver

ter konnte diese aufgestellte Hypothese bestätigt werden. Ohne Kraftübertragung des Pulvers bestand nach Bild 37 a) durch die Rakelbewegung in x -Richtung keine systematische Beeinflussung des Referenzierungssystems, das sich mit einer Standardabweichung von $< 1 \mu\text{m}$ sehr positionsstabil verhielt. Im Gegensatz dazu war nach Bild 37 b) eine regelmäßig alternierende Positionsabweichungen bei einem Pulverauftrag in Auftragsrichtung von $\pm 40 \mu\text{m}$ zu verzeichnen. Die zugehörigen y -Positionen schwankten pulverauftragsbedingt nur im Intervall von ca. $\pm 10 \mu\text{m}$, was darauf hindeutete, dass die Kraftwirkung des Pulvers senkrecht zur Auftragsrichtung geringer ausfiel.

Wurde der Einfluss des Pulverauftrags ohne Beleuchtung und IR-Heizung unter Fertigungsbedingungen der ausgewerteten Schichten bei einer Prozesstemperatur von 168°C in Bild 38 betrachtet, so zeichnete sich ein ähnlicher Trend ab. Die Standardabweichung des gesamten Referenzierungssystems fiel unter den inhomogeneren Fertigungsbedingungen in x -Richtung mit $30,9 \mu\text{m}$ höher aus als in y -Richtung mit $7,2 \mu\text{m}$, was erneut auf einen signifikanten prozessbegleitenden Einfluss des Pulverauftrags hindeutete.

Der Einfluss des Pulverauftragssystem auf das Referenzierungssystem schien beim betrachteten Fertigungsprozess nach Bild 37 b) und 38 im Vergleich zu den temperaturbedingten Effekten zu überwiegen. Um den Einfluss des Pulverauftrags auf das Referenzierungssystem weiter zu reduzieren, wurde für die folgenden Messdatenerhebungen eine Versteifung und Nachjustierung der Federn in den oberen Lagerungen der Referenzierungsrohre vorgenommen. Dadurch konnte vor allem in x -Pulverauftragsrichtung eine verbesserte Positionsstabilität des Referenzierungssystems mit einer nahezu halbierten Gesamtstreuung erreicht werden (vgl. Abschnitt 6.5.1).

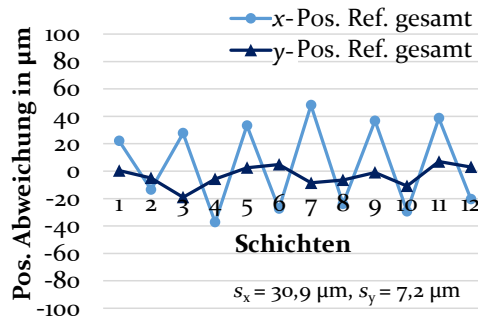


Bild 38: Einfluss des Pulverauftrags auf Referenzierungssystem bei Prozessbedingungen (mit Pulver) [Lerchen et al., 2021b]

6.3 Wiederholpräzision des Scanners

Aufbauend auf der bestätigten Positionsstabilität des Referenzierungssystems wurden die mit der koaxialen Kamera erhobenen Messdaten aus Abschnitt 4.3.3, ohne einen zusätzlichen Einfluss durch den Pulverauftrag, zur Analyse der Wiederholpräzision des Scanners herangezogen. Zur Beurteilung der scannerbedingten Fertigungsabweichungen des verwendeten Miniscan-II-20 Galvanometer-Scanners der Firma Raylase wurden daher die Positionsschwankungen der wiederholt angefahrenen Referenzierungsrohre bei Raumtemperatur und unter homogenen Prozessbedingungen von ca. 168 °C ausgewertet. Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, wurde die Wiederholpräzision des Scanners bei Raumtemperatur durch sehr kleine Standardabweichungen im niedrigen einstelligen Mikrometerbereich geprägt. Die Positionen der Referenzierungsrohre schwankten dabei um ca. $\pm 2 \mu\text{m}$ bei Raumtemperatur und ca. $\pm 5 \mu\text{m}$ unter Prozessbedingungen. Zwar lag beim Erreichen der Prozesstemperatur von 168 °C nach der Temperaturmessung in der Optikebene am Stativ des Scanners eine Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ von 18 K vor (vgl. Bild 31), diese bewirkte jedoch nur eine minimale Drift des Scanners in beiden Raumrichtungen. Weiterhin konnte abgeleitet werden, dass die mechanische Verstellung der Scannerspiegel beim Anfahren der Position des vierten Referenzierungsrohrs vor allem in x -Richtung mit einer leicht erhöhten Wiederholpräzision behaftet war. Anhand der analysierten lokalen Wiederholpräzision des Scanners ließ sich daraus die Empfehlung ableiten, die Positionierung der Bauteile im vorliegenden Fall nicht dort vorzunehmen, da hier erhöhte scannerbedingte Fertigungsabweichungen zu verzeichnen waren. Insgesamt fiel die Größenordnung der detektierten Positionsabweichungen unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen wie erwartet im Bereich der Auflösung des Scanners von $2,6 \mu\text{m}$ aus. Die Auflösung ergab sich dabei aus dem Datenblatt des Herstellers bei einer angegebenen optischen Auslenkung des Scanners von $\pm 0,393 \text{ rad}$ und einer Winkelauflösung

Tabelle 3: Auswertung der Wiederholpräzision des Scanners bei Raumtemperatur und unter Prozessbedingungen ($N = 20$)

Scan- Positionen	Standardabweichung (23 °C)		Standardabweichung (168 °C)	
	s_x in μm	s_y in μm	s_x in μm	s_y in μm
Ref. 1	1,3	0,8	3,0	2,8
Ref. 2	0,5	0,5	3,6	2,9
Ref. 3	1,3	1,1	3,7	3,1
Ref. 4	3,5	2,0	4,6	2,2

von $12 \cdot 10^{-6}$ rad in einem untersuchten Arbeitsbereich (ROI) von 170 mm x 140 mm zwischen den Referenzierungsrohren [Raylase, 2020].

6.4 Wiederholpräzision der Konturauswertung des Schmelzbades

Wie bereits in den vorhergehenden Abschnitten bei der Auswertung der Referenzierungsrohre angesprochen wurde, war die Wiederholpräzision der Konturauswertung bei der *in-Prozess*-Überwachung von zahlreichen Faktoren abhängig. Im Gegensatz zu den Analysen ohne Zusatzbeleuchtung und IR-Heizung (vgl. Abschnitt 6.2) fanden die nachfolgenden Auswertungen unter realen Prozessbedingungen und einer zusätzlichen Ausleuchtung des Bauraums durch Weißlichtquellen (vgl. Abschnitt 4.3.1) statt. Nachdem die für die Bildgebung und geometrische Auswertung wichtigen Schritte der Bildaufbereitung erörtert wurden (vgl. Abschnitt 5.1), widmet sich dieser Abschnitt der Analyse der Wiederholpräzision der Konturauswertung des Schmelzbades. Im Anschluss an Voruntersuchungen zur Reproduzierbarkeit des Auswertalgorithmus und zur Wiederholpräzision der Schmelzbadkammeras durch *in situ*-Kurzzeitmessungen wird der Einfluss der durchschimmernden Wärmestrahlung des Schmelzbades durch die 100 μm dicken PA12-Pulverschichten auf die Konturauswertung dargestellt. Ein Vergleich der Stabilität der referenzierten Schmelzbadanalyse mittels Quarzglasrohren zur bisherigen Referenzierung über Bauraumkanten (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.4) zeigt weiterhin den Vorteil des im Pulverbett integrierten Referenzierungssystems. Ab Abschnitt 6.4.5 werden die additiv gefertigten Zylinder (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2) zur Konturanalyse herangezogen. Mit der Analyse des Einflusses des Betrachtungswinkels der Schmelzbadkammeras erfolgt ein letzter Schritt zur Beurteilung der Wiederholpräzision der Konturauswer-

tung, bevor der eigentliche messtechnische Nachweis referenzierter, lateraler Konturverlagerungen beim betrachteten LBM-Prozess erbracht wird (vgl. Abschnitt 6.5).

6.4.1 Reproduzierbarkeit des Auswertealgorithmus

Zunächst wurde anhand der wiederholten Auswertung eines einzigen Bildes mit variierenden Parametern die Reproduzierbarkeit des verwendeten *Canny*-Kantendetektionsalgorithmus analysiert. Hierzu wurde exemplarisch das Bild der zehnten Schicht des Baujobs herangezogen (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2). Das zugehörige Schmelzbad war darin bereits homogen durch den Wärmeeinfluss der darunterliegenden Fertigungsschichten temperiert. Dies führte zu einem guten Kontrast zum Pulverbett und ermöglichte eine solide Kantendetektion der Bauteilkonturen. Nach der Bildaufbereitung wurden im Rahmen der Konturauswertung nach *Canny* die Einstellparameter der Schwellwerte T_i und der Standardabweichung σ der zur Filterung verwendeten Gaußfunktion entsprechend einer statistischen Versuchsplanung im Anhang A.6 variiert (vgl. Abschnitt 5.2). Die systematische Variation der minimalen und maximalen Intervallgrenzen $[0; 1]$ der Grenzwerte T_i beeinflusste dabei lediglich die Anzahl der erfassten Konturen. Da im nachfolgenden Reduktionsschritt der Kantenauswertung allerdings nur die größte zusammenhängende Kante der Schmelzbad- bzw. Referenzkontur im jeweiligen Auswertebereich betrachtet wurde, hatte eine Variation des Schwellwertes in diesem untersuchten Bereich keinen Einfluss auf das Ergebnis der Kantenerfassung und der Schwerpunktermittlung. Eine Erhöhung des σ -Wertes hingegen reduzierte nicht nur das Umgebungsrauschen der zusätzlich erfassten Kanten, sondern führte auch zu einer unerwünschten Variation der zugeordneten Bauteilgeometrie. Dies beeinflusste besonders Konturen mit scharfen Richtungsänderungen und spitzen Kanten, die durch die Kantendetektion abgerundet wurden. Selbst bei den betrachteten runden Bauteilquerschnitten der AM-Zylinder und Referenzierungsrohre führte eine Erhöhung des σ -Wertes zu einer systematischen Verkleinerung der Querschnittsfläche des Schmelzbades (vgl. Anhang A.6). Trotz der symmetrischen runden Standardgeometrielemente wurden einige Kanten, die einen schlechten Kontrast aufwiesen, stärker beeinflusst als andere, was zu einer Verschiebung des ermittelten Konturschwerpunktes führte.

Demnach sollte zu Beginn der Kantendetektionsauswertung nach *Canny* vor allem der σ -Wert präzise im Vorfeld auf die Umgebungsbedingungen abgestimmt werden, um eine gute Übereinstimmung der erfassten und realen Konturen zu gewährleisten. Nach einer Anpassung und Festlegung der Ausgangsparameter wurden diese bei den folgenden Auswertungen konstant

gehalten, um eine Beeinflussung durch die Auswertesoftware kategorisch auszuschließen.

Weiterhin war zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Auswertalgorithmus eine Beurteilung von Rauscheffekten erforderlich. Das exemplarisch betrachtete Bild b wurde deshalb gezielt mit einem sogenannten „weißen Rauschen“ beaufschlagt, um den Einfluss des Umgebungsrauschens auf die Kantendetektion näher zu analysieren. Nach Gleichung 6.4.1 wurden dabei für jedes Bildpixel zufällige Grauwerte einer gaußverteilten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ($\text{random}(b_{\text{size}})$) mit MATLAB vorgegeben, die mit der Bildgröße b_{size} skalierten. Diese Zufallswerte wurden analog zum Canny-Algorithmus jeweils mit der Standardabweichung σ_{rand} der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion multipliziert und mit den einzelnen Bildpixeln überlagert. Zusätzlich konnte eine systematische Verschiebung \bar{x}_{offset} um den Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion vorgegeben werden. Diese wurde bei den vorliegenden Analysen jedoch auf null gesetzt, um nur den zufälligen Einfluss des Umgebungsrauschens zu simulieren.

$$b_{\text{rausch}} = b + \sigma_{\text{rand}} \cdot \text{random}(b_{\text{size}}) + \bar{x}_{\text{offset}} \quad (6.4.1)$$

Durch die Vorgabe der verwendeten Standardabweichung σ_{rand} der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion konnte damit ein unterschiedlich stark ver-rauschtes Bild b_{rausch} erzeugt werden. Eine Standardabweichung σ_{rand} von 0,03 führte nach Bild 39 a) zu einer unwesentlichen Veränderung des Originalbildes b . Ansteigende Standardabweichungen σ_{rand} bis 0,3 in den Bildern 39 b) und c) bedingten hingegen zunehmende Rauscheinflüsse. Daraus resultierten lokal veränderte Grauwertkontraste der einzelnen Bildpixel, die vermehrt eine genaue Zuordnung der detektierten Konturen erschwerten. Dies ging auch aus einer Analyse des Rauscheinflusses aus Tabelle 4 hervor.

Mit einem größer werdenden σ_{rand} -Wert waren steigende Standardabweichungen s_x, s_y bei der Ermittlung der jeweiligen Konturschwerpunkte zu verzeichnen. Diese betragen bei dem vermeintlich unverfälschten Bild 39 a) bis zu $4,7 \mu\text{m}$ bei den kleinen Schmelzbadkonturen. Das Referenzierungssystem wies aufgrund der gesonderten LED-Beleuchtung gegenüber den additiv gefertigten Zylindern die geringste Sensitivität unter schwachen Rauscheinflüssen ($\sigma_{\text{rand}} < 0,1$) auf. Ab einem eingestellten σ_{rand} -Wert von ca. 0,2 wurden bereits einige Konturen nur noch teilweise oder unvollständig erfasst. Dadurch traten gravierende Messabweichungen bei der Schwerpunktermittlung im Rahmen der Kantendetektion auf.

Insgesamt konnte durch die zusätzliche Ausleuchtung des Bauraums (vgl. Abschnitt 4.3.1 und 5.1.2) das Umgebungsrauschen weitestgehend unterdrückt werden, das beispielsweise durch Intensitätsschwankungen des IR-

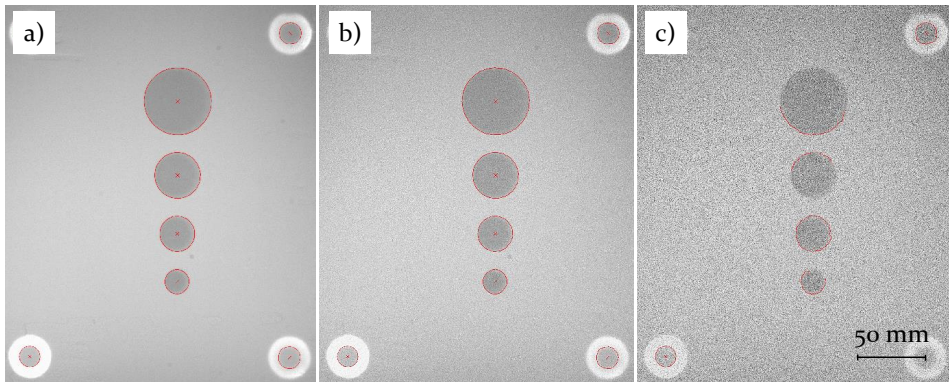


Bild 39: Perspektivisch korrigiertes Bild überlagert mit weißem Rauschen unterschiedlicher Standardabweichungen σ_{rand} a) 0,03; b) 0,1; c) 0,3

Tabelle 4: Analyse des Rauscheinflusses auf Schwerpunktermittlung bei der Kantendetektion ($N = 30$, $\sigma = 8$ px)

Schwerpunkt- auswertung Std.abw. in μm	Std.abw σ_{rand} (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion)									
	0,03		0,07		0,10		0,22		0,30	
	s_x	s_y	s_x	s_y	s_x	s_y	s_x	s_y	s_x	s_y
Ref. gesamt	1,8	2,4	5,1	4,5	5,2	6,9	30,3	17,8	44,6	17,1
Zylinder 30	3,5	3,2	8,6	6,7	10,1	9,4	18,0	21,6	-	-
Zylinder 20	3,7	3,5	6,0	6,8	12,0	10,2	29,3	16,1	29,8	36,3
Zylinder 15	3,6	4,3	7,8	8,5	11,5	13,9	30,5	33,1	21,3	33,1
Zylinder 10	4,7	4,7	11,8	12,4	15,7	15,6	36,6	41,4	-	-

Heizstrahlers hervorgerufen wurde. Da eine komplette Vermeidung der Rauscheinflüsse, trotz der durchgeführten Gaußfilterung und annähernd homogenen Bedingungen bei der Bilderfassung nicht garantiert werden konnte, war dennoch mit geringen zufälligen Messabweichungen im Verlauf der Bildauswertung zu rechnen.

6.4.2 Wiederholpräzision der Schmelzbadkameras

Auf Grundlage des reproduzierbaren Auswertalgorithmus wurde weiterhin die Wiederholpräzision der Schmelzbadkameras untersucht. Anhand von 30 im Zeitraum von 45 Sekunden ausgewerteten Bilddaten der selben Szene im Nachgang an den Energieeintrag des Lasers, wurde die Positionsstabilität des referenzierten Schmelzbades analysiert. Wie aus Bild 40 ersichtlich wird,

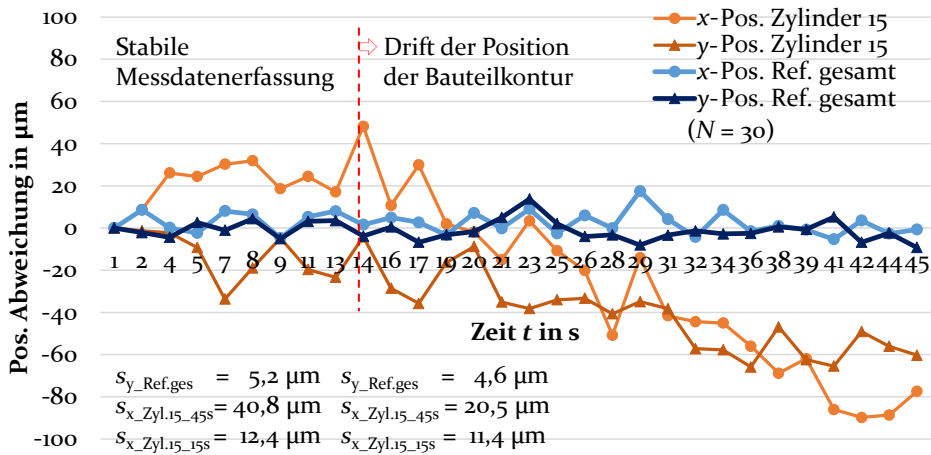


Bild 40: Wiederholpräzision der Schmelzbadkamera bei Kurzzeitmessung des referenzierten Schmelzbades

war das Messsystem samt den Referenzierungsrohren über den betrachteten Zeitraum sehr positionsstabil. Es wurde eine Standardabweichung von $5,2 \mu\text{m}$ in x -Richtung und $4,6 \mu\text{m}$ in y -Richtung verzeichnet. Eine Positionsstabilität der Schmelzbadkonturen lag hingegen nur bedingt in einem kurzen Zeitintervall unmittelbar nach dem Energieeintrag vor. Bezogen auf den Ausgangszustand des ersten Bildes der Schmelzbadkamera war eine positionsstabile Auswertung der Schmelzkonturen in den ersten 15 Sekunden nach dem Energieeintrag zu empfehlen. In diesem Zeitintervall lag eine Standardabweichung von $12,4 \mu\text{m}$ in x - bzw. $11,4 \mu\text{m}$ in y -Richtung vor. Diese fiel im Vergleich zur angegebenen Gesamtstandardabweichung der Schmelzbadkontur über den gesamten Messzeitraum mit $s_{x_Zyl.15} = 40,8 \mu\text{m}$ bzw. $s_{y_Zyl.15} = 20,5 \mu\text{m}$ deutlich geringer aus. Erfolgte die Bilderfassung zu einem späteren Zeitpunkt, so spielten neben inhomogenen temperaturbedingten und beleuchtungssensitiven Faktoren zunehmend materialspezifische Effekte τ , wie einsetzende Schwindungseffekte oder die Wärmeübertragung aus unterliegenden Schmelzbadschichten eine Rolle bei der Konturauswertung. Es resultierte eine zeitabhängige Drift der detektierten Schwerpunkte der Bauteilkonturen, die nach Bild 40 bereits nach ca. 15 Sekunden einsetzte. Die folgende prozessbegleitende Messdatenerfassung erfolgte deshalb einheitlich in einem festgelegten Zeitintervall zwischen 5 s – 10 s unmittelbar nach dem Energieeintrag des Lasers, was eine annähernd reproduzierbare Konturauswertung ermöglichte.

