

FAU Studien aus dem Maschinenbau 382

**Tobias Kolb**

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen  
 mit einer Serienanlage  
 – Prozesscharakterisierung und  
 Erweiterung eines  
 Überwachungssystems



Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage  
– Prozesscharakterisierung und Erweiterung  
eines Überwachungssystems

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 382**

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

Tobias Kolb

**Laserstrahl-Schmelzen von Metallen  
mit einer Serienanlage  
– Prozesscharakterisierung und  
Erweiterung eines Überwachungssystems**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für  
Photonische Technologien (LPT)  
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

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

Kolb, Tobias. 2021. *Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 382. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-492-9

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: 978-3-96147-491-2 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-492-9 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-492-9

**Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer  
Serienanlage - Prozesscharakterisierung und Erweiterung  
eines Überwachungssystems**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Tobias Kolb, M.Sc.

aus Nürnberg

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 14.10.2021

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Photonische Technologien (LPT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich für das weitreichende Vertrauen, die offenen und stets fruchtbaren Gespräche, welche meine Dissertation begleitet und vorangetrieben haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier und Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauss danke ich für die Mitarbeit im Prüfungsausschuss und Herrn Prof. Dr.-Ing. Tino Hausotte für dessen Leitung.