6.4.3 Einfluss der Wärmestrahlung des Schmelzbades durch Fertigungsschichten

Um zu ermitteln, ob die emittierte Wärmestrahlung des aufgeschmolzenen Schmelzbades auch noch nach dem Pulverauftrag durch eine dünne PA₁₂-Pulverschicht erkennbar war, erfolgte eine weiterführende Konturanalyse. Für den Nachweis der pulverauftragsbedingten Konturverlagerung wurden die durchschimmernden Bauteilkonturen herangezogen (vgl. Abschnitt 3.1.3). In einem Vorversuch war zunächst zu klären, bis zu welcher Schichtdicke eine reproduzierbare Konturauswertung der durchschimmernden Schmelzbadkontur noch möglich war. Um weiterhin bewerten zu können, welchen Einfluss prozessbedingte Konturverlagerungen tiefer gelegener Fertigungsschichten auf die aktuelle Konturauswertung ausübten, erfolgte eine schichtweise *in situ*-Überwachung des Stufenversatzkörpers und der doppelseitigen Schräge (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.3). Anhand der systematisch vorgegebenen, lateral versetzten Querschnitte der AM-Probekörper konnte die Auswirkung der Wärmestrahlung auf das Ergebnis der Kantendetektion beurteilt werden.

6.4.3.1 Analyse des Schichtdickeneinflusses

Die Analyse des Einflusses der überlagerten Pulverschichtdicke auf die Konturauswertung erfolgte mit Hilfe der aufgezeichneten *in situ*-Messdaten der aufgeschmolzenen Zylinder nach einem sukzessiven Pulverauftrag von jeweils 100 µm ohne Energieeintrag im Nachgang an den LBM-Fertigungsprozess (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2). Wie aus Bild 41 hervorgeht, wurde hierbei untersucht, wie lange die zylindrischen Schmelzbadkonturen mit zunehmender Anzahl aufgetragener PA₁₂-Pulverschichten noch vom Kantendetektionsalgorithmus reproduzierbar auswertbar waren. Bei den exemplarisch ausgewerteten Bildern mit unterschiedlichen Schichtdicken über dem Schmelzbad wurde ersichtlich, dass eine realitätsnahe Kantendetektion der runden Zylinderquerschnitte bis zu einer Schichtdicke von ca. 0,3 mm reproduzierbar möglich war. Damit war bereits die Grundvoraussetzung für einen Vergleich der Position der aufgeschmolzenen Fertigungsschicht zu der nachfolgenden 100 µm dünnen, durchschimmernden Pulverschicht für den Nachweis pulverauftragsbedingter lateraler Konturverlagerungen gegeben (vgl. Abschnitt 6.5). Ab einer PA₁₂-Pulverschicht von ca. 0,4 mm – 0,6 mm traten zunehmende Formabweichungen der detektierten Konturen auf. Aufgrund des immer schwächer werdenden Kontrastes zum Pulverbett wurden spätestens ab einer Schichtdicke von 0,7 mm einzelne Konturen nur noch unzureichend erkannt. Dadurch war teilweise keine Schwerpunktermittlung mehr möglich. Ab einer Pulverschicht von ca. 1 mm konnten die durchschimmernden zylindrischen Bauteilkonturen nur noch als unförmige Kreis-Segmente zugeordnet werden.

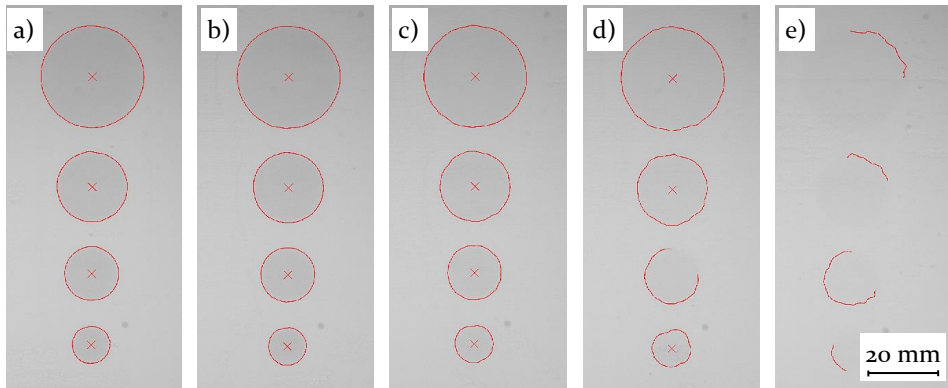


Bild 41: Kantendetektion der durchschimmernden Zylinder mit PA12-Schichtdicken von a) 0,1 mm; b) 0,3 mm; c) 0,5 mm; d) 0,7 mm; e) 1,0 mm

Sie besaßen daher keine Relevanz mehr für eine positionsgenaue Konturerfassung der durchschimmernden Bauteilkontur.

6.4.3.2 Analyse der detektierten lateralen Konturverlagerung

Im vorausgegangenen Unterabschnitt konnte zwar nachgewiesen werden, dass die Schmelzbadkonturen durch vereinzelte, dünne Fertigungsschichten reproduzierbar auswertbar waren, es wurde jedoch noch nicht untersucht, welchen Einfluss dies auf die schichtweise Konturerfassung der aktuellen aufgeschmolzenen Schicht hat. Um die systematischen Messabweichungen aufgrund der durchschimmernden Schichten zu charakterisieren, wurden deshalb zusätzlich die schichtweisen *in situ*-Messdaten der vorgestellten AM-Probekörper des Stufenversatzkörpers und der doppelseitigen Schräge herangezogen (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.3). Wie aus dem kontrastverstärkten Bild 42 a) des Stufenversatzkörpers der exemplarisch dargestellten 17. Fertigungsschicht hervorgeht, wurden im Verlauf der Fertigungsüberwachung drei verschiedene referenzierte Bereiche des Schmelzbades ausgewertet. Diese wiesen aufgrund der Wärmestrahlung und tiefreichenden Transparenz darunter gelegener Schichten verschiedene Grauwertverteilungen auf. Die gefilterten Grauwerte der ersten 15 übereinanderliegenden Fertigungsschichten des blau markierten Bereichs in der obersten Auswertung von Bild 42 b) waren unmittelbar vergleichbar mit der Grauwertauswertung der Probekörper aus Bild 24. Aufgrund des steigenden Wärmeeinflusses und der tiefreichenden Transparenz des Schmelzbades wies die Schmelzzone im Verlauf der schichtweisen Fertigung zunehmend kleinere Grauwerte auf. Sie erschien damit dunkler, was zu einem zunehmend besseren Kontrast zum umgebenden Pulverbett führte. Bei den Fertigungsschichten 16 bis 30 erfolgte anschließend ein systematischer Versatz der Schmelzzone um eine halbe

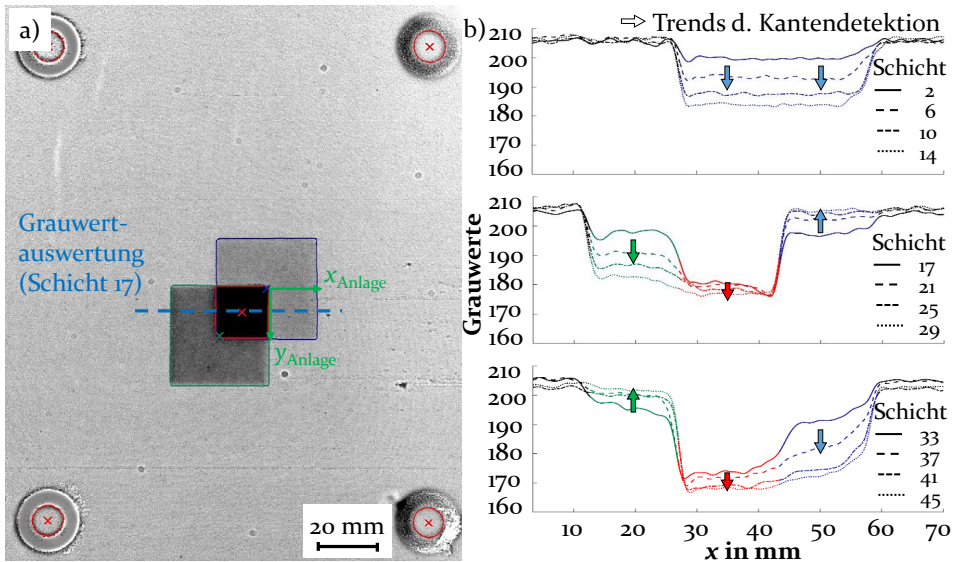


Bild 42: Auswertung der *in situ*-Messdaten des Stufenversatzkörpers: a) Kantendetektion (verstärkter Kontrast); b) Schichtweise Auswertung der gaußgefilterten Grauwertverteilungen

Kantenlänge ($\cong 15$ mm) in den lateralen Raumrichtungen auf die Position des grün markierten Schmelzbadbereiches in Bild 42 a). In Analogie zu den Untersuchungen aus Unterabschnitt 6.4.3.1 konnte im blauen Messbereich, in dem kein weiterer Energieeintrag erfolgte, ein immer schwächerer Kontrast in Abhängigkeit der Pulverschichtdicke beobachtet werden. Gleichzeitig war nach der Auswertung der exemplarisch betrachteten Fertigungsschichten 17–29 in der Mitte des Bildes 42 b) ein ansteigender Kontrast im neu eingebrachten, grünen Schmelzbereich zu verzeichnen. Im überlappenden, roten Bereich im Zentrum des Bauraums, der kontinuierlich über alle Fertigungsschichten aufgeschmolzen wurde, lag aufgrund der größte Grauwertunterschied zum umgebenden Pulverbett vor. Für die letzten 15 Schichten wurde das rechteckige Schmelzbad auf die Ausgangsposition verschoben. Dadurch konnte erneut eine Kontrastverstärkung vor allem des blauen Messbereichs in der letzten Grauwertauswertungen aus Bild 42 b) bewirkt werden. Der Übergang des roten und blauen Bereichs war aufgrund des Einflusses der tiefer gelegenen Schichten immer schwerer auszumachen. Ursache dafür war, dass ein zu kleiner Grauwertunterschied einen unspezifischen Übergang zwischen den Bereichen bedingte, der zu einer mehrdeutigen Kantenzuordnung und dadurch fehlerhaften Konturerfassung führte.

Insgesamt zeigte sich aus zugehörigen Konturauswertungen des schichtweise ausgewerteten Stufenversatzkörpers, dass eine gute Abgrenzung des aktuell eingebrachten Schmelzbades vom Pulverbett erst nach einigen (ca.

5 – 10) Fertigungsschichten des Baujobs möglich war. Dabei war ein markanter Grauwertunterschied von mehr als 20 ausschlaggebend für eine eindeutige Kantendetektion. Durchschimmernde Bauteilkonturen waren nur durch dünne Fertigungsschichten bis ca. 300 μm realitätsnah detektierbar, was das Ergebnis aus Unterabschnitt 6.4.3.1 bestätigte. Anhand der letzten Grauwertauswertung wurde deutlich, dass tiefer gelegene Schichten, bedingt durch einen immer schwächeren Grauwertübergang zwischen den Schmelzbereichen, einen direkten Einfluss auf die Kantendetektion der obersten Fertigungsschicht ausübten. Dieser lokale Einfluss der durchschimmernden Bauteilkonturen auf die Kantenfindung der aktuellen Fertigungsschicht war allerdings schwierig zu quantifizieren.

Um weiterhin den Einfluss der durchschimmernden Schichten in der Größenordnung der detektierten, pulverauftragsbedingten Verschiebungen (vgl. Abschnitt 6.2.2) besser beurteilen zu können, wurde nach Bild 43 eine doppelseitige Schräge (vgl. Bild 21) für die Auswertung systematisch eingestellter Konturversätze herangezogen. Die quadratische Kontur der Schräge wurde dabei während der ersten 20 Schichten um jeweils 100 μm sowohl in negative x -Richtung, als auch in positive y -Richtung verschoben. Anschließend wurde in den 20 darauffolgenden Schichten dieser systematische laterale Konturversatz schrittweise wieder in entgegengesetzte Richtung rückgängig gemacht. Da zwei aufeinanderfolgende detektierte Kanten aufgrund des kleinen lateralen Versatzes fast direkt aufeinanderlagen, wurde zur besseren Visualisierung in Bild 43 a) exemplarisch die Kontur der 12. grünen Fertigungsschicht mit der um 800 μm verschobenen blauen 20. Schicht dargestellt. Wie aus der zugehörigen Grauwertauswertung in Bild 43 b) entlang der betrachteten Bildzeile der Schichten 12 – 20 hervorgeht, war auch hier ein zunehmender Grauwertkontrast des Schmelzbades im Vergleich zum umgebenden Pulverbett zu verzeichnen. Weiterhin war auch ein lateraler Versatz der einzelnen Schichten in negative x -Richtung an der linken Bauteilkante mit Hilfe der Gradientenauswertung nachzuweisen, der mit durchschnittlich 130 μm etwas größer war als vorgegeben. Die Verschiebung der Grauwert- bzw. Gradientenauswertung der rechten Bauteilkante entsprach im Durchschnitt den gewünschten 100 μm , da der Einfluss tiefer gelegener Schmelzbadkonturen auf die Kantenfindung im direkten Vergleich zur linken Kante geringer ausfiel.

Um diese referenzierte Positionsverschiebung der ermittelten rechteckigen Schmelzbadkontur näher zu spezifizieren, wurde weiterhin der systematische laterale Versatz des Konturschwerpunktes analysiert, der in beiden vorgegebenen Raumrichtungen insgesamt 20 x 100 μm betragen sollte. Im direkten Vergleich der beiden referenzierten Schwerpunktkoordinaten in Bild 43 c) wurde ersichtlich, dass die laterale Verschiebung des Schmelzbades in x -Richtung zusätzlich von der mechanischen Verschiebung durch das

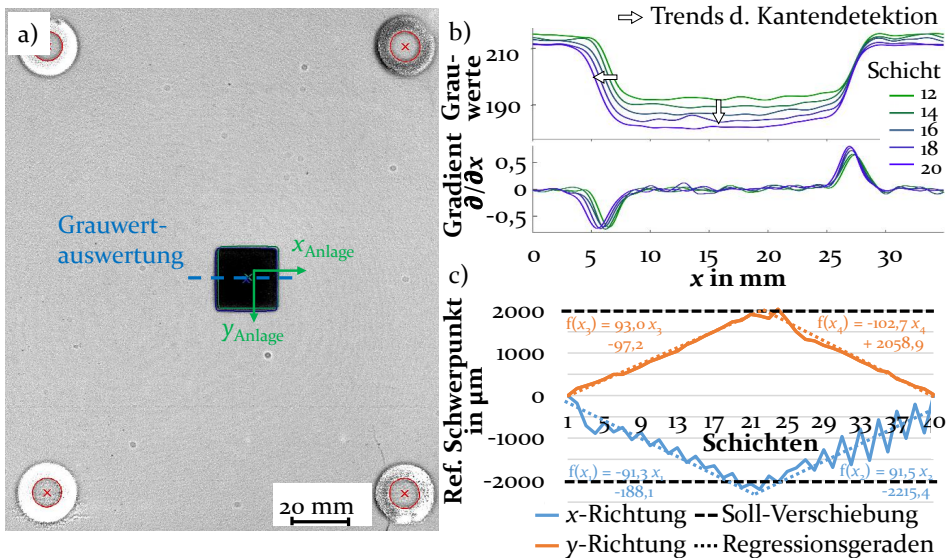


Bild 43: Auswertung der *in situ*-Messdaten der doppelseitigen Schräge: a) Kantendetektion (verstärkter Kontrast); b) Schichtweise Auswertung der grauwertfilterten Grauwertverteilung mit Gradientenberechnung; c) Auswertung der referenzierten Schwerpunktverschiebung

Pulverauftragssystem beeinflusst wurde. Hierbei konnte anhand der Amplitude der Schwerpunktposition auch nachgewiesen werden, dass der Einfluss des Rakels in den ersten 20 Schichten kleiner war als in den folgenden 20 Schichten. Das lag daran, dass sich bei der untersuchten Forschungsanlage die laterale Verschiebung des Rakels von links nach rechts größer ausfiel als in der Gegenrichtung. In der zweiten Hälfte des Baujobs wurde die zusätzlich vorgegebene Verschiebung des Schmelzbades in positive x -Richtung verstärkt. Insgesamt war die ermittelte laterale Verschiebung, die aus der Steigung der linearen Regressionsgeraden abgelesen werden kann, geringfügig kleiner als der vorgegebenen Versatz von $100 \mu\text{m}$. Ein Grund hierfür waren erneut die durchschimmernden Fertigungsschichten, die die Kantendetektion der aktuellen Fertigungsschicht einseitig verfälschten (vgl. Bild 43 b)). Da eine Abgrenzung des durchschimmernden vom aktuellen Schmelzbad dadurch zu unscharfen Grauwertübergängen führte, wurde eine kleinere Schwerpunktverschiebung mit Abweichungen vom Idealmaß von bis zu 9 % ausgemacht. Daneben konnte, aufgrund der zunehmenden Wärmeeinflusszone der durchschimmernden Konturen, eine stetig größer werdende Fläche des rechteckigen Schmelzbades nachgewiesen werden. Diese nahm innerhalb der ersten 25 beobachteten Fertigungsschichten um bis zu 10 % zu.

6.4.4 Stabilität des verwendeten Referenzierungssystems im Vergleich zur Referenzierung über Bauraumkanten

Zur Abgrenzung vom Stand der Technik folgte weiterhin ein Vergleich der referenzierten Abstandsbestimmung des Referenzierungssystems zur herkömmlichen Referenzierung über Bauraumkanten (vgl. Unterabschnitt 2.4.2.4), der wiederum am Beispiel der AM-Zylinder durchgeführt wurde. Die euklidischen Abstände $d(\text{Zylinder } i, \text{Ref. } i)$ der Konturschwerpunkte zu den jeweiligen Referenzierungssystemen (Ref. gesamt und Ref. Kante) konnten dabei, wie exemplarisch in Bild 44 am Zylinder 30 mit den zugehörigen Distanzen $|x_{\text{Zyl.30}}|_i$; $|y_{\text{Zyl.30}}|_i$ dargestellt, in den beiden Raumrichtungen berechnet werden. Grundlage der Auswertung bildeten zusätzliche schichtweise erfasste Bilder aus Unterabschnitt 4.3.4.2. Diese beinhalteten neben dem Schmelzbad der AM-Bauteile auch zwei Bauraumkanten in den Randbereichen des Messbereiches von 300 mm x 300 mm. Eine Erfassung dieses großen Messbereiches war nur bei einem minimal eingestellten Zoom der Schmelzbadkamera möglich. Die Vorzüge des neuartigen Referenzierungsansatzes über die im Pulverbett integrierten Quarzglasrohre wurden anhand der Analyse der Streuungen der referenzierten Abstände zu den jeweiligen Bezugssystemen in Tabelle 5 deutlich. Bei den errechneten Standardabweichungen s_i der Abstände von zwölf analysierten Schichten wurde ersichtlich, dass das Referenzierungssystem aus Quarzglas (Ref. gesamt) überwiegend kleinere Standardabweichungen bei der Abstandsbestimmung aufwies als bei der Referenzierung über die Bauraumkanten (Ref. Kante). Ein Grund hierfür war die bessere schwellwertunabhängige Messgröße der Referenzierungsschwerpunkte der Quarzglasrohre aufgrund der besseren Erfassbarkeit der beleuchteten, kontrastreicheren Rohre. Bei der Abstandsbestimmung durch die Quarzglasrohre im verkleinerten Messfeld (ROI) von 146 mm x 177 mm traten wegen der höheren Pixelauflösung zudem kleinere Längenmessabweichungen auf, als bei der Referenzierung über die Bauraumkanten im großen Messbereich. Hier nahmen mit steigender Entfernung der Bauteilkonturen vom Koordinatenursprung auch die Messabweichungen bei der Abstandsbestimmung zu. Hinzu kamen Unsicherheiten bei der Abstandsermittlung des Koordinatenursprungs der Bauraumkanten aufgrund der Approximation der Geraden innerhalb des begrenzten Bildausschnittes, die stark von den errechneten Geradenparametern (vgl. Bild 44) beeinflusst wurden.

Durch den verkürzten Messkreis wies das im Pulverbett integrierte Referenzierungssystem im direkten Vergleich zum herkömmlichen Referenzierungsansatz über die Bauraumkanten eine bessere Positionsstabilität auf. Es wurde daher in den folgenden Untersuchungen als Bezugssystem zum Nachweis lateraler Konturverlagerungen herangezogen.

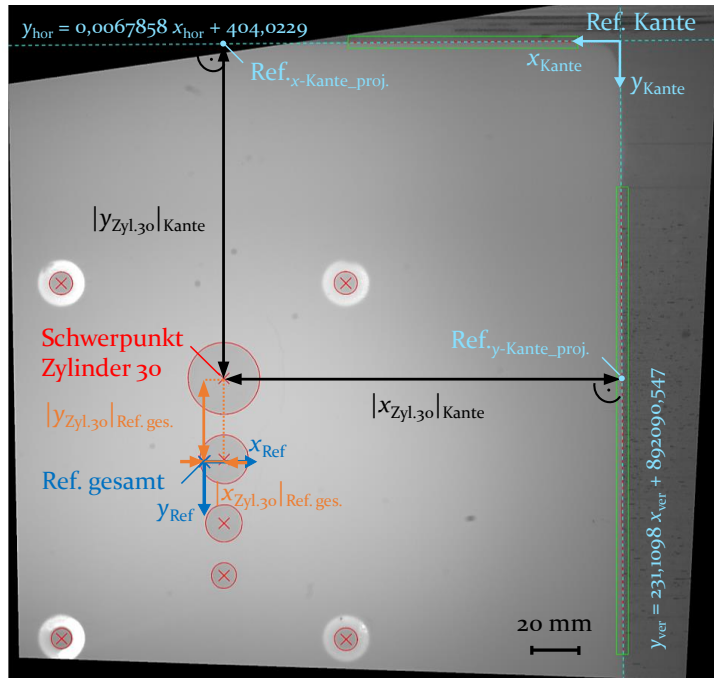


Bild 44: Referenzierung der Schmelzbadkonturen über Bauraumkanten und Quarzglasrohre
 Tabelle 5: Vergleich der referenzierten Abstandsbestimmung der Schmelzbadkonturen

Schmelzbad (N=12)	Standardabweichung Abstand Kontur – Ref. ges		Standardabweichung Abstand Kontur – Ref. Kanten	
	s_x in μm	s_y in μm	s_x in μm	s_y in μm
Zylinder 30	33,3	33,2	47,6	70,3
Zylinder 20	37,5	32,9	38,5	69,8
Zylinder 15	43,7	41,0	42,9	77,9
Zylinder 10	60,3	41,3	55,0	70,1

6.4.5 Einfluss des Betrachtungswinkels der Schmelzbadkameras

Durch eine weitere Auswertung der Messdaten der zwei verwendeten Schmelzbadkameras sollte abschließend der Einfluss der Betrachtungswinkel untersucht werden. Die Analyse der Bildgebung wurde unter realen Fertigungsbedingungen anhand der Bilddaten der additiv gefertigten Zylinder (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2) durchgeführt. Beide leicht versetzten Schmelzbadka-

meras waren in der Optikebene auf einem Kamerastativ mit einem Abstand der Befestigungen von ca. 120 mm angebracht (vgl. Bild 16). Die Ausrichtung der Schmelzbadkamera auf den Arbeitsbereich (ROI) im Pulverbett erfolgte über ein Sichtfenster mit einem Betrachtungswinkel von 18° zur z-Achse.

Wie aus Bild 45 hervorgeht, waren die von den beiden Schmelzbadkameras erfassten Positionen des Referenzierungssystems und des exemplarisch ausgewerteten Zylinders 20 vergleichbar. Vor allem in x-Richtung waren die ermittelten Positionen überwiegend deckungsgleich. Auch die alternierenden Positionsabweichungen des Pulverauftrags, die sich durch laterale Verschiebungen der Schmelzbadkonturen bemerkbar machten (vgl. Bild 45 b)), wurden von beiden Schmelzbadkameras gleichermaßen erfasst. Die Schwankungen der Einzelpositionen betragen, bis auf einzelne Ausnahmen in y-Richtung, in der etwas größere Abweichungen von ca. 20 µm der beiden Kameras zueinander verzeichnet wurden, meist unter 10 µm. Insgesamt lag, trotz des unterschiedlichen Betrachtungswinkels der Schmelzbadkameras, eine gute Reproduzierbarkeit bei der Positionserfassung vor. Die Betrachtungswinkel der Schmelzbadkameras übten somit einen verhältnismäßig kleinen Einfluss auf die Konturauswertung aus, weshalb in den nachfolgenden Ausführungen die Messdatenauswertung nur mit den Bildern der linken Schmelzbadkamera vorgenommen wurde.

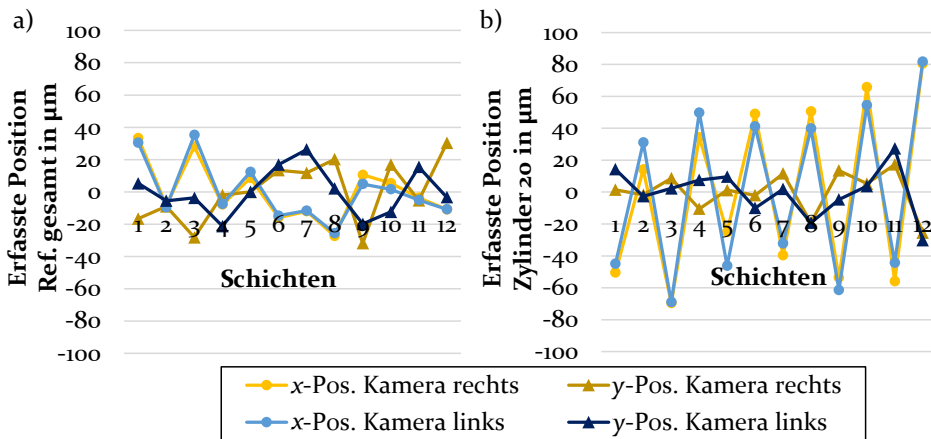


Bild 45: Positionsauswertung des a) Referenzierungssystems und b) Zylinders 20 mit Schmelzbadkameras aus zwei verschiedenen Betrachtungswinkeln

6.5 Nachweis referenzierter lateraler Konturverlagerungen

In Folge der thermischen und mechanischen Einflüsse durch das Heiz- bzw. Beschichtungssystem traten während des additiven Fertigungsprozesses unerwünschte Konturverlagerungen auf. Diese galt es im Rahmen der Qualitätsüberwachung genau zu charakterisieren und durch eine weiterführende Prozessregelung zu korrigieren.

Nach *Jacobsmühlen et al.* verursachen laterale Konturverlagerungen in der x-y-Baufläche Schichtversätze und fertigungsbedingte geometrische Abweichungen, die bei herkömmlichen LBM-Systemen eine Produktionsungenauigkeit von ca. 100 µm bedingen [Zur Jacobsmühlen et al., 2014]. Um aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen der analysierten Einzelpunktstreuungen Rückschlüsse auf die tatsächlichen schichtweisen Konturverlagerungen während des AM-Prozesses ziehen zu können, war daher eine Referenzierung über ein positionsstabiles Bezugssystem erforderlich. Der Nachweis lateraler Konturverlagerungen und der damit bedingten Lage- und Formabweichungen der AM-Bauteile erfolgte deshalb im Bezug zum entwickelten Referenzierungssystem (vgl. Abschnitt 3.1.3). Grundlage der Analyse bildete die euklidische Abstandsbestimmung der Schwerpunkte des Schmelzbades und der durchschimmernden Bauteilkontur zum Referenzierungssystem nach Gleichung 4.3.3.

Bei der Analyse der Messdaten des überwachten Fertigungsprozesses der AM-Zylinder (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2) war zu beachten, dass die ersten bis zu zehn eingebrachten Fertigungsschichten des Baujobs bis zu einem Grauwertunterschied von ca. 20 zum umgebenden Pulverbett nicht reproduzierbar auswertbar waren (vgl. Unterabschnitt 6.4.3.2). Deshalb wurde die Kantendetektion der Schmelzbadkonturen in den folgenden Abschnitten anhand von zwölf reproduzierbar erfassten Fertigungsschichten der Schichten 12 – 23 durchgeführt. Da auch die Langzeitstabilität des AM-Prozesses der verwendeten LBM-Forschungsanlage in den Versuchen nicht gewährleistet werden konnte, musste auch auf die Analyse der letzten Fertigungsschichten verzichtet werden.

6.5.1 Analyse der lateralen Positionsabweichungen des Referenzierungssystems, Schmelzbades und der durchschimmernden Bauteilkonturen

Wie aus der Einzelauswertung der prozessbedingten lateralen Positionsabweichungen des Referenzierungssystems in Bild 46 a) hervorgeht, war eine konsistente Erfassung des beleuchteten Referenzierungssystems während

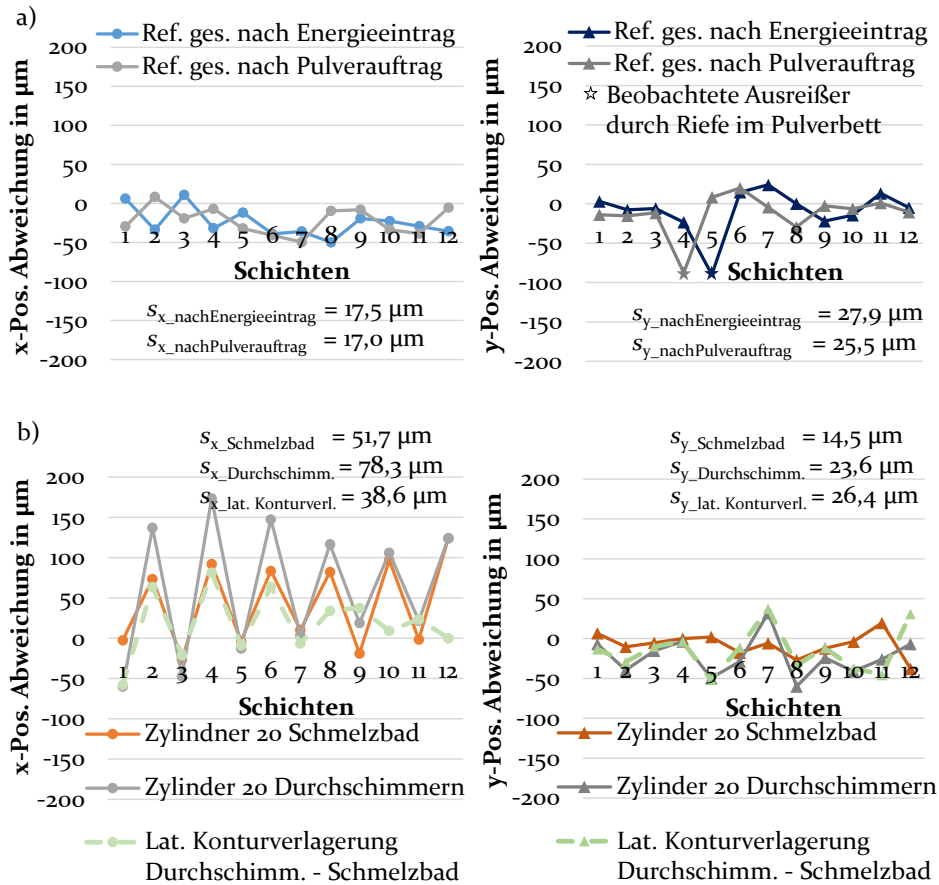


Bild 46: Relative Konturverschiebungen des a) Referenzierungssystems und b) Schmelzbades nach Energieeintrag bzw. Pulverauftrag

des Fertigungsprozesses möglich. Die Versteifung und Nachjustierung der Federn in den Lagerungen der Referenzierungsrohre im Nachgang an die Analyse in Bild 38 hatte dazu geführt, dass der Einfluss des Pulverauftrags in x -Richtung auf eine Standardabweichung s_x von ca. $17 \mu\text{m}$ reduziert werden konnte. Die Schwankungsbreite der detektierten Referenzrohrpositionen betrug nur noch ca. $\pm 20 \mu\text{m}$. Die ausgewiesenen Standardabweichungen s_y orthogonal zur Pulverauftragsrichtung fielen insgesamt geringfügig höher aus als in dem Vorversuch. Grund hierfür war eine Riefe bzw. Spur in x -Richtung im Pulverbett über dem dritten Referenzierungsrohr, die zu einer fehlerhaft zugeordneten Verschiebung des Schwerpunktes in y -Richtung führte. Wenn dieser erklärte Ausreißer der vierten Fertigungsschicht nicht in die Auswertung einbezogen wurde, war eine nahezu positionstabile Referenzierung mit den Quarzglasrohren möglich.

In Analogie zu der Konturanalyse aus Bild 45, bei der bereits Messdaten des zylindrischen Schmelzbades relativ zu den Schmelzbadkameras analysiert wurden, fand in Bild 46 b) zusätzlich eine Auswertung der Schwerpunkte der durchschimmernden Bauteilkonturen nach jedem Pulverauftrag statt. Die systematisch detektierten Konturverschiebungen des Schmelzbades wurden zusätzlich von den durchschimmernden Schichten beeinflusst (vgl. Abschnitt 6.4.3). Nach Bild 46 b) wurden die detektierten Konturverlagerungen in x -Richtung erneut von den systematischen mechanischen Verschiebungen des Pulverauftragssystems geprägt. Bei der Konturauswertung der durchschimmernden Bauteilkontur war eine Standardabweichung s_x von $78,3 \mu\text{m}$ zu verzeichnen, die unter anderem aus einem schwachen Kontrastes zum umgebenden Pulver resultierte. Da bis jetzt die einzelnen Positionsabweichungen getrennt voneinander, ohne gemeinsames Bezugssystem, analysiert wurden, konnte jedoch an dieser Stelle noch keine Aussage über absolute, pulverauftragsbedingte Verschiebungen gegeben werden. Dies war erst durch eine referenzierte Konturanalyse möglich (vgl. Abschnitt 6.5.2). Anhand der Auswertung der Schwerpunkte des Schmelzbades und der durchschimmernden Konturen konnte jedoch die Beobachtung aus Unterabschnitt 6.4.3.2 bestätigt werden, dass die Verschiebungen des betrachteten Rakelsystems bei einem Pulverauftrag in x -Richtung von links nach rechts betragsmäßig größer ausfielen als in der Gegenrichtung. Dies ging aus einer geringen Offset-Verschiebung in positive x -Richtung der berechneten Differenzen der Positionen zwischen den Schmelzbadkonturen und den zugehörigen durchschimmernden Schichten hervor. Wurden hingegen die Konturverlagerungen in y -Richtung ausgewertet, so wurden stabilere Positionen der Schmelzbad- und durchschimmernden Konturen beobachtet. Dies deutete darauf hin, dass der Einfluss des Pulverauftrags senkrecht zur Bewegungsrichtung deutlich geringer ausfiel.

6.5.2 Referenzierte laterale Lage- und Formabweichung

Da nach [DIN EN ISO 1101: 2017-09] zur Beurteilung der Gestalt sowohl Maß-, Lage- als auch Formabweichungen der einzelnen Fertigungsebenen zu betrachten sind, widmet sich dieser Abschnitt der zusammenfassenden referenzierten Konformitätsanalyse der additiv gefertigten, zylindrischen Schmelzbadkonturen.

Basierend auf Voruntersuchungen zur Positionsstabilität des Referenzierungssystems konnten bereits laterale Lageabweichungen der zylindrischen Bauteilkonturen durch die referenzierte Abstandsbestimmung der detektierten Konturschwerpunkte zum Referenzierungssystem nachgewiesen werden (vgl. Abschnitts 6.5.1). Durch diese referenzierte Abstandsbestimmung wur-

de erst eine realitätsnahe Einschätzung der tatsächlichen prozessbedingten Konturverlagerungen ermöglicht. Die resultierenden lateralen Konturverlagerungen in Bild 47 ergaben sich aus den jeweiligen euklidischen Abständen der referenzierten Schwerpunkte des Schmelzbades zu den referenzierten Schwerpunkten der zugehörigen durchschimmernden Schichten nach dem Pulverauftrag. Anhand der referenzierten Konturverschiebung des betrachteten Zylinders 20 konnte im Verlauf des Bauprozesses eine schichtweise Verschiebung von ca. $\pm 50 \mu\text{m}$ in x -Richtung des Pulverauftrags nachgewiesen werden. Die zugehörige Standardabweichung $s_{x_lat.ref.Verschiebung}$ von $27,0 \mu\text{m}$ fiel durch die Referenzierung im Vergleich zur errechneten lateralen Konturverlagerung ohne Referenzierung (mit $38,6 \mu\text{m}$ aus Bild 46) kleiner aus. Hieran zeigte sich ein weiterer Vorteil der Referenzierung, die zu einer Stabilisierung bei der Messdatenauswertung führte. Bei der Analyse der referenzierten Konturverlagerungen in y -Richtung waren hingegen die Abweichungen in der vierten und fünften Schicht auffällig. Diese resultierten aus der fehlerhaften Schwerpunktermittlung des Referenzierungssystems, bedingt durch eine Riefe im Pulverbett (vgl. Bild 46 b)). Hierbei wurde ersichtlich wie wichtig eine unverfälschte Auswertung des Bezugssystems ist. Bei der schichtweisen, referenzierten *in-Prozess*-Überwachung musste besonders auf die positionsstabile Erfassung des Referenzierungssystems geachtet werden. Insofern diese Bedingung der reproduzierbaren Beobachtbarkeit gegeben war, konnten durch die Referenzierung auch Rückschlüsse auf prozessbedingte laterale Konturverlagerungen gezogen werden.

Zur Beurteilung der Formausprägung der eingebrachten zylindrischen Schmelzbadkonturen wurden zusätzlich verschiedene Fertigungsschichten bezüglich ihrer Kanten- und Flächendeckung mit dem eingelesenen, „idealen“ Soll-Rohdatensatz verglichen [Z. Li et al., 2018]. Dadurch konnten nach der geometrischen Produktspezifikation (GPS) in [DIN EN ISO 17450-4: 2018-05] die lokalen geometrischen Abweichungen der extrahierten Geometrielemente zum Referenzgeometrielement näher spezifiziert werden.

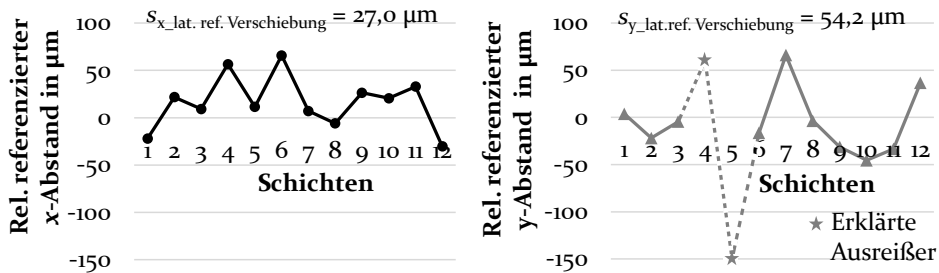


Bild 47: Nachweis lateraler Konturverlagerungen durch referenzierten Abgleich des aufgeschmolzenen Schmelzbades mit durchschimmernder Bauteilkontur

Im vorliegenden Fall wurde die Rundheit der schichtweise erfassten Bauteilquerschnitte bestimmt. Diese gab Aufschlüsse über die Einhaltung der Formtoleranzen der AM-Zylinder. Für jede Kontur wurde eine Toleranzzone durch den Abstand zweier konzentrischer, nach der Methode der kleinsten Abstandsquadrate gefitteten Kreise definiert, die die maximale bzw. minimale radiale Ausprägung der Ist-Kontur um den gemeinsamen Kreismittelpunkt kennzeichneten [DIN EN ISO 1101: 2017-09]. Grundlage der Formanalyse bildeten abermals die schichtweise erfassten Konturen der vier runden Bauteilquerschnitte des betrachteten LBM-Fertigungsprozesses (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2). Alle vier Schmelzbadkonturen der betrachteten Fertigungsschichten wiesen Rundheitsabweichungen von ca. 150 μm – 320 μm auf. Dies entsprach, je nach Größe der jeweiligen Zylinder, einer Formabweichung von bis zu 2 %. Eine reproduzierbare, schichtweise Fertigung formhaltiger zylindrischer Bauteilkonturen mit der untersuchten LBM-Forschungsanlage war somit nur bedingt gegeben. Zusätzlich wurde nach Bild 48 a) in Folge der Auswertung der Flächendeckung der betrachteten neunten Fertigungsschicht auch eine systematische Verschiebung im Vergleich zu den Soll-Konturen des Rohdatensatzes ersichtlich. Innerhalb einer Fertigungsschicht war lediglich der Zylinder 20 im vorgegebenen Koordinatenursprung der betrachteten LBM-Fertigungsanlage, senkrecht unter dem Galvanometer-Scanner, nahezu zentrisch zum eingelesenen Soll-Rohdatensatz ausgerichtet. Die anderen Zylinder wiesen, aufgrund ihrer Entfernung vom Koordinatenursprung und den daraus resultierenden abweichenden Einfallwinkeln des Laserstrahls, systematische Lageabweichungen auf. Eine Korrektur dieser optischen Abweichung durch die verbaute F-Theta-Linse des Scanners wurde nicht vollständig erreicht. Der Schwerpunkt der Schmelzbadkontur des Zylinders 30 war über alle Fertigungsschichten in negative y-Richtung verschoben. Die Zylinder 15 und 10 wiesen im Vergleich zum Rohdatensatz eine systematische Verschiebung in positiver y-Richtung auf. Insgesamt fielen alle schichtweise erfassten Schmelzbadkonturen flächenmäßig, je nach Bauteilquerschnitt, um 6 % bis zu 24 % größer aus als anlagentechnisch vorgegeben. Dies war ein weiteres Indiz, das auf gravierende Fertigungsabweichungen durch eine mangelnde Steuerbarkeit der untersuchten Forschungsanlage hindeutete (vgl. Kapitel 7). Wurde weiterhin nach Bild 48 b) die Flächendeckung der betrachteten neunten Schicht im Vergleich zur vorherigen achten Schicht analysiert, so konnte die jeweilige pulverauftragsbedingte Konturverschiebung farblich visualisiert werden. Es lag eine signifikante, pulverauftragsbedingte Lageabweichung vor. Die Schmelzbadkontur verlagerte sich im direkten Vergleich in Pulverauftragsrichtung von rechts nach links, was aus den fehlenden bzw. überlappenden Flächenanteilen an den Randbereichen des Zylinders ersichtlich wurde. Auch die analysierten Konturverschiebungen der anderen betrachteten Fertigungsschichten stimmten mit den Auswertungen aus Bild 46 überein und deuteten

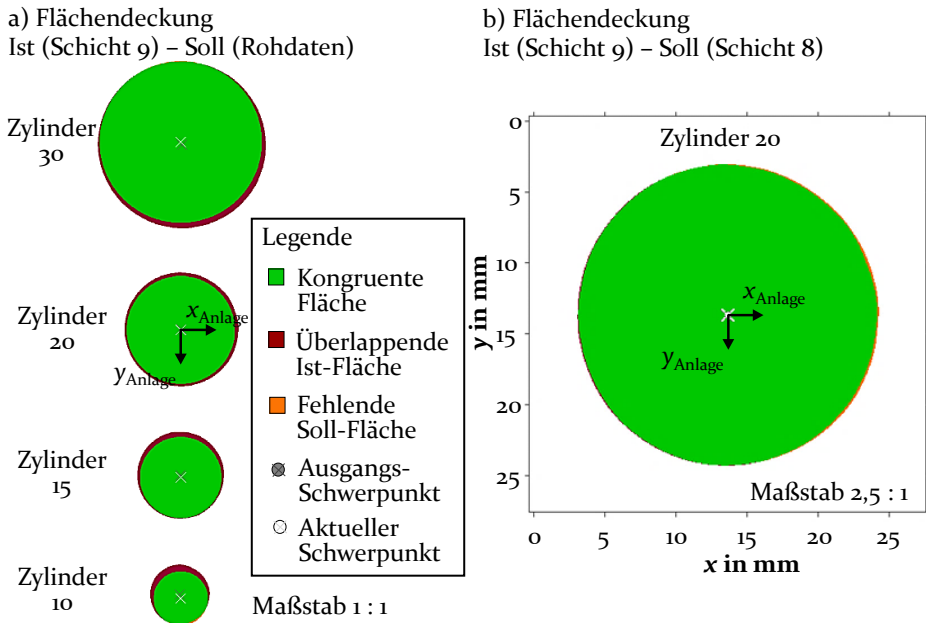


Bild 48: Flächendeckung der betrachteten neunten Schicht im Vergleich zu a) Rohdatensatz und b) vorheriger Schicht

erneut auf eine schichtweise zyklische Verlagerung in x -Richtung während des Pulverauftrags hin.

Um abschließend von der schichtweisen Messdatenauswertung während des Fertigungsprozesses auf die aktuelle Gesamtgeometrie schließen zu können, wurde eine Überlagerung der erfassten, referenzierten Schmelzbadquerschnitte vorgenommen. Das Abkühl- und Kristallisationsverhalten wurde hierbei nicht in der Analyse berücksichtigt. Anhand der dreidimensionalen Visualisierung aller 30 Schichten der zylindrischen Ist-Konturen in Bild 49 wurde ersichtlich, dass vor allem die ersten fünf erfassten Fertigungsschichten gravierende Formabweichungen aufwiesen. Diese resultierten beim vorliegenden additiven Fertigungsprozess aus dem schwachen Grauwertkontrast zum umgebenden Pulverbett (vgl. Abschnitt 6.4.3.2) und der dadurch bedingten nicht reproduzierbaren Kantendetektion der Schmelzbadkonturen in den ersten Fertigungsschichten. Eine aussagekräftige Konturauswertung war beim untersuchten LBM-Prozess somit erst nach ca. zehn Bauteilschichten möglich. Inwieweit sich diese beobachteten Fertigungsabweichungen der AM-Zylinder während des untersuchten AM-Prozesses auf die finale Bauteilgestalt und die Maßhaltigkeit auswirken, wurde im Rahmen einer *post-Prozess-Analyse* untersucht (vgl. Abschnitt 7.1).

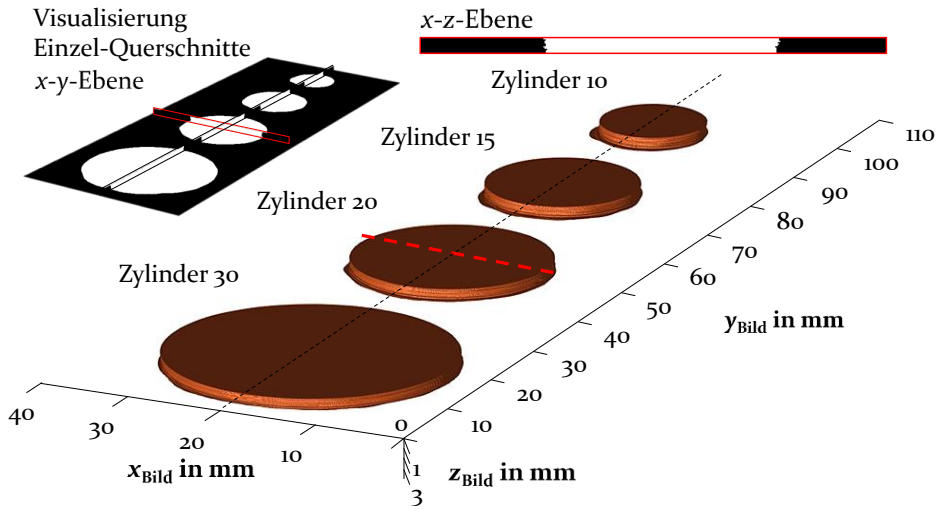


Bild 49: Schichtweise Überlagerung der ausgewerteten Schmelzbadkonturen

6.6 Ermittelte Fertigungs- und Messabweichungen

Nachdem in den vorausgegangenen Abschnitten einzelne Fertigungs- und Messabweichungen durch voneinander unabhängige Parameterstudien im Rahmen der Verifikation der Beobachtbarkeit der geometrischen Messgrößen genauer spezifiziert wurden, erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten Einflussgrößen. Ziel war es, mit Hilfe der analysierten geometrischen Abweichungen einen Beitrag zur Beurteilung der in Gleichung 2.3.1 modellierten Gesamtabweichung μ_{post} zu leisten.

Nach einer Spezifizierung der Messaufgabe (vgl. Abschnitt 2.6) begann der eigentliche Messprozess nach Bild 50 mit der Definition des Messprinzips und der Messmethode (vgl. Abschnitt 3.1) sowie den Messverfahren (vgl. Abschnitt 3.2). Zwar hatte sich gezeigt, dass ein Nachweis lateraler Konturverlagerungen durch eine schichtweise referenzierte *in-Prozess*-Überwachungen erbracht werden konnte, allerdings war nach einer Analyse der Messbedingungen (vgl. Abschnitte 4.2 und 4.3.1) die Annahme konstanter Fertigungsbedingungen während der additiven Fertigung mit der Forschungsanlage nur bedingt gegeben. Ebenso kritisch betrachtet werden sollte das begrenzte Auflösungsvermögen des Schmelzbadkameranagements, das trotz der hochauflösenden Ausführung mit 26 Megapixeln und einer lateralen Auflösung im Messbereich von $27\ \mu\text{m}$ (vgl. Unterabschnitt 3.2.3.3) nur bedingt für die Auswertung von Konturverlagerungen im einstelligen Mikrometerbereich geeignet war. Die Modellierung der resultierenden lateralen Fertigungsabweichungen im betrachteten LBM-Prozess stand am Ende des durchgeführten Messprozesses und bildete die Grundlage für eine weiterführende Prozessre-

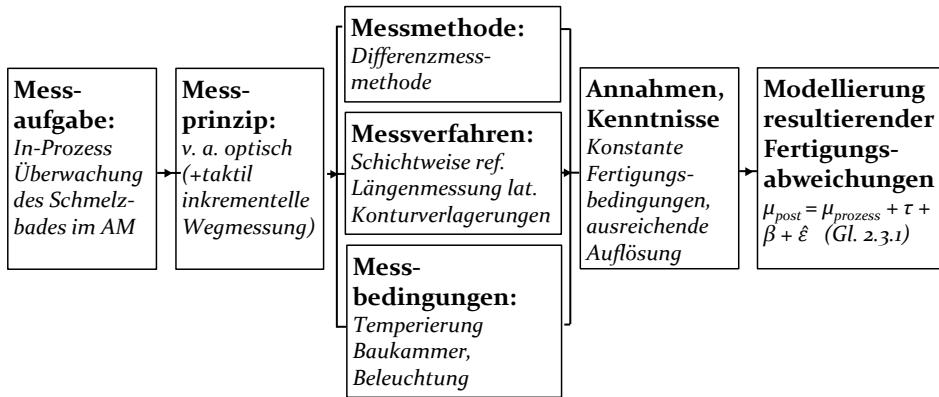


Bild 50: Durchgeführter Messprozess zur Beurteilung auftretender Fertigungsabweichungen (in Anlehnung an [DIN EN ISO 14253-2: 2018-09])

gelung. Die im Rahmen der in-Prozess-Analyse ermittelten systematischen Fertigungsabweichungen, die aufgrund der Prozessparameter im Fertigungsprozess entstanden und in den Kennwert μ_{prozess_i} eingingen, waren insgesamt von den Abweichungen $\hat{\varepsilon}_i$ des Messprozesses zu differenzieren. Weitere in Abschnitt 2.3 beschriebene schwindungsbedingte Einflüsse des material-spezifischen Baufaktors τ oder des Einflussfaktors Bauteil β waren bei den vorliegenden Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung.

Mit Tabelle 6 wird eine Übersicht der Ergebnisse der ermittelten systematischen Fertigungsabweichung sowie der Messeinflüsse gegeben. Die Zusammenfassung beinhaltet eine konservative Einschätzung der durch den Fertigungsprozess entstandenen und mit dem Messprozess ermittelten geometrischen Abweichungen im betrachteten LBM-P-Prozess. Neben der untersuchten Pulverbettabsenkung, die die vertikale Bauteilhöhe im geringen Maße beeinflusste, wurden als weitere Fertigungsabweichungen vor allem laterale Lageabweichungen des Schmelzbades während des Fertigungsprozesses untersucht. Hierbei konnte mit Hilfe der koaxialen Erfassung des Referenzierungssystems eine gute Wiederholpräzision des Galvanometer-Scanners nachgewiesen werden, die für einen positionsgenauen Energieeintrag des geführten Laserstrahls auch unter Prozessbedingungen von ca. 168 °C verantwortlich war. Als wesentliche systematische Fertigungsabweichung wurde der Einfluss des Pulverauftragssystems ausgemacht, der zu einer signifikanten lateralen Verschiebung der Schmelzbadkonturen im Pulverbett führte.

Neben Projektionsabweichungen waren weitere ermittelte systematische Messabweichungen ein wesentlicher Bestandteil des Fehlerterms $\hat{\varepsilon}$, die im Gegensatz zu zufälligen Effekten (z. B. Rauschen) durch geeignete Korrek-

Tabelle 6: Übersicht der untersuchten systematischen Fertigungsabweichung μ_{prozess_j} und ermittelten Messeinflüsse $\hat{\varepsilon}_i$

Einflussfaktor	Fertigungs- und Messabw.	Kommentar (zugehörige Abschnitte)	Abw. ermittelt	Std.abw. ermittelt
μ_{prozess1} vertikal	Pulverbettabsenkung	Einfluss auf vertikale Bauteilhöhe (6.1)	- 2 μm	1 μm
μ_{prozess2} lateral	Wiederholpräzision Scanner	bei Raumtemp. (6.3) bei Prozesstemp. (6.3)	$\pm 2 \mu\text{m}$ $\pm 5 \mu\text{m}$	1 μm 4 μm
μ_{prozess3} lateral	Pulverauftrag (x -Richtung, Prozess-temp.)	nur Schmelzbad (6.5.1) nur Durchschimmern (6.5.1) ref. Verschiebung (6.5.2)	$\pm 80 \mu\text{m}$ $\pm 150 \mu\text{m}$ $\pm 50 \mu\text{m}$	52 μm 78 μm 27 μm
$\hat{\varepsilon}_1$ lateral	Projektionsabweichung (Kalibrierung)	durch Rektifizierung und Transformation (4.3.2)	$\pm 30 \mu\text{m}$	19 μm
$\hat{\varepsilon}_2$ lateral	Positionsabw. Kamera-system vs. Ref.system	bei Raumtemp. (6.2.1.1) bei Prozesstemp. (6.2.1.3) durch Pulverauftrag (6.5.1)	$\pm 2 \mu\text{m}$ $\pm 15 \mu\text{m}$ $\pm 30 \mu\text{m}$	1 μm 8 μm 17 μm
$\hat{\varepsilon}_3$ lateral	Reproduzierbarkeit Konturerfassung	Systematischer Einfluss durch: - Auswertalgorithmus (6.4.1) - Messmethode (6.4.2) - durchschimmernde Konturen (6.4.3)	(nur bedingt quantifizierbar)	

turansätze bei der Messdatenauswertung berücksichtigt werden sollten. Als Messabweichungen wurden auch laterale Positionsabweichungen der Kamerasysteme relativ zum Referenzierungssystem ausgemacht, die vor allem durch temperaturbedingte Längendehnungen entlang des Messkreises hervorgerufen wurden und die Abstandsbestimmung der Schmelzbadkonturen zum Referenzierungssystem beeinflussten. Weitere systematische Einfluss-

faktoren, wie die Schnellwertfindung des Auswertalgorithmus, die Messmethode (z. B. die zeitnahe Erfassung der Schmelzbadkonturen nach dem Energieeintrag des Lasers) oder die detektierten durchschimmernden Bauteilkonturen tieferer Fertigungsschichten führten zu schwer quantifizierbaren Messabweichungen, die sich auf die Reproduzierbarkeit der Konturerfassung auswirkten.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Fertigungs- und Messabweichungen speziell dem untersuchten LBM-P-Prozesses der Forschungsanlage zuzuordnen sind. Eine Übertragung der Erkenntnisse auch auf baugleiche Ausführungsformen anderer LBM-Anlagen oder AM-Fertigungsprozesse ist somit nur bedingt möglich. Durch den im Pulverbett integrierten Referenzierungsansatz können jedoch auch andere Fertigungsanlagen einfach durch ein analoges Vorgehen der Prozessüberwachung und Auswertung bezüglich deren spezifischer Fertigungs- und Messabweichungen charakterisiert werden.

7 Steuerbarkeit und erzielbare Form- und Maßhaltigkeit der Bauteile der Forschungsanlage

Nachdem im vorausgegangenen Kapitel die für die Messtechnik erforderliche Beobachtbarkeit der Messgrößen mit Bezug zu einem positionsstabilen Referenzierungssystem nachgewiesen wurde, galt es die Steuerbarkeit der LBM-Forschungsanlage zu beurteilen. Diese stellt eine weitere wesentliche Grundlage für die weiterführende *in-Prozess*-Regelung dar. Neben den analysierten Lage- und Formabweichungen (vgl. Abschnitt 6.5.2) soll weiterhin die erzielbare Form- und Maßhaltigkeit der gefertigten AM-Bauteile der Forschungsanlage zur finalen Beurteilung der Gestalt nach [DIN EN ISO 1101: 2017-09] analysiert werden.

Bei der Versuchsdurchführung an der untersuchten Forschungsanlage traten inhomogene Schwankungen der Prozessparameter bedingt durch nicht steuerbare Fertigungseinflüsse auf, die die Bauteilgestalt beeinflussten. Besonders problematisch war dabei die nachgewiesene variierende Temperierung $\vartheta(t)$ der Prozesskammer und des Pulverbettes (vgl. Unterabschnitt 6.2.1.2). Diese resultierte aus zahlreichen undichten Stellen der LBM-Forschungsanlage. Aufgrund der mangelnden Abdichtung der Prozesskammer musste auch von einer Stickstoffflutung der Forschungsanlage abgesehen werden. Es resultierten inhomogene Temperaturschwankungen $\Delta\vartheta$ von bis zu 10 K während der Bauphase (vgl. Bild 31). Eine reproduzierbare Fertigung im Prozessfenster des PA12-Werkstoffes (vgl. Bild 5) war deshalb nur bedingt möglich. Hinzu kam das Problem, dass die Schnittstelle der Steuersoftware nur bedingte Einstellmöglichkeiten bei der Bedienung des LBM-Prozesses zuließ. Beispielsweise konnten nur einzelne Bauteilquerschnitte eingelesen und gefertigt werden. Der Pulverauftragsprozess und Energieeintrag des Lasers musste weiterhin für jede Fertigungsschicht manuell gestartet werden. Dadurch war lediglich eine teilautomatisierte Steuerung der Forschungsanlage möglich. Durch die mangelnde Steuerbarkeit der LBM-Forschungsanlage resultierten unerwünschte Parameterschwankungen während des Fertigungsprozesses, die zu geometrischen Abweichungen der AM-Bauteilen führten. Es konnte dennoch ein schichtweiser Bauprozess mit angepassten, steuerbaren Stellgrößen der Laserleistung, der Geschwindigkeit des Scanners, dem Hatchabstand der Laserlinien und der eingestellten Temperatur der IR-Heizstrahler erfolgen. Die nicht steuerbaren Prozessparameter übten jedoch einen erheblichen Einfluss auf die geometrischen Abweichungen der gefertigten AM-Bauteile aus.

7.1 Post-Prozess-Analyse der additiv gefertigten Zylinder

Um die Auswirkungen der Prozessparameter auf die Bauteilgestalt besser abschätzen zu können, wurden die gefertigten AM-Bauteile der EOS P380 Forschungsanlage mit baugleichen PA12-Testkörpern einer industriellen EOS Formiga P110 LBM-Anlage (vgl. Bild 22 a)) verglichen. Anhand der Auswertung der *post-Prozess*-Messdaten aus Abschnitt 4.4 wurde eine Beurteilung der erzielbaren Form- und Maßhaltigkeit der untersuchten AM-Bauteile vorgenommen, die wesentlich durch die Steuerbarkeit der Prozessparameter der Forschungsanlage geprägt wurde. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den lateralen Abweichungen geringer Ortsfrequenz, die vor allem an den Mantelflächen der AM-Bauteile sichtbar wurden [Hausotte, 2015]. Die Ebenheit der unteren und oberen Deckfläche der Zylinder, die unter anderem die Bauteilhöhe beeinflusst, war bei den vorliegenden Untersuchungen der lateralen Versätze von untergeordneter Bedeutung.

Wie anhand der geometrischen Auswertung mittels Streifenlichtprojektion aus Bild 51 ersichtlich wird, traten an den Mantelflächen der Zylinder der Forschungsanlage größere Formabweichungen auf, als bei den Zylindern der industriellen Anlage. Hierbei wurde nach [DIN EN ISO 1101: 2017-09] eine Linienprofilspezifikation ohne Bezug vorgenommen. Anhand von einhüllenden Kreisen bzw. eines einhüllenden Zylinders um die Mantelflächen der Zylinder erfolgte damit eine Beurteilung der radialen Abmaße. In radialer Richtung traten bei den Zylindern der Forschungsanlage Abweichungen vom Soll-Durchmesser von 0,5 mm bis zu 1,4 mm auf. Die Bauteile der industriellen LBM-Anlage fielen zwar geringfügig kleiner als die vorgegebene Soll-Geometrie aus, besaßen aber glatte Mantelflächen, die deutlich besser der Idealgeometrie entsprachen. Dies äußerte sich auch im Rahmen der Formprüfung bei der Analyse der Rundheit der Zylinder. Während die industriell

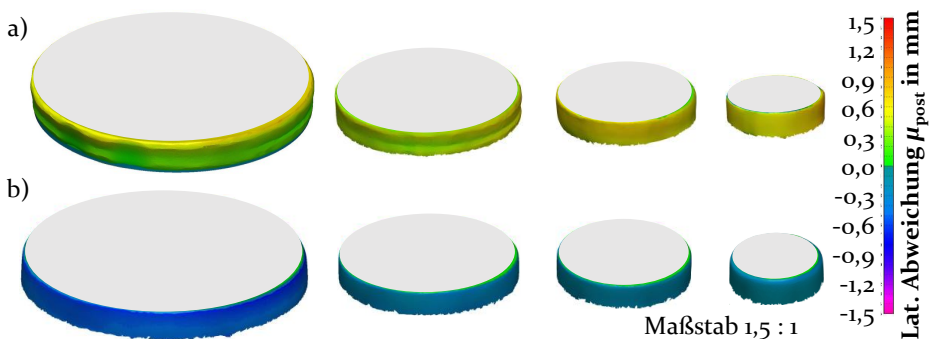


Bild 51: Geometrische Auswertung der radialen Abweichung der Zylinder der a) Forschungsanlage und der b) industriellen LBM-Anlage

gefertigten Bauteile Rundheitsabweichungen nach [DIN EN ISO 1101: 2017-09] von ca. $50\ \mu\text{m}$ – $100\ \mu\text{m}$ aufwiesen, betrug die entsprechenden Abweichungen bei den Zylindern der Forschungsanlage zwischen $180\ \mu\text{m}$ – $320\ \mu\text{m}$. Die ermittelte Formabweichungen an den Bauteilen der Forschungsanlage entsprachen damit in guter Übereinstimmung den bestimmten Rundheitsabweichungen während des Fertigungsprozesses (vgl. Abschnitt 6.5.2). Da sowohl die im post-Prozess ermittelten Form-, als auch die Maßabweichungen der gefertigten AM-Bauteile stark durch die Oberflächenrauheit beeinflusst wurden, fand weiterführend eine Oberflächenanalyse der Zylinder statt. Dabei konnten die Rauheitsunterschiede (R_i ; S_i) der analysierten Zylinder durch die Auswertung der mittels Fokusvariation aufgezeichneten Oberflächenprofile der Mantelflächen durch die Software „MountainMap Premium 7.0“ bestätigt werden (vgl. Anhang A.7). Eine zusätzliche Analyse des Materialanteils der Mantelflächen durch die sogenannte *Abott*-Kurve in Bild 52 ermöglichte eine Visualisierung dieser Topografieunterschiede. Im Gegensatz zu den Zylindern der Forschungsanlage lagen bei den industriellen Bauteilen über 75 % aller Profilspitzen unter $50\ \mu\text{m}$, wodurch ein deutlich homogeneres Oberflächenprofil vorlag.

Wurden weiterhin die Höhen der gefertigten Zylinder miteinander verglichen, so wurde ersichtlich, dass die Zylinder der Forschungsanlage mit einer durchschnittlichen Abweichung von $1,48\ \text{mm}$ zum gewünschten Abmaß der Bauteilhöhe von $3,00\ \text{mm}$ ($30 \times 100\ \mu\text{m}$) deutlich zu groß ausfielen. Dies war überwiegend auf den zu hohen Energieeintrag bei der Bauteilfertigung zurückzuführen (vgl. Unterabschnitt 4.3.4.2). Die in Abschnitt 6.1 um ca. $2\ \mu\text{m}$ zu kleinen schichtweisen Absenkungen der Bauplattform kompensierten die energieeintragsbedingten Fertigungsabweichungen in z-Richtung

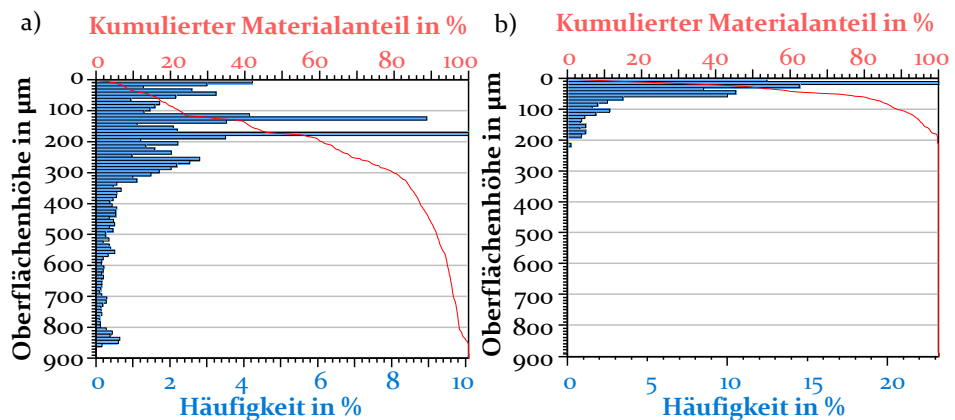


Bild 52: Auswertung des Materialanteils der Mantelfläche des Zylinders 20, der a) Forschungsanlage und der b) industriellen LBM-Anlage

nur bedingt. Die Höhenabweichung der industriellen Zylinder betrug im Mittel nur 0,25 mm, was auf eine vergleichsweise deutlich reproduzierbarere Fertigung hindeutete.

7.2 Post-Prozess-Analyse der zusätzlichen AM-Probekörper

Zur Gesamtbeurteilung der erzielbaren Bauteilgestalt wurden zusätzlich die Stufenversatzkörper und doppelseitigen Schrägen aus den Bildern 22 b) und c) herangezogen, die mit der Forschungsanlage und der industriellen LBM-Anlage gefertigt wurden. Bei der geometrischen Auswertung mittels Streifenlichtprojektion zeigte sich die mangelnde Fertigungsqualität der untersuchten Forschungsanlage in Bild 53. Die AM-Probekörper der industriellen Fertigungsanlage entsprachen in guter Übereinstimmung der Soll-Geometrie und wiesen rechtwinklige, glatte Flächen auf. Im Gegensatz dazu waren deutliche Maßabweichungen bis zu 2 mm der AM-Bauteile der Forschungsanlage zu erkennen. Der überhöhte Energieeintrag und die inhomogenen Fertigungsbedingungen waren auch hier für ein unerwünschtes Anhaften von zusätzlichen Pulverpartikeln an den Seitenflächen verantwortlich, die diese lateralen Abweichungen hervorriefen.

Die beobachtete mangelnde Fertigungsqualität der Forschungsanlage ging auch aus der Analyse der konvexen Mantelflächen der doppelseitigen Schrägen aus Bild 54 hervor. Die industriell gefertigte doppelseitige Schräge wies über die Messstrecke in z-Richtung eine kontinuierliche laterale Verschiebung der Fertigungsschichten von insgesamt 2 mm in

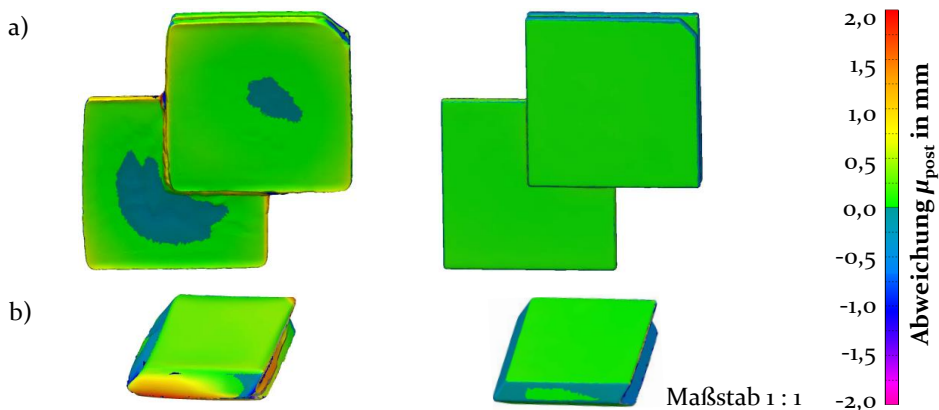


Bild 53: Geometrische Auswertung der Abweichungen der AM-Bauteile der Forschungsanlage (links) und industriellen LBM-Anlage (rechts): a) Stufenversatzkörper, b) Doppelseitige Schrägen

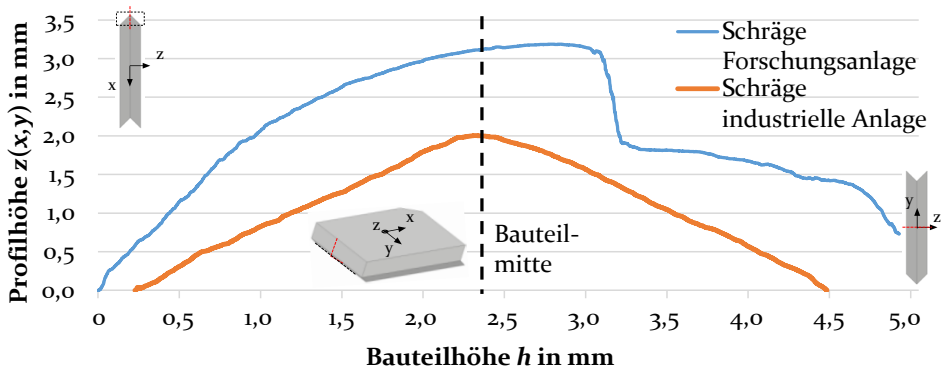


Bild 54: Oberflächenanalyse der konvexen Seitenflächen der doppelseitigen Schräge mittels Fokusvariation

beiden Raumrichtungen auf. Diese entsprach genau dem eingestellten systematischen Schichtversatz von $20 \times 100 \mu\text{m}$. An den Seitenflächen des vergleichbaren AM-Bauteils der Forschungsanlage waren hingegen deutliche Formabweichungen zu verzeichnen. Die detektierte laterale Verschiebung fiel in den ersten ca. 10 Fertigungsschichten deutlich zu groß aus. Dies äußerte sich durch eine erhöhte Anfangssteigung der Profillinie. Weitere erhebliche geometrische Abweichungen waren in der zweiten Hälfte des Fertigungsprozesses zu verzeichnen. Direkt nach dem Richtungswechsel der systematischen Querschnittsverlagerungen trat in der Bauteilmittelpunkt ein unerwünschtes Zusammensintern von Fertigungsschichten auf. Es resultierte eine Bauteilhöhe der unsymmetrischen Schräge der Forschungsanlage von insgesamt 4,9 mm, die deutlich größer ausfiel als die vorgegebenen Soll-Geometrie von 4,0 mm. Die Bauteilhöhe des industriellen Bauteils wich mit 4,3 mm geringfügig vom Idealmaß ab.

Insgesamt beeinflussten die inhomogenen Parameterschwankungen der LBM-Forschungsanlage, die aufgrund der mangelnden Steuerbarkeit einiger Prozessstellgrößen vorherrschten, die Gestalt der gefertigten AM-Bauteile erheblich. Da es der vorliegenden Arbeit jedoch primär um die Entwicklung des referenzierten *in-Prozess*-Messverfahrens und weniger um eine reproduzierbare Fertigung endkonturnaher Bauteile mittels exakt gesteuerter Prozessparameter ging, stand die finale Bauteilgestalt in Folge des Kristallisationsvorgangs nur bedingt im Fokus der Untersuchungen.

8 Zusammenfassung

Mit Hilfe des entwickelten Referenzierungsansatzes, bestehend aus vier in das Pulverbett integrierten, beleuchteten Quarzglasrohre, ist durch den verkürzten Messkreis und eine genauere Referenzpositionsermittlung eine vereinfachte *in-Prozess*-Charakterisierung von Fertigungsabweichungen μ_{prozess} bei der pulverbettbasierten additiven Fertigung erreicht worden. Auch weitere Messabweichungen $\hat{\varepsilon}$, die die schichtweise Auswertung der geometrischen Fertigungsabweichungen beeinflussen, sind näher charakterisiert worden. Durch die referenzierte Abstandsbestimmung der Konturschwerpunkte zum Bezugssystem wird eine wesentliche Grundlage der Konturanalyse gelegt. Die Referenzierung ist weiterhin essentiell für die Messdatenerfassung und eine anschließende Prozessregelung, die eine Beobachtbarkeit der Messgrößen erfordert. Um eine exakte Zuordenbarkeit der Messdaten zu jedem Zeitpunkt des untersuchten LBM-P-Prozesses zu gewährleisten, sind verschiedene Konzepte zur schichtweisen Messdatenauswertung abgeleitet worden. Ziel der Arbeit ist es gewesen, eine Empfehlung für ein systematisches, strukturiertes Vorgehen bei der Fertigungsüberwachung zu erarbeiten und damit einen Beitrag für eine standardisierte Qualitätskontrolle im AM zu leisten.

Um eine bessere Zuordnung der Entstehungsursachen geometrischer Bauteilabweichungen mit Hilfe des Referenzierungssystems zu ermöglichen, sind einzelne Prozesseinflüsse, wie die Absenkung der Bauplattform, die Wiederholpräzision des Scanners sowie schichtweise auftretende laterale Konturverlagerungen näher analysiert worden. Die messtechnischen Ansätze haben überwiegend auf der referenzierten Erfassung von Konturen des schichtweise eingebrachten Schmelzbades sowie der durchschimmernden Bauteilkonturen basiert.

Durch ein Encodersystem, das unmittelbar unter der Bauplattform an den Referenzierungsrohren angebracht worden ist, konnten auch Abweichungen in *z*-Richtung der eingestellten Pulverschichthöhen analysiert werden. Beim untersuchten Fertigungsprozess haben die ermittelten Abweichungen der Pulverbettabsenkung mit eingestellten Schichtdicken des PA12-Pulvers von 100 μm ca. 2 % – 3 % betragen.

Nachdem die Messbedingungen während der optischen *in situ*-Erfassung der einzelnen Fertigungsschichten durch zusätzliche Beleuchtungssysteme verbessert worden sind, ist eine Bildaufbereitung der Messdaten und eine anschließende Kantendetektion nach *Canny* erfolgt. Hierbei ist besonders auf eine gute Bildqualität bei der Datenerfassung zu achten, um keine systematischen Messabweichungen in Folge der Kantendetektion zu erhalten.

Eine perspektivische Korrektur auf Grundlage der Kalibrierung, eine anschließende Bereichseingrenzung und Kontrastanpassung sowie eine Filterung der Messdaten sind im Rahmen der Bildverarbeitung essentiell für eine realitätsnahe Konturauswertung.

In einem ersten Schritt der Konturanalyse ist die Positionsstabilität des Referenzierungssystems relativ zu den Kamerasystemen untersucht worden. Diese gilt als wesentliche Forderung der Beobachtbarkeit, die für referenzierte Konturmessung erforderlich ist. Die Positionsstabilität der einzelnen Referenzierungsrohre sowie des gemeinsamen Referenzierungskordinatensprungs sind anhand der Auswertung der Einzelpunktschwankungen und der Reproduzierbarkeit der Abstandsbestimmung zwischen den Referenzierungsrohren unter Prozessbedingungen bestätigt worden.

Durch die nachgewiesene Positionsstabilität der Referenzierungsrohre wird auch die Beurteilung der Wiederholpräzision des Galvanometer-Scanners ermöglicht. Durch ein wiederholtes Anfahren der Referenzpositionen mit einer koaxial, in den Strahlengang integrierter Kamera ist die Wiederholpräzision des Scanners auch unter Prozessbedingungen von 168 °C mit einer Standardabweichung von ca. 4 µm bestätigt worden. Neben den mechanischen Abweichungen durch die fertigungsgesteuerte Verstellung der Scannerspiegel kann auch eine temperaturbedingte Drift der koaxialen Kamera relativ zum Referenzierungssystem ursächlich für die ermittelten Positionsabweichungen der Laserstrahlführung sein. In diesem Kontext ist auch die temperaturbedingte Drift des Schmelzbadkamarasystems relativ zum Referenzierungssystem analysiert worden. Diese wird auf prozessbedingte Temperaturänderungen entlang der Fertigungs- und Messkreise zurückgeführt. Zwar fallen die erfassten relativen Verschiebungen bei annähernd konstanten Prozessbedingungen von ca. 168 °C in der Bauphase deutlich kleiner aus als während der Aufheizphase, die relativen Positionsschwankungen des Referenzierungssystems zum Schmelzbadkamarasystem betragen jedoch ca. ± 15 µm. Diese erfassten Positionsschwankungen werden aufgrund der nachgewiesenen Positionsstabilität des Referenzierungssystems überwiegend den temperaturbedingten Längendehnungen des Anlagerahmens und den Halterungen der optischen Messsysteme der Kamerasysteme zugeordnet. Es kommt jedoch nur marginal zu einer Rotation des Kamerasystems relativ zur Beobachtungsebene bei Prozessbedingungen, wie anhand der schichtweise analysierten Abstände und Verschiebungen zwischen den Referenzierungsrohren bestätigt worden ist.

Nachdem auch die Wiederholpräzision der Konturerfassung durch Kurzzeitmessungen sowie die Reproduzierbarkeit des Auswertalgorithmus und der Einfluss des Umgebungsräuschens auf die Kantenfindung überprüft wor-

den sind, ist weiterhin der Effekt der durchschimmernden Wärmestrahlung tiefer gelegener Bauteilkonturen auf die Kantendetektion der aktuellen Fertigungsschicht analysiert worden. Anhand des untersuchten Stufenversatzkörpers und der doppelseitigen Schräge hat sich gezeigt, dass die Wärmestrahlung auch die Kantendetektion der obersten Fertigungsschicht erschweren kann. Die durchschimmernden Bauteilkonturen konnten durch mehrere PA₁₂-Pulverschichten bis ca. 0,3 mm noch reproduzierbar erfasst werden. Eine reproduzierbare Auswertung der Schmelzbadkonturen kann jedoch erst nach ca. 5 – 10 Schichten empfohlen werden, nachdem ein entsprechender Grauwertunterschied von mindestens 20 zum umliegenden PA₁₂-Pulverbett vorliegt.

Alle untersuchten Einflüsse auf die Messung sollten bei der Ermittlung der lateralen Positionsverschiebungen des Schmelzbades infolge der referenzierten *in situ*-Prozessüberwachung berücksichtigt und standardmäßig in Vorversuchen ermittelt werden. Von den untersuchten Messgrößen hat dabei der Pulverauftragsprozess den nachweislich größten Einfluss auf die schichtweisen lateralen Konturverlagerungen der untersuchten LBM-Forschungsanlage. Dieser bedingt laterale Verschiebungen der Schmelzbadkonturen von ca. $\pm 50 \mu\text{m}$. Neben den material- und bauteilspezifischen Fertigungseinflüssen nach Gleichung 2.3.1 sind die pulverauftragsbedingten Abweichung der untersuchten Forschungsanlage im Wesentlichen für die erfassten geometrischen Bauteilabweichungen μ_{post} der gefertigten AM-Bauteile verantwortlich. Obwohl kein direkter Kontakt des Pulverauftragssystems zum Referenzierungssystem vorgelegen hat, hat die Standardabweichungen in x -Richtung des Pulverauftrag aufgrund der Kraftübertragung über das Pulver auch beim Referenzierungssystem ca. $17 \mu\text{m}$ betragen. Diese pulverauftragsbedingte Schwankung des im Pulverbett integrierten Referenzierungssystems fällt im Vergleich zur Referenzierung über die Bauraumkanten oder den additiv gefertigten Referenzmarkern kleiner aus. Durch eine noch steifere Ausführung der Lagerungen der Referenzierungsrohre oder einen automatisierten, gleichmäßigeren Pulverauftrag könnte dieser Einfluss weiter reduziert werden. Durch einen Vergleich der Positionen der referenzierten Schmelzbadkonturen mit den durchschimmernden Konturen tieferer Fertigungsschichten ist abschließend der Nachweis lateraler, pulverauftragsbedingter Konturverlagerungen erbracht worden.

Für eine weiterführende Prozessregelung auf Grundlage der erfassten referenzierten Fertigungs- und Messabweichungen wird neben der nachgewiesenen Beobachtbarkeit eine ausreichende Steuerbarkeit der Prozesskenngrößen gefordert. Da jedoch die Steuerbarkeit bei der untersuchten LBM-Forschungsanlage aufgrund der manuellen Bedienung und zahlreicher anlagentechnischer Defizite nicht gewährleistet werden kann (vgl. Kapitel 7),

ist auch die erzielbare Form-, Lage- und Maßhaltigkeit der gefertigten AM-Bauteile nur bedingt gegeben. Die vorliegende Arbeit mit Schwerpunkt auf dem entwickelten messtechnischen Ansatz zur referenzierten *in-Prozess*-Überwachung wird deshalb im nachfolgenden Kapitel 9 durch einen Ausblick auf weiterführende prozessbegleitende Strategien zur Korrektur lateral erfasseter Fertigungsabweichungen ergänzt.

9 Ausblick

In einem abschließenden Ausblick soll neben dem überwachten LBM-Fertigungsprozess auch ein weiterführender Ansatz einer möglichen Prozessregelung zur prozessbegleitenden Korrektur von Fertigungsabweichungen vorgestellt werden. Neben den überwachten Prozess- und Störgrößen werden die schichtweise ermittelten, geometrischen Fertigungsabweichungen nach Bild 55 um eine Prozessregelung ergänzt. Das bestehende Portfolio an Regelungsstrategien (vgl. Abschnitt 2.5) soll dadurch um einen weiteren Ansatz zur prozessbegleitenden Korrektur von Fertigungsabweichungen erweitert werden. Anders als bei den gängigen Regelansätzen basiert das erarbeitete Regelkonzept jedoch auf einer schichtweisen Positionsverschiebung des Rohdatensatzes. Der Vorteil dieses Korrekturansatzes äußert sich darin, dass die einzelnen erfassten Fertigungsabweichungen global, auf Grundlage der referenzierten Messdaten, korrigiert werden können. Dabei sind die jeweiligen Entstehungsursachen der Fertigungsabweichungen zunächst zweitrangig. Weiterhin sind genaue Kenntnisse über auftretende Messabweichungen notwendig, die mit Hilfe des vorgestellten Referenzierungsansatzes im Vorfeld des Fertigungsprozesses ermittelt werden können. Wenn durch Offset- oder Einzelpunktekorrekturen der referenzierten Schwerpunktverschiebungen der Einfluss der Messabweichungen kompensiert werden kann, ist eine globale Korrektur der systematischen, lateralen geometrischen Fertigungsabweichungen möglich. Nach einer Rückführung der ausgewerteten Messdaten des Schmelzbades und der durchschimmernden Schichten bzw.

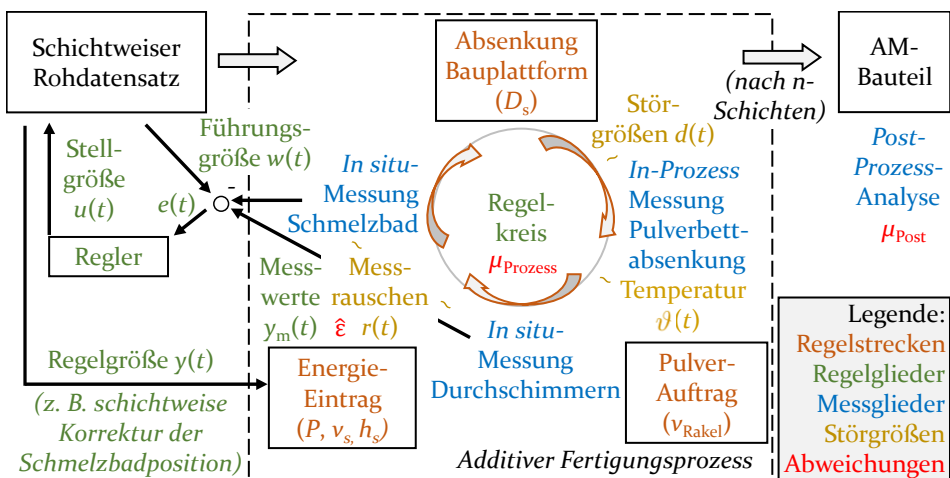


Bild 55: Übersicht zur Prozessüberwachung und weiterführenden Prozessregelung auf Grundlage der erfassten referenzierten Fertigungs- (μ_{prozess}) und Messabweichungen ($\hat{\epsilon}$)

der Führungsgrößen $w(t)$ der Konturschwerpunkte in den Regelkreis, kann unter Berücksichtigung der bekannten Störgrößen $d(t)$ die Prozessregelung eingeleitet werden. Anschließend wird die Regelabweichung $e(t)$ ermittelt, die sich aus dem referenzierten lateralen Versatz der eingebrachten Schmelzbadkontur und der zugehörigen Position des AM-Querschnittes nach dem Pulverauftrag ergibt (vgl. Abschnitt 6.5.2). Je nach Richtung und Betrag der berechneten Regelabweichung kann mit Hilfe einer Stellgröße $u(t)$ die Position des Bauteilquerschnittes der nächsten zu fertigenden Schicht korrigiert werden.

Da auf Grundlage von Vorversuchen davon ausgegangen werden kann, dass sich vor allem die oberflächennahen Bauteilschichten abhängig von der bereits gefertigten Bauteilhöhe aufgrund der Krafteinwirkung durch den Pulverauftrag verschieben, sind zwei unterschiedliche Korrekturansätze denkbar. Der erste Ansatz beruht auf einer Korrektur der neu einzubringenden Schmelzbadkontur, die genau auf die Position der vorher ermittelten Fertigungsposition verschoben wird. Daneben ist auch ein zweiter Ansatz mit einer schichtweisen Anpassung der Position des Rohdatensatzes abhängig von der jeweiligen Richtung des Pulverauftrags möglich. Bei letzterem Ansatz wird bei einer bekannten lateralen pulverauftragsbedingten Verschiebung die neu einzubringende Schmelzbadkontur in Gegenrichtung des Pulverauftrags verschoben. Dadurch liegt die Bauteilkontur nach dem Pulverauftrag näher an der gewünschten Position im Pulverbett. Beide Ansätze, die auf der Korrektur der schichtweisen Schmelzbadposition des Rohdatensatzes beruhen, eignen sich für die Kompensation geometrischer Fertigungsabweichungen, können jedoch aufgrund der mangelnden Steuerbarkeit der untersuchten LBM-Forschungsanlage im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt und analysiert werden.

Für weiterführende Untersuchungen bezüglich der Prozessüberwachung referenzierter Fertigungsabweichungen und deren anschließende prozessbegleitende Korrektur ist deshalb ein Transferprojekt an einer industriellen Fertigungsanlage anzustreben. Durch einen Austausch des entwickelten modularen Pulverbettkastens oder eine Integration der Referenzierungsrohre in die Bauplattform der industriellen Fertigungsanlage können unter Verwendung eines zusätzlichen hochauflösenden Kamerasystems wesentliche Grundlagen für die empfohlene, referenzierte *in-Prozess*-Überwachung gelegt werden. Damit ist es durch einfache Anlagenmodifikationen möglich, bei einem automatisierten, reproduzierbaren Fertigungsprozess eine genauere Beurteilung auftretender geometrischer Abweichungen vorzunehmen.

Insgesamt ist durch die referenzierte Messdatenerfassung und Auswertung der in-Prozessmessdaten ein wichtiger Meilenstein für ein standardisiertes Vorgehen für eine umfassende Prozesskontrolle im AM erbracht worden. Bis allerdings alle systematischen Fertigungsabweichungen im Rahmen der prozessbegleitenden Fertigungsüberwachung entsprechend ermittelt und durch angepasste Regelstrategien korrigiert werden können, sind noch einige Schritte für eine wirtschaftliche Serienfertigung von AM-Bauteilen erforderlich.

Anhang

A.1 Spektroskopie

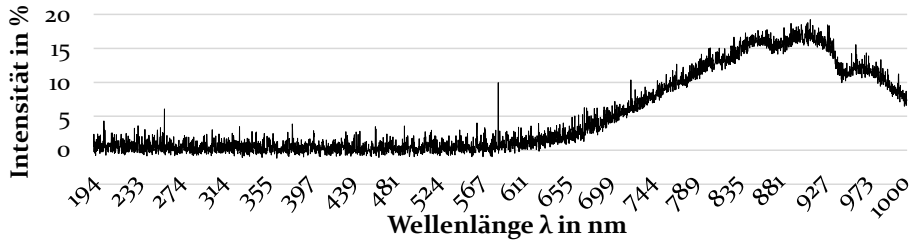


Bild 56: Spektroskopieauswertung des, vom IR-Heizsystems emittierten Wellenlängenspektrums unter Prozessbedingungen (ausgerichtet auf PA₁₂-Pulverbett bei ca. 168 °C)

A.2 Referenzmessung der Pulverbettabsenkung

a) Einfache ANOVA: Messdaten des interfer. Messtasters vs. Messposition

Methode

Nullhypothese Alle Mittelwerte sind gleich.

Alternativhypothese Nicht alle Mittelwerte sind gleich.

Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$

Für die Analyse wurde von gleichen Varianzen ausgegangen

Varianzanalyse

Quelle	DF	Kor SS	Kor MSE	F-Wert	p-Wert
Messposition	4	38,26	9,565	2,25	0,068

Mittelwerte

Messposition	N	Mittelwert in μm	Std.Abw. in μm	95%-KI
bei Ref.2	24	97,725	2,616	(96,891; 98,559)
Mitte Ref.1 & Ref. 2	24	96,979	2,606	(96,146; 97,813)
Zentrum	24	96,175	1,818	(95,341; 97,009)
Mitte Ref.3 & Ref.4	24	97,592	1,476	(96,758; 98,425)
bei Ref.4	24	97,458	1,461	(96,625; 98,292)

b) Boxplot

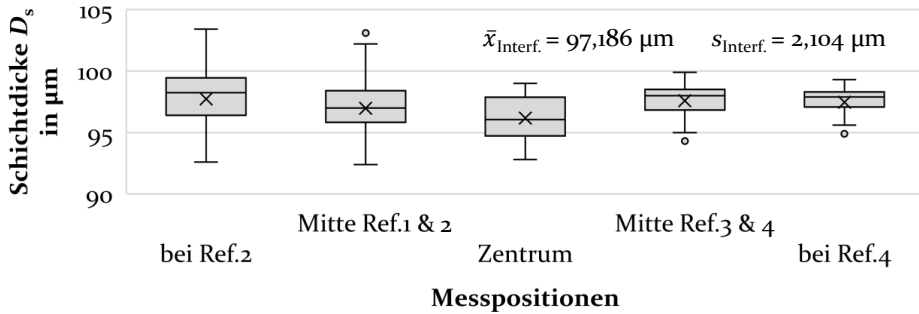


Bild 57: Auswertung der Pulverbettabsenkung mittels laserinterferometrischen Messtaster: a) Einfache ANOVA (Varianzanalyse) b) Boxplotauswertung an fünf Messpositionen

A.3 Langzeitmessung Referenzierungssystem bei Raumtemperatur

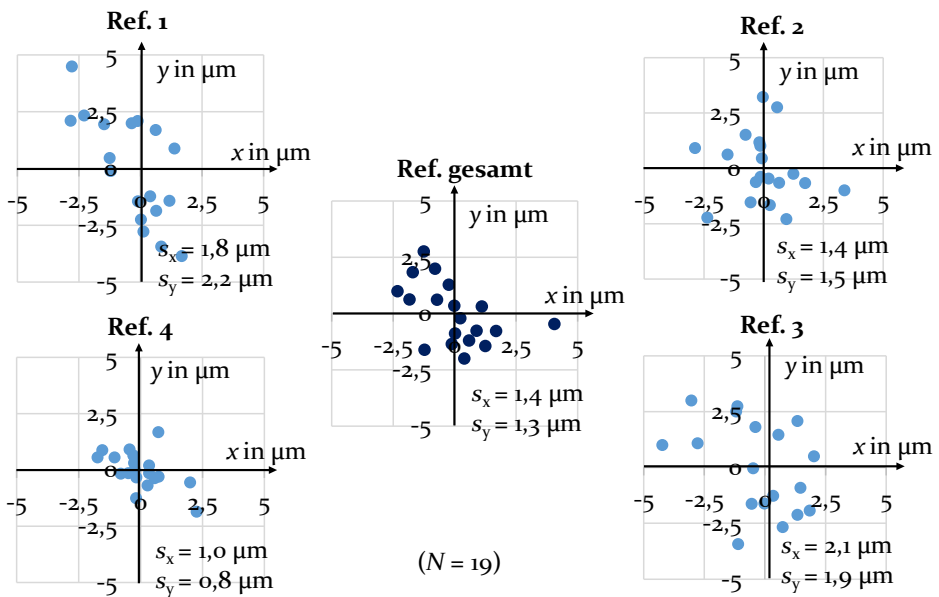


Bild 58: Langzeit-Positionsstabilität der Referenzierungsrohre bei Raumtemperatur (Messdauer 90 min)

A.4 Temperaturmessung Baukammer

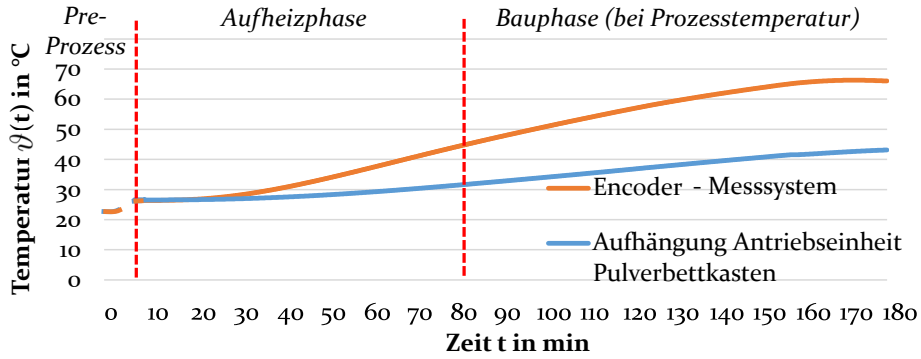


Bild 59: Pt100-Temperaturmessung unterhalb der Baukammer

A.5 Langzeitmessung Referenzierungssystem bei Prozesstemperatur

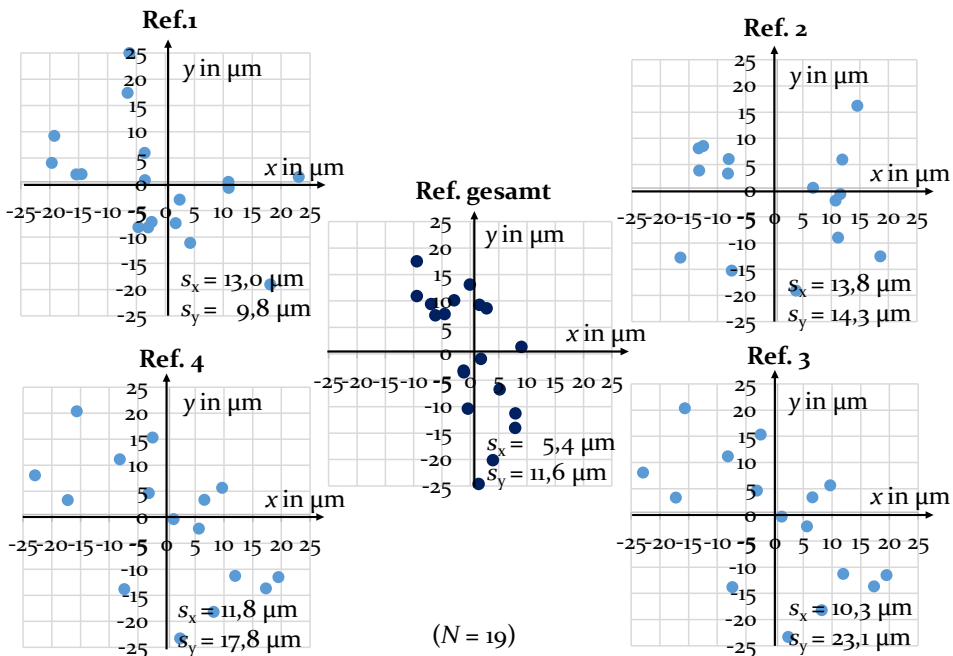


Bild 60: Langzeit-Positionsstabilität der Referenzierungsrohre bei Prozesstemperatur (Messdauer 90 min)

A.6 Statistische Versuchsplanung

Tabelle 7: Statistische Versuchsplanung zur Auswertung des Einflusses der variierenden Einstellparameter des Kantendetektionsalgorithmus (Schicht 10)

Nr.	Schwell- werte	Std.- abw.	Ref.ges $(x_{ref}; y_{ref})$ \bar{A}_{ref} (mm ²)	Zyl.30 $(x_1; y_1)$ A_1 (mm ²)	Zyl.20 $(x_2; y_2)$ A_2 (mm ²)	Zyl.15 $(x_3; y_3)$ A_3 (mm ²)	Zyl.10 $(x_4; y_4)$ A_4 (mm ²)
1	[0,001; 0,500]	8	(1107,807; 1326,131) 81	(1230,366; 672,243) 754	1228,728; 1188,146) 349	(1225,380; 1595,141) 203	(1222,694; 1928,307) 96
2	[0,500; 0,999]	8	(1107,807; 1326,131) 81	(1230,366; 672,243) 754	1228,728; 1188,146) 349	(1225,380; 1595,141) 203	(1222,694; 1928,307) 96
3	[0,001; 0,500]	16	(1108,019; 1326,491) 80	(1229,450; 672,403) 741	1227,740; 1187,886) 340	(1224,15; 1594,779) 194	(1221,284; 1928,405) 89
4	[0,500; 0,999]	16	(1108,019; 1326,491) 80	(1229,450; 672,403) 741	1227,740; 1187,886) 340	(1224,15; 1594,779) 194	(1221,284; 1928,405) 89
5	[0,001; 0,500]	24	(1108,619; 1327,179) 77	(1227,86; 672,419) 727	1226,693; 1187,563) 332	(1222,653; 1594,454) 187	(1220,269; 1928,012) 89
6	[0,500; 0,999]	24	(1108,619; 1327,179) 77	(1227,86; 672,419) 727	1226,693; 1187,563) 332	(1222,653; 1594,454) 187	(1220,269; 1928,012) 89
7	[0,001; 0,500]	32	(1109,830; 1327,908) 68	(1226,827; 672,451) 715	1226,076; 1187,392) 324	(1221,742; 1594,378) 179	(1219,676; 1927,708) 77
8	[0,500; 0,999]	32	(1109,830; 1327,908) 68	(1226,827; 672,451) 715	1226,076; 1187,392) 324	(1221,742; 1594,378) 179	(1219,676; 1927,708) 77
9	[0,001; 0,500]	40	(1111,139; 1328,629) 58	(1226,169; 672,460) 703	1225,694; 1187,312) 316	(1221,142; 1594,457) 172	(1219,265; 1927,49) 74
10	[0,500; 0,999]	40	(1111,139; 1328,629) 58	(1226,169; 672,460) 703	1225,694; 1187,312) 316	(1221,142; 1594,457) 172	(1219,265; 1927,490) 74

A.7 Oberflächenanalyse Zylinder

Tabelle 8: Oberflächenanalyse der Mantelflächen der AM-Zylinder der Forschungsanlage (Gaußfilterung, $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$)

AM Zylinder Forschungs- anlage EOS P380	Rauheit (Linienprofil) in μm (DIN EN ISO 4287:2010)			Rauheit (flächenhaft) in μm (DIN EN ISO 25178-2:2012)		
	R_a	R_q	R_z	S_a	S_q	S_z
Zylinder 30	7,7	9,7	36,0	82,9	115	840
Zylinder 20	7,2	9,5	33,7	113	155	1030
Zylinder 15	7,7	10,2	38,6	114	155	947
Zylinder 10	9,4	11,9	45,0	155	206	1300

wobei $R_a = \frac{l}{l_n} \int |z(x)| dx$, $R_q = \sqrt{\frac{l}{l_n} \int z(x)^2 dx}$, $R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{zi}$,

und $S_a = \frac{1}{A} \iint |z(x,y)| dx dy$, $S_q = \sqrt{\frac{l}{A} \iint z(x,y)^2 dx dy}$, $S_z = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n S_{zi}$,

mit l_n : Messstrecke, A : Messfläche und $z(x,y)$: Höhenprofil

Tabelle 9: Oberflächenanalyse der Mantelflächen der AM-Zylinder der industriellen LBM-Anlage (Gaußfilterung, $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$)

AM Zylinder industrielle EOS Formiga P110	Rauheit (Linienprofil) in μm (DIN EN ISO 4287:2010)			Rauheit (flächenhaft) in μm (DIN EN ISO 25178-2:2012)		
	R_a	R_q	R_z	S_a	S_q	S_z
Zylinder 30	3,1	3,9	17,4	42,3	55,5	448
Zylinder 20	3,7	4,6	23,0	39,3	49,0	435
Zylinder 15	3,2	4,1	19,5	44,3	55,0	509
Zylinder 10	4,0	5,0	18,3	58,9	71,7	414

wobei $R_a = \frac{l}{l_n} \int |z(x)| dx$, $R_q = \sqrt{\frac{l}{l_n} \int z(x)^2 dx}$, $R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{zi}$,

und $S_a = \frac{1}{A} \iint |z(x,y)| dx dy$, $S_q = \sqrt{\frac{l}{A} \iint z(x,y)^2 dx dy}$, $S_z = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n S_{zi}$,

mit l_n : Messstrecke, A : Messfläche und $z(x,y)$: Höhenprofil

Literaturverzeichnis

- Abd-Elghany, K. und Bourell, D. L. (2012).** *Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting.* *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 18, Nr. 5, S. 420 –428. DOI: 10.1108/13552541211250418.
- Balu, P.; Leggett, P. und Kovacevic, R. (2012).** *Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process.* *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 212, Nr. 7, S. 1598 –1610. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.020.
- Bautze, T.; Moser, R.; Strebel, M. und Kogel-Hollacher, M. (2015).** *Use of inline coherent imaging for laser welding processes: Process control and beyond.* *Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference (LiM)*, S. 1 –10.
- Bayerlein, F. und Zaeh, M. F. (2016).** *Reduction of manufacturing-induced dimensional deviations in laser beam melting by pre-deformation.* *6th International Conference on Additive Technologies (iCAT)*, S. 208 –214. ISSN: 978-961-285-537-6.
- Berger, U.; Hartmann, A. und Schmid, D. (2013).** *Additive Fertigungsverfahren: Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing.* Bd. 1, Europa Lehrmittel Verlag. ISBN: 978-3-8085-5033-5.
- Berndt, G.; Hultsch, E. und Weinhold, H. (1968).** *Funktionstoleranz und Messunsicherheit.* *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, Bd. 17, Nr. 2, S. 465 –471.
- Berumen, S.; Bechmann, F.; Lindner, S.; Kruth, J.-P. und Craeghs, T. (2010).** *Quality control of laser-and powder bed-based additive manufacturing (AM) technologies.* *Physics procedia - 6. Konferenz Photonischer Technologien (LANE)*, Bd. 5, S. 617 –622. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.089.
- Bi, G.; Sun, C. N. und Gasser, A. (2013).** *Study on influential factors for process monitoring and control in laser aided additive manufacturing.* *Journal of Materials Processing Technology - IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Bd. 213, Nr. 3, S. 463 –468. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.10.006.
- Birnbaum, A.; Aggarangsi, P. und Beuth, J. (2003).** *Process scaling and transient melt pool size control in laser-based additive manufacturing processes.* *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, S. 328 –339. DOI: 10.26153/tsw/5568.
- Biswas, R. und Sil, J. (2012).** *An improved canny edge detection algorithm based on type-2 fuzzy sets.* *Procedia Technology (C3IT)*, Bd. 4, S. 820 –824. DOI: 10.1016/j.protcy.2012.05.134.
- Blanter, J. E. (1892).** *Manufacture of contour relief maps.* Patent US473,901A.
- Bouguet, J.-Y. (2015).** *Camera calibration toolbox for Matlab.* <http://www.>

- vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (besucht am 01.06.2021).
- Bourell, D.; Kruth, J. P.; Leu, M.; Levy, G.; Rosen, D.; Beese, A. M. und Claire, A. (2017).** *Materials for additive manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 66, Nr. 2, S. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
- Caltanissetta, F.; Grasso, M.; Petró, S. und Colosimo, B. M. (2018).** *Characterization of in-situ measurements based on layerwise imaging in laser powder bed fusion. Additive Manufacturing*, Bd. 24, S. 183–199. DOI: 10.1016/j.addma.2018.09.017.
- Canny, J. F. (1986).** *A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Bd. 8, Nr. 6, S. 679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- Caulfield, B.; McHugh, P. E. und Lohfeld, S. (2007).** *Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 182, Nr. 1–3, S. 477–488. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007.
- Chai, T. und Draxler, R. R. (2014).** *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific model development*, Bd. 7, Nr. 3, S. 1247–1250. DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- Chandwadkar, R.; Dohle, S.; Gadewar, V.; Raut, D. und Tiwaskar, S. A. (2013).** *Comparison of edge detection techniques. 6th Annual of IRAJ Conference*, Bd. 8, S. 133–136. DOI: 10.13140/RG.2.1.5036.7123.
- Chua, Z. Y.; Ahn, I. H. und Moon, S. K. (2017).** *Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: Status and applications. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Bd. 4, Nr. 2, S. 235–245. DOI: 10.1007/s40684-017-0029-7.
- Cooke, A. L. und Moylan, S. P. (2011).** *Process intermittent measurement for powder-bed based additive manufacturing. Proceedings of the 22nd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)- An Additive Manufacturing Conference (NIST)*, S. 81–98.
- Craeghs, T.; Clijsters, S.; Yasa, E. und Kruth, J.-P. (2011).** *Online quality control of selective laser melting. Proceedings of the 22nd International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)- An Additive Manufacturing Conference (NIST)*, S. 212–226.
- Davis, S. M. (1987).** *Future perfect*. Bd. 1. Basic Books Verlag. ISBN: 978-1-349-11255-5. DOI: 10.1007/978-1-349-11255-5_2.
- Dechet, M.; Gómez Bonilla, J.; Lanzl, L.; Drummer, D.; Bück, A.; Schmidt, J. und Peukert, W. (2018).** *Spherical polybutylene terephthalate (PBT)— polycarbonate (PC) blend particles by mechanical alloying and thermal rounding. Polymers*, Bd. 10, Nr. 1373, S. 1–22. DOI: doi:10.3390/polym10121373.
- Dechet, M. A.; Goblirsch, A.; Romeis, S.; Zhao, M.; Lanyi, F. J.; Kaschta,**

- J.; Schubert, D. W.; Drummer, D.; Peukert, W. und Schmidt, J. (2019).** *Production of polyamide 11 microparticles for additive manufacturing by liquid-liquid phase separation and precipitation. Chemical Engineering Science*, Bd. 197, S. 11 –25. DOI: 10.1016/j.ces.2018.11.051.
- Deckard, C. R. (1989).** *Method and apparatus for producing parts by selective sintering. Patent US4,863,538A.*
- Devesse, W.; De Baere, D. und Guillaume, P. (2014).** *Design of a model-based controller with temperature feedback for laser cladding. Physics Procedia - 8th International Conference on Photonic Technologies (LANE)*, Bd. 56, S. 211 –219. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.165.
- DIN 4760:1982-06.** *Gestaltabweichungen - Begriffe, Ordnungssystem (DIN 4760:1982).*
- DIN 5036-3:1979-11.** *Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien - Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen (DIN 5036-3:1979).*
- DIN 52616:1977-11.** *Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommeßplatten-Gerät (DIN 52616-11:1977).*
- DIN 8580:2020-01.** *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung (DIN 8580:2003).*
- DIN EN ISO/ ASTM 52900:2017-06.** *Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie (ISO/ASTM 52900:2015).*
- DIN EN ISO/ ASTM 52921:2017-01.** *Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung – Koordinatensysteme und Prüfmethodologien (ISO/ASTM 52921:2013).*
- DIN EN ISO 1:2016-12.** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Standardreferenztemperatur für die Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (ISO 1:2016).*
- DIN EN ISO 1101:2017-09.** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2017).*
- DIN EN ISO 11357-1:2017-02.** *Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11357-1:2016).*
- DIN EN ISO 1183-1:2019-09.** *Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren (ISO 1183-1:2019).*
- DIN EN ISO 14253-1:2018-07.** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen (ISO 14253-1:2017).*
- DIN EN ISO 14253-2:2018-09.** *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 2: Anleitung zur Schätzung der Unsicherheit bei GPS-Messungen, bei der Kalibrierung*

- von Messgeräten und bei der Produktprüfung (ISO 14253-2:2011).
- DIN EN ISO 14638:2015-12.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Matrix-Modell (ISO 14638: 2015).
- DIN EN ISO 16610-1:2015-11.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung - Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO 16610-1:2015).
- DIN EN ISO 16610-22:2016-04.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung - Teil 22: Lineare Profilfilter: Spline-Filter (ISO 16610-22:2015).
- DIN EN ISO 16610-31:2017-03.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung - Teil 31: Robuste Profilfilterung: Gaußsche Regressionsfilter (ISO 16610-31:2016).
- DIN EN ISO 16610-41:2015-12.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung - Teil 41: Morphologische Profilfilter: Filter mit Kreisscheibe und horizontaler Strecke (ISO 16610-41:2015).
- DIN EN ISO 16610-61:2020-05.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung - Teil 61: Lineare Flächenfilter: Gauß-Filter (ISO 16610-61:2015).
- DIN EN ISO 17296-2:2016-12.** Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (ISO 17296-2:2015).
- DIN EN ISO 17296-4:2016-12.** Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 4: Überblick über die Datenverarbeitung (ISO 17296-4:2014).
- DIN EN ISO 17450-1:2012-04.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen - Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO 17450-1:2011).
- DIN EN ISO 17450-4:2018-05.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen - Teil 4: Geometrische Merkmale zum Quantifizieren von GPS-Abweichungen (ISO 17450-4:2017).
- DIN EN ISO 25178-6:2010-06.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 6: Klassifizierung von Methoden zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-6:2010).
- DIN EN ISO 25178-600:2019-12.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 600: Messtechnische Merkmale für flächentopographische Messverfahren (ISO 25178-600:2019).
- DIN EN ISO 291:2008-08.** Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung (ISO 291:2008).
- DIN EN ISO 307:2013-08.** Kunststoffe - Polyamide - Bestimmung der Viskositätszahl (ISO 307:2007).
- DIN EN ISO 3167:2014-11.** Kunststoffe - Vielzweckprobekörper (ISO 3167:2014).
- DIN EN ISO 3274:1998-04.** Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996).
- DIN EN ISO 527-1:2019-12.** Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften –

- Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019).*
- DIN EN ISO 5459:2013-05.** Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme (ISO 5459:2011).
- DIN EN ISO 60:2000-01.** Kunststoffe - Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen, die durch einen genormten Trichter abfließen können (Schüttdichte) (ISO 60:1977).
- DIN EN ISO 787-11:1995-10.** Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe - Teil 11: Bestimmung des Stampfvolumens und der Stampfdichte (ISO 787-11:1981).
- DIN ISO 14887:2010-03.** Probenvorbereitung - Verfahren zur Dispergierung von Pulvern in Flüssigkeiten (ISO 14887:2000).
- Drummer, D.; Drexler, M. und Wudy, K. (2015).** Density of laser molten polymer parts as function of powder coating process during additive manufacturing. *Procedia Engineering 7th World Congress on Particle Technology (WCPT7)*, Bd. 102, S. 1908–1917. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.331.
- Drummer, D.; Greiner, S.; Zhao, M. und Wudy, K. (2019).** A novel approach for understanding laser sintering of polymers. *Additive Manufacturing*, Bd. 27, S. 379–388. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.012.
- Dupin, S.; Lame, O.; Barrès, C. und Charneau, J.-Y. (2012).** Microstructural origin of physical and mechanical properties of polyamide 12 processed by laser sintering. *European Polymer Journal*, Bd. 48. Nr. 9, S. 1611–1621. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2012.06.007.
- Ehrenstein, G. W.; Riedel, G. und Trawiel, P. (2004).** *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Bd. 1. Carl Hanser Verlag. ISBN: 3-446-22673-7.
- Eichler, H. J. und Eichler, J. (2015).** *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Bd. 8. Springer Verlag. ISBN: 978-3-642-41437-4. DOI: 10.1007/978-3-642-41438-1.
- EOS (2004).** *Bedienung EOSINT P380 - Laser-Sinter Systeme für Kunststoffpulver*. Datenblatt.
- EOS (2019).** *Inspection certificate 3.1 according to EN 10204 - PA 2200 Polyamide powder*. Datenblatt.
- Everton, S. K.; Hirsch, M.; Stravroulakis, P.; Leach, R. K. und Clare, A. T. (2016).** Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials and Design*, Bd. 95, S. 431–445. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.099.
- Föllinger, O. (2016).** *Regelungstechnik*. Bd. 12. VDE Verlag. ISBN: 978-3-8007-4201-1.
- Foster, B. K.; Reutzel, E. W.; Nassar, A. R.; Hall, B. T.; Brown, S. W. und Dickman, C. J. (2015).** Optical, layerwise monitoring of powder bed fusion. *26th international Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)*, S. 295–307.
- Fulga, S.; Davidescu, A.; Effenberger, I. und Verl, A. (2016).** *Tasks for*

- in-line quality control of additive manufacturing powder bed fusion processes. Proceedings of 6th International Conference on Additive Technologies (iCAT)*, S. 285 –291. ISSN: 978-961-285-537-6.
- Galovskyi, B.; Hausotte, T.; Drummer, D. und Harder, R. (2015).** *In-line layer wise measurements for selective laser sintering process. XXI IMEKO World Congress - Measurement in Research and Industry*, S. 1410 –1414. ISSN: 978-80-01-05793-3.
- Gebhardt, A. (2013).** *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. Bd. 4. Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-43651-0. DOI: 10.3139/9783446436527.
- Gebhardt, A. (2016).** *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping-Tooling-Produktion*. Bd. 5. Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44401-0.
- GOM (2012).** *ATOS Compact Scan - Benutzerhandbuch - Hardware*. Datenblatt.
- Goodridge, R. D.; Tuck, C. J. und Hague, R. J. M. (2012).** *Laser sintering of polyamides and other polymers. Progress in Materials Science*, Bd. 57, S. 229 –267. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2011.04.001.
- Grimm, T.; Wiora, G. und Witt, G. (2015).** *Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. Surface Topography: Metrology and Properties*, Bd. 3, Nr. 1, S. 014001-1 –12. DOI: 10.1088/2051-672X/3/1/014001.
- Hartmann, W.; Hausotte, T.; Drummer, D. und Wudy, K. (2012).** *Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile. RTejournal - Forum für Rapid Technologie*, Bd. 9, Nr. 1, S. 1 –17.
- Hausotte, T. (2015).** *DFG Sonderforschungsbereich 814 (SFB 814) - Additive Fertigung: Fortsetzungsantrag. Teilprojekt C4: Inkrementelle Inline-Prüftechnik für die additive Fertigung*. Bd. 2. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, S. 347 –366.
- Hausotte, T. (2019).** *DFG Sonderforschungsbereich 814 (SFB 814) - Additive Fertigung: Fortsetzungsantrag. Teilprojekt C4: Geometrische Mess- und Prüftechnik für die additive Fertigung*. Bd. 3. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, S. 351 –365.
- Heidenhain (2015).** *Winkelmessgeräte mit Eigenlagerung*. Datenblatt.
- Heikkilä, J. und Silven, O. (1997).** *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, Bd. 1063-6919, S. 1106 –1112. DOI: 10.1109/CVPR.1997.609468.
- Heinl, M.; Galovskyi, B. und Hausotte, T. (2016).** *Surface and dimensional measurements of additive manufactured workpieces. Proceedings of 6th International Conference on Additive Technologies (iCAT)*, S. 267 –273. ISSN:

- 978-961-285-537-6.
- Heinl, M.; Schmitt, F. K. und Hausotte, T. (2018a).** *In-situ contour detection for additive manufactured workpieces. Procedia CIRP - 10. Konferenz Photonischer Technologien (LANE)*, Bd. 74, S. 664 –668. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.051.
- Heinl, M.; Laumer, T.; Bayer, F. und Hausotte, T. (2018b).** *Temperature-dependent optical material properties of polymer powders regarding in-situ measurement techniques in additive manufacturing. Polymer Testing*, Bd. 71, S. 378 –383. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.09.016.
- Heinl, M.; Greiner, S.; Wudy, K.; Pobel, C.; Rasch, M.; Huber, F.; Papke, T.; Merklein, M.; Schmidt, M.; Körner, C.; Drummer, D. und Hausotte, T. (2020a).** *Measuring procedures for surface evaluation of additively manufactured powder bed based polymer and metal parts. Measurement Science and Technology (MST)*, Bd. 31, Nr. 9-095292, S. 1 –14. DOI: 10.1088/1361-6501/ab89e2.
- Herzog, F. (2016).** *Method for producing a three-dimensinal component. Patent US 2016/0271884 A1.*
- Hofman, J. T.; Pathiraj, B.; Van Dijk, J.; De Lange, D. F. und Meijer, J. (2012).** *A camera based feedback control strategy for the laser cladding process. Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 212, Nr. 11, S. 2455 –2462. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.027.
- Hough, P. V. (1962).** *Method and means for recognizing complex patterns. Patent US 3,069,654.*
- Hu, D. und Kovacevic, R. (2003).** *Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 43, Nr. 1, S. 51 –60. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00163-3.
- Hull, C. W. (1986).** *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. Patent US 4,575,330A.*
- Imkamp, D.; Schmitt, R. und Berthold, J. (2012).** *Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik. Technisches Messen (tm)*, Bd. 79, Nr. 10, S. 433 –439. DOI: 10.1524/terme.2012.0251.
- IRCAM (2014).** *User Manual - Infrared Camera IRCAM Millenium® 1310k M pro. Datenblatt.*
- ISO/IEC Guide 98-3:2008.** *Unvertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of unvertainty in measurement (GUM:1995) (ISO 98-3-1:2008).*
- Item (2019).** *Technische Daten zu Profile. Datenblatt.*
- Zur Jacobsmühlen, J.; Kleszczynski, S.; Schneider, D. und Witt, G. (2013).** *High resolution imaging for inspection of laser beam melting systems. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, S. 707 –712. DOI: 10.1109/I2MTC.2013.6555507.
- Zur Jacobsmühlen, J.; Kleszczynski, S.; Witt, G. und Merhof, D. (2014).** *Robustness analysis of imaging system for inspection of laser beam melting*

- systems. *Proceedings to the 19th IEEE Conference on Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, S. 1–4. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005262.
- Zur Jacobsmühlen, J.; Kleszczynski, S.; Ladewig, A.; Witt, G. und Merhof, D. (2016a).** *In-situ surface roughness measurement of laser beam melted parts - a feasibility study of layer image analysis. Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC)*, S. 231–240.
- Zur Jacobsmühlen, J.; Achterhold, J.; Kleszczynski, S.; Witt, G. und Merhof, D. (2016b).** *Robust calibration marker detection in powder bed images from laser beam melting processes. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, S. 910–915. ISSN: 978-1-4673-8075-1. DOI: 10.1109/ICIT.2016.7474873.
- Zur Jacobsmühlen, J.; Achterhold, J.; Kleszczynski, S.; Witt, G. und Merhof, D. (2019).** *In-situ measurement of part geometries in layer images from laser beam melting processes. Progress in Additive Manufacturing*, Bd. 4, Nr. 2, S. 155–165. DOI: 10.1007/s40964-018-0068-9.
- Josupeit Stefan; Schmid, H.-J. (2016).** *Temperature history within laser sintered part cakes and its influence on process quality. Rapid Prototyping Journal*, Bd 22, Nr. 5, S. 788–793. DOI: 10.1108/RPJ-11-2015-0166.
- Kaddar, W. (2010).** *Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten.* Dissertationsschrift. Universität Duisburg-Essen.
- Keller, B. (1999).** *Rapid prototyping: Grundlagen zum selektiven Lasersintern von Polymerpulver.* Dissertationsschrift. Universität Stuttgart. ISBN: 3-8265-6554-1.
- Kruth, J.-P.; Duflou, J.; Mercelis, P.; Van Vaerenbergh, J.; Craeghs, T. und De Keuster, J. (2007).** *On-line monitoring and process control in selective laser melting and laser cutting. Proceedings of the 5th Lane Conference, Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE)*, Bd. 1, S. 23–37. ISSN: 978-3-87525-261-3.
- Kruth, J.-P. und Mercelis, P. (2009).** *Procedure and apparatus for in-situ monitoring and feedback control of selective laser powder processing. Patent US20090206065A1.*
- Kruth, J.-P.; Badrossamay, M.; Yasa, E.; Deckers, J.; Thijs, L. und Van Humbeeck, J. (2010).** *Part and material properties in selective laser melting of metals. Proceedings of 16th International Symposium on Electromachining (ISEM)*, S. 3–14. ISSN: 978-7-313-05630-6.
- Krystek, M. (2009).** *ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik. Technisches Messen (tm)*, Bd. 76, Nr. 3, S. 133–159. DOI: 10.1524/teme.2009.0927.
- Lachmayer, R.; Lippert, R. B. und Fahlbusch, T. (2016).** *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung.* Springer Verlag.

- ISBN: 978-3-662-49055-6. DOI: 10.1007/978-3-662-49056-3.
- Land, W. S. I.; Zhang, B.; Ziegert, J. und Davies, A. (2015).** *In-situ metrology system for laser powder bed fusion additive process. Procedia Manufacturing - 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research*, Bd. 1, S. 393 –403. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.047.
- Lanzl, L.; Greiner, S.; Wudy, K. und Drummer, D. (2016).** *Selective laser sintering of a polypropylene polyamide 12 blend: Bulk and component properties. Proceedings of 6th International Conference on Additive Technologies (iCAT)*, S. 170 –178. ISSN: 978-961-285-537-6.
- Laumer, T.; Stichel, T.; Amend, P.; Roth, S. und Schmidt, M. (2014).** *Analysis of temperature gradients during simultaneous laser beam melting of polymers. Physics Procedia - 8th International conference on photonic technologies (LANE)*, Bd. 56, S. 167 –175. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.159.
- Laumer, T.; Stichel, T.; Nagulin, K. und Schmidt, M. (2016).** *Optical analysis of polymer powder materials for selective laser sintering. Polymer Testing*, Bd. 56, S. 207 –213. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.10.010.
- Lerchen, M.; Hornung, J.; Zou, Y. und Hausotte, T. (2021a).** *Methods and procedure of referenced in situ control of lateral contour displacements in additive manufacturing. Journal of Sensors and Sensor Systems (JSSS)*, Bd. 10, S. 219 –232. DOI: 10.5194/jsss-10-219-2021.
- Lerchen, M.; Schinn, J. und Hausotte, T. (2021b).** *Referencing of powder bed for in situ detection of lateral layer displacements in additive manufacturing. Journal of Sensors and Sensor Systems (JSSS)*, Bd. 10, S. 247 –259. DOI: 10.5194/jsss-10-247-2021.
- Li, L. (2002).** *A comparative study of ultrasound emission characteristics in laser processing. Applied surface science*, Bd. 186, Nr. 1 – 4, S. 604 –610. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00695-X.
- Li, B.; Heng, L.; Köser, K. und Pollefeys, M. (2013).** *A multiple-camera system calibration toolbox using a feature descriptor-based calibration pattern. 3 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 1301 –1307. ISSN: 978-1-4673-6358-7. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696517.
- Li, Z.; Liu, X.; Wen, S.; He, P.; Zhong, K.; Wei, Q.; Shi, Y. und Liu, S. (2018).** *In situ 3D monitoring of geometric signatures in the powder-bed-fusion additive manufacturing process via vision sensing methods. Sensors*, Bd. 18, Nr. 4, S. 1180-1 –13. DOI: 10.3390/s18041180.
- Loderer, A. (2017).** *Holistische, fertigungsnahe, mehrskalige Messung blech-massivumgeformter Bauteile. Dissertationsschrift. Universität Erlangen-Nürnberg.*
- Lott, P.; Schleifenbaum, H.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Hinke, C. und Bültmann, J. (2011).** *Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM). Physics Procedia - Lasers in*

- Manufacturing Conference (LiM)*, Bd. 12, S. 683 –690. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.085.
- Lunze, J. (2012)**. *Automatisierungstechnik: Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme*. Bd. 3. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 149 –172. ISBN: 978-3-486-71266-7. DOI: 10.1524/9783486717037.
- Lunze, J. (2014)**. *Regelungstechnik 1- Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Bd. 10. Springer Verlag. ISBN: 978-3-642-53908-4. DOI: 10.1007/978-3-642-53909-1.
- Lunze, J. (2016)**. *Regelungstechnik 2- Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*. Bd. 9. Springer Verlag. ISBN: 978-3-662-52675-0. DOI: 10.1007/978-3-662-52676-7.
- Mani, M.; Lane, B. M.; Donmez, M. A.; Feng, S. C. und Moylan, S. P. (2016)**. *A review on measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes*. *International Journal of Production Research*, Bd. 55, Nr. 5, S. 1400 –1418. ISSN: 1366-588X. DOI: 10.1080/00207543.2016.1223378.
- Mireles, J.; Ridwan, S.; Morton, P. A.; Hinojos, A. und Wicker, R. B. (2015)**. *Analysis and correction of defects within parts fabricated using powder bed fusion technology*. *Surface Topography: Metrology and Properties*, Bd. 3, S. 034002-1 –8. DOI: 10.1088/2051-672X/3/3/034002.
- Moylan, S.; Slotwinski, J.; Cooke, A.; Jurens, K. und Donmez, M. A. (2012)**. *Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes*. *Proceedings of 23. International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)*, S. 902 –920.
- Nakamura, K.; Watanabe, T.; Katayama, K. und Amano, T. (1972)**. *Some aspects of nonisothermal crystallization of polymers. I. Relationship between crystallization temperature, crystallinity, and cooling conditions*. *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 16, Nr. 5, S. 1077 –1091. DOI: 10.1002/app.1972.070160503.
- Nasato, D. S.; Heinl, M.; Hausotte, T. und Pöschel, T. (2017)**. *Numerical and experimental study of the powder bed characteristics in the recoated bed of the additive manufacturing process*. *Proceedings of 5th International Conference on Particle-based Methods (Particles)*, S. 429 –439. ISSN: 978-84-946909-7-6.
- Neumann, B. (2005)**. *Bildverarbeitung für Einsteiger - Programmierbeispiele mit Mathcad*. Springer Verlag. ISBN: 3-540-21888-2.
- Optronis (2010)**. *CamRecord CL600x2 - High-speed camera*. Datenblatt.
- Otom (2020)**. *Oberflächenfühler mit integrierter Bohrung*. Datenblatt.
- Prewitt, J. M. (1970)**. *Object enhancement and extraction*. *Picture processing and Psychopictorics*, Bd. 10, Nr. 1, S. 75 –149. ISSN: 0124515509.
- Purtonen, T.; Kalliosaari, A. und Salminen, A. (2014)**. *Monitoring and*

- adaptive control of laser processes. Physics Procedia - 8th International Conference on Photonic Technologies (LANE)*, Bd. 56, S. 1218 –1231. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.038.
- Qsil (2013)**. *Materialspezifikation Quarzglas ilmasil® PN*. Datenblatt.
- Qsil (2014)**. *Spezifikation und Prüfkriterien für Quarzglasrohre – Geometrische Merkmale*. Datenblatt.
- Qsil (2020)**. *Quarzglas ilmasil® PN - Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität*. Datenblatt.
- Raghunath, N. und Pandey, P. M. (2007)**. *Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering. International journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 47, Nr. 6, S. 985 –995. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.07.001.
- Ranganathan, A. (2004)**. *The levenberg-marquardt algorithm. Tutorial on LM algorithm*, Bd. 11, Nr. 1, S. 101 –105.
- Raplee, J.; Plotkowski, A.; Kirka, M. M.; Dinwiddie, R.; Dehoff, R. R. und Babu, S. S. (2017)**. *Understanding the thermal sciences in the electron beam melting process through in-situ process monitoring. International Society for Optics and Photonics (SPIE) - Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure*, Bd. 10169, S. 101690O-1 –8. DOI: 10.1117/12.2263315.
- Raylase (2020)**. *Miniscan II- 2-Axis Deflection Units*. Datenblatt.
- Reinarz, B. (2013)**. *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Bauteilen in einer Strahlschmelzanlage. Patent EP 2 723 552 B1*.
- Roberts, L. G. (1965)**. *Machine perception of three-dimensional solids. Optical and electro-optical information processing*, S. 159 –197.
- Sachs, M.; Friedle, M.; Schmidt, J.; Peukert, W. und Wirth, K.-E. (2017)**. *Characterization of a downer reactor for particle rounding. Powder technology*, Bd. 316, S. 357 –366. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.006.
- Salmi, M.; Paloheimo, K.-S.; Tuomi, J.; Wolff, J. und Mäkitie, A. (2013)**. *Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, Bd. 41, Nr. 7, S. 603 –609. DOI: 10.1016/j.jcms.2012.11.041.
- Scheimpflug, T. (1904)**. *Improved method and apparatus for the systematic alteration or distortion of plane pictures and images by means of lenses and mirrors for photography and for other purposes. Patent N^o 1196*.
- Schewe, M.; Kohlmann, D.; Wulfmeier, H.; Fritze, H. und Rembe, C. (2020)**. *Methoden zur Minimierung des Rauscheinflusses durch Hitzeblimmern bei einem heterodynem Laser-Doppler-Vibrometer. tm-Technisches*

- Messen, Bd. 87, Nr. S1, S. 44 –49. DOI: 10.1515/teme-2020-0023.
- Schmid, M. (2015a).** *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen: Technologie, Prozesse und Werkstoffe*. 1. Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44562-8. DOI: 10.3139/9783446445505.
- Schmid, M. (2015b).** *Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS): Prozess- und Werkstoffüberblick*. Springer-Verlag. ISBN: 978-3-658-12288-1. DOI: 10.1007/978-3-658-12289-8.
- Schmidt, J.; Sachs, M.; Fanselow, S.; Zhao, M.; Romeis, S.; Drummer, D.; Wirth, K.-E. und Peukert, W. (2016).** *Optimized polybutylene terephthalate powders for selective laser beam melting*. *Chemical Engineering Science*, Bd. 156, S. 1 –10. DOI: 10.1016/j.ces.2016.09.009.
- Schmitt, R. und Damm, B. E. (2008).** *Prüfen und Messen im Takt - Wie Sie mit inline- Messtechnik Ihre Wertschöpfung maximieren. Qualität und Zuverlässigkeit (QZ)*, Bd. 53, Nr. 9, S. 57 –59. ISSN: 0033-5126.
- Schreer, O. (2005).** *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer-Verlag. ISBN: 3-540-23439-X.
- Seibert, J. A.; Boone, J. M. und Lindfors, K. K. (1998).** *Flat-field correction technique for digital detectors*. *Proceedings of the Conference on Physics and Medical Imaging (SPIE)*, Bd. 3336, S. 348 –354. DOI: 10.1117/12.317034.
- Senthilkumaran, K.; Pandey, P. M. und Rao, P. V. M. (2012).** *Statistical modeling and minimization of form error in SLS prototyping*. *Rapid Prototyping Journal*, Bd. 18, Nr. 1, S. 38 –48. DOI: 10.1108/13552541211193485.
- Shah, P.; Racasan, R. und Bills, P. (2016).** *Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography*. *Case Studies in Non-destructive Testing and Evaluation*, Bd. 6, S. 69 –78. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.05.008.
- Shen, J.; Steinberger, J.; Göpfert, J.; Gerner, R.; Daiber, F.; Manetsberger, K. und Ferstl, S. (2000).** *Inhomogeneous shrinkage of polymer materials in selective laser sintering*. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)*, S. 298 –305. DOI: 10.26153/tsw/3051.
- SIOS Meßtechnik GmbH (2018).** *Laserinterferometrischer Messtaster - Serie LM*. Datenblatt.
- Stemmer (2016).** *Genie NanoXL-M5100 - Area scan monochrome cameras*. Datenblatt.
- Szeliski, R. (2010).** *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer Verlag. ISBN: 978-1-84882-934-3. DOI: 10.1007/978-1-84882-935-0.
- Thyssenkrupp (2017).** *Werkstoffdatenblatt - Warmgewalzter unlegierter Baustahl*. Datenblatt.
- Töppel, T.; Müller, B.; Hoeren, K. P. J. und Witt, G. (2016).** *Eigenspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen*. *Schweißen und Schneiden*, Bd. 68, Nr. 4, S. 176 –186. ISSN: 0036-7184.
- Triantaphyllou, A.; Giusca, C. L.; Macaulay, G. D.; Roerig, F.; Hoebel,**

- M.; Leach, R. K.; Tomita, B. und Milne, K. A. (2015).** *Surface texture measurement for additive manufacturing. Surface Topography: Metrology and Properties*, Bd. 3, Nr. 2, S. 024002-1 –8. DOI: 10.1088/2051-672X/3/2/024002.
- VDI 2221-1:2018-03.** *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung (VDI 2221-1:2018).*
- VDI 3405:2014-12.** *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen (VDI 3405:2009).*
- VDI 3405-1:2019-01.** *Additive Fertigungsverfahren - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Güteüberwachung (VDI 3405-1:2019).*
- VIM (2012).** *Internationales Wörterbuch der Metrologie. Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM). ISO/IEC-Leitfaden 99:2007.* Bd. 4, Beuth Verlag. ISBN: 978-3-410-22472-3.
- Vlasea, M. L.; Lane, B.; Lopez, F.; Mekhontsev, S. und Donmez, A. (2015).** *Development of powder bed fusion additive manufacturing test bed for enhanced real-time process control. Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF),* S. 527 –539.
- Wang, R.-J.; Wang, L.; Zhao, L. und Liu, Z. (2007).** *Influence of process parameters on part shrinkage in SLS. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Bd. 33, Nr. 5 –6, S. 498 –504. DOI: 10.1007/s00170-006-0490-x.
- Wang, F.; Mao, H.; Zhang, D.; Zhao, X. und Shen, Y. (2008).** *Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis. Applied surface science,* Bd. 255, Nr. 5-2, S. 3267 –3275. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.09.039.
- Weckenmann, A.; Hartmann, W. und Weickmann, J. (2008).** *Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors. International Society for Optical Engineering (SPIE),* Bd. 7102, S. 71020N-1 –12. DOI: 10.1117/12.797600.
- Wegner, A. und Witt, G. (2012).** *Correlation of process parameters and part properties in laser sintering using response surface modeling. Physics Procedia 7th International Conference on Photonic Technologies (LANE),* Bd. 39, S. 480 –490. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.064.
- Wegner, A. und Witt, G. (2013).** *Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen. RTejournal-Forum für Rapid Technologie,* Bd. 1, S. 1 –28.
- Wegner, A. (2015).** *Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten. Dissertationsschrift. Universität Duisburg-Essen.*
- Wegner, A. (2016).** *Processing conditions and aging effects of a new polypropylene material for the laser sintering process. 6th International Conference*

- on *Additive Technologies (iCAT)*, S. 161 –168. ISSN: 978-961-285-537-6.
- Wirth, M. A. (2017).** *Additive Fertigung: Technologie, Markt und Innovation.* Dissertationsschrift. Universität Würzburg.
- Withers, P. J. und Bhadeshia, H. (2001).** *Residual stress. Part 2 – Nature and origins.* *Materials science and technology*, Bd. 17, Nr. 4, S. 366 –375. ISSN: 0267 – 0836. DOI: 10.1179/026708301101510087.
- Witt, G.; Wegner, A. und Sehr, J. T. (2015).** *Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung.* Springer Verlag. ISBN: 978-3-662-48472-2. DOI: 10.1007/978-3-662-48473-9.
- Wohlers, T.; Campbell, I.; Diegel, O.; Huff, R. und Joseph, K. (2019).** *Wohlers Report 2019 - 3D Printing and Additive Manufacturing - State of the Industry.* Wohlers Associates. ISBN: 978-0-9913332-5-7.
- Wudy, K. und Drummer, D. (2016).** *Aging behaviour of polyamide 12: Interrelation between bulk characteristics and part properties.* *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF) - An Additive Manufacturing Conference*, S. 770 –781.
- Wudy, K. (2017).** *Alterungsverhalten von Polyamid 12 beim selektiven Lasersintern.* Dissertationsschrift. Universität Erlangen-Nürnberg. ISBN: 978-3-931864-72-9.
- Xiao, Z.; Zou, Y. und Wang, Z. (2020).** *An improved dynamic double threshold Canny edge detection algorithm.* *Proceedings of 11th Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition (SPIE - MIPPR 2019)*, Bd. 11430, S. 1143016-1 –8. DOI: 10.1117/12.2539300.
- Yasa, E. und Kruth, J.-P. (2011).** *Application of laser re-melting on selective laser melting parts.* *Advances in Production Engineering and Management (APEM)*, Bd. 6, Nr. 4, S. 259 –270. ISSN: 1854-6250.
- Yeung, H.; Lane, B. M.; Donmez, M. und Moylan, S. (2020).** *In-situ calibration of laser/galvo scanning system using dimensional reference artefacts.* *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 69, Nr. 1, S. 441 –444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.03.016>.
- Zhang, Z. (2000).** *A flexible new technique for camera calibration.* *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Bd. 22, Nr. 11, S. 1330 –1334. DOI: 10.1109/34.888718.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- Heinl, M.; Galovskyi, B. und Hausotte, T. (2016a).** *Surface and dimensional measurements of additive manufactured workpieces. Proceedings of 6th International Conference on Additive Technologies (iCAT)*, S. 267 –273. ISSN: 978-961-285-537-6.
- Heinl, M.; Loderer, A. und Hausotte, T. (2016b).** *Vereinfachte Qualitätsbeurteilung in jeder Raumrichtung- Additive Manufacturing- Qualitätssicherung additiv gefertigter Bauteile anhand von Test-Artefakten. wt-Werkstattstechnik online*, Bd. WA119RH.11/12, S. 799 –803. ISSN: 1436-4980.
- Heinl, M.; Galovskyi, B.; Bayer, F.; Laumer, T. und Hausotte, T. (2017).** *Influence of laser power fluctuations on the quality of additive manufactured workpieces. Proceedings of Lasers in Manufacturing (LiM)*, Bd. 171, S. 1 –8.
- Heinl, M.; Schmitt, F. K. und Hausotte, T. (2018a).** *In-situ contour detection for additive manufactured workpieces. Procedia CIRP - 10. Konferenz Photonischer Technologien (LANE)*, Bd. 74, S. 664 –668. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.051.
- Heinl, M.; Laumer, T.; Bayer, F. und Hausotte, T. (2018b).** *Temperature-dependent optical material properties of polymer powders regarding in-situ measurement techniques in additive manufacturing. Polymer Testing*, Bd. 71, S. 378 –383. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.09.016.
- Heinl, M.; Greiner, S.; Wudy, K.; Pobel, C.; Rasch, M.; Huber, F.; Papke, T.; Merklein, M.; Schmidt, M.; Körner, C.; Drummer, D. und Hausotte, T. (2020b).** *Measuring procedures for surface evaluation of additively manufactured powder bed based polymer and metal parts. Measurement Science and Technology (MST)*, Bd. 31, Nr. 9-095292, S. 1 –14. DOI: 10.1088/1361-6501/ab89e2.
- Lerchen, M.; Hornung, J.; Zou, Y. und Hausotte, T. (2021a).** *Methods and procedure of referenced in situ control of lateral contour displacements in additive manufacturing. Journal of Sensors and Sensor Systems (JSSS)*, Bd. 10, S. 219 –232. DOI: 10.5194/jsss-10-219-2021.
- Lerchen, M.; Schinn, J. und Hausotte, T. (2021b).** *Referencing of powder bed for in situ detection of lateral layer displacements in additive manufacturing. Journal of Sensors and Sensor Systems (JSSS)*, Bd. 10, S. 247 –259. DOI: 10.5194/jsss-10-247-2021.
- Nasato, D. S.; Heinl, M.; Hausotte, T. und Pöschel, T. (2017).** *Numerical and experimental study of the powder bed characteristics in the recoated bed of the additive manufacturing process. Proceedings of 5th International Conference on Particle-based Methods (Particles)*, S. 429 –439. ISSN: 978-84-946909-7-6.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- Bayer, F. (2016).** *Entwickeln einer Methodik zur Analyse des Einflusses der Laserleistung auf die Fertigungsgenauigkeit bei der additiven Fertigung von Kunststoffen.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Bayer, F. (2017).** *Analyse des reflektierten und emittierten Wellenlängenspektrums bei der optischen Inline-Inspektion in der additiven Fertigung.* Masterarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Biaciu, C.-R. (2018).** *In-situ Analyse lateraler Konturverlagerungen in der additiven Fertigung.* Masterarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Delov, K. (2016).** *Entwicklung und Konstruktion eines Demonstrators für einen Messaufbau einer Anlage für das selektive Laserstrahlschmelzen.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Eck, W. (2016).** *Softwareentwicklung zur Gestaltanalyse der Sinterkontur während des selektiven Lasersinterns.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Hornung, J. (2020).** *Untersuchung von regelkreisbasierten in situ Korrekturansätzen zur Reduzierung lateraler Konturverlagerungen in der additiven Fertigung.* Masterarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Köhnen, S. (2016).** *Entwicklung und Untersuchung einer dynamischen, photogrammetrischen Koordinatenmessung des Bearbeitungsflecks beim selektiven Laserstrahlschmelzen.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Lu, Y. (2019).** *In-Prozess-Überwachung geometrischer Abweichungen der aufgeschmolzenen Bauteilkontur in der additiven Fertigung.* Masterarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Schmitt, F. K. (2017).** *Kantenerfassung der Sinterkontur beim selektiven Lasersintern.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Schulte-Wieking, P. (2017).** *Entwicklung und Konstruktion eines Demonstrators für einen Messaufbau einer Anlage für das selektive Laserstrahlschmelzen.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Wang, S. (2018).** *Optische in-situ Analyse lateraler und vertikaler Geometrieabweichungen in der additiven Fertigung.* Projektarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Weber, S. (2017).** *Analyse und Optimierung von Schichtfehlern bei der additiven Fertigung.* Bachelorarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Zou, Y. (2019).** *Erweiterte in-situ Analyse pulverauftragsbedingter, lateraler Konturverlagerungen in der additiven Fertigung.* Masterarbeit. Universität Erlangen-Nürnberg.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozeßkette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur
impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile – Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth
Regelung der Fokusslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissenschaftliche Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozessebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und der mechanischen
Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßler
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendandck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Lötten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahliefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüssler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozess-
simulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-
technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für
den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahr-
zeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösler
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebau-
teile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahliefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LFT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für
diskret ereignisorientierte Simulationen
in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großorientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeuoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder.
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels
Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported Hybrid Compensation System for
Improving the Power Quality in Medium
Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger
Additive Fertigung polymerer optischer
Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der
virtuellen Realität mit natürlicher
Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer
Oberflächenmodifizierung und Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker
Qualifizierung laser-additiv gefertigter
Komponenten für den Einsatz im Werk-
zeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied
Totally Integrated Ecology Management
for Resource Efficient and Eco-Friendly
Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine
Analysestrategie zur Bestimmung des
Reibungs-, Axialschub- und Temperatur-
verhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.
2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann
Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechanische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel
Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band: 377: Martin Lerchen
Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Abstract

Due to insufficient standards for in-process manufacturing and quality control, decisive prerequisites are still missing in additive manufacturing that are necessary for industrial series production. In addition to numerous efforts of various standardisation committees to standardise the additive manufacturing process gradually, the present work also deals with basic scientific methods for referenced in-process monitoring as well as derived approaches for the analysis of geometric manufacturing and measurement deviations. The aim is to contribute to a consistent procedure for process monitoring to ensure the conformity of geometric product specifications in additive manufacturing. In order to correct the detected geometric deviations during the process with appropriate control strategies, an exact allocation is necessary to be able to assign the measurement data precisely at any time of the manufacturing process in addition to a sufficient controllability. For a better assessment of the required comprehensive observability of the measured variables, a novel referencing concept for the position determination of the melt pool contours is provided, based on a powder bed based selective laser beam melting process. The acquisition of four referencing pipes, integrated in the powder bed, cause a shortening of the measuring circuit and increase the accuracy of the measurement data acquisition. This allows a better allocation of the causes of manufacturing and measurement deviations. Based on the referenced contour analysis of the melt pool and the detection of the shining heat radiation of the component contours after powder application, a metrological verification of lateral contour displacements is provided.

In der additiven Fertigung fehlen aufgrund unzureichender Standards zur prozessbegleitenden Fertigungs- und Qualitätskontrolle derzeit entscheidende Voraussetzungen, die für eine industrielle Serienproduktion erforderlich sind. Neben zahlreichen Bemühungen verschiedener Normungsgremien den additiven Fertigungsprozess schrittweise zu standardisieren, beschäftigt sich auch die vorliegende Arbeit mit grundlagenwissenschaftlichen Methoden zur referenzierten in-Prozess Überwachung sowie daraus abgeleiteten Ansätzen zur Analyse geometrischer Fertigungs- und Messabweichungen. Dadurch soll ein Beitrag für ein einheitliches Vorgehen bei der Prozessüberwachung zur Sicherstellung der Konformität geometrischer Produktspezifikationen in der additiven Fertigung geleistet werden. Um die erfassten geometrischen Abweichungen prozessbegleitend mit entsprechenden Regelstrategien zu korrigieren, bedarf es neben einer ausreichenden Steuerbarkeit der Fertigungsanlage einer exakten Zuordenbarkeit der Messdaten zu jedem Zeitpunkt des Fertigungsprozesses. Um diese geforderte Beobachtbarkeit der Messgrößen besser beurteilen zu können, wird ein neuartiges Referenzierungskonzept zur exakten Lagebestimmung der Schmelzbadkonturen am Beispiel eines pulverbettbasierten selektiven Laserstrahlschmelzprozesses bereitgestellt. Durch die Erfassung von vier im Pulverbett integrierten Referenzierungsrohren kann mit einer Verkürzung des Messkreises die Genauigkeit der Messdatenerfassung erhöht werden. Dadurch ist eine bessere Zuordenbarkeit der Entstehungsursachen von Fertigungs- und Messabweichungen möglich. Basierend auf der referenzierten Konturanalyse des Schmelzbad und der Erfassung der durchschimmernden Wärmestrahlung der Bauteilkonturen nach dem Pulverauftrag, werden messtechnische Nachweise lateraler Konturverlagerungen erbracht.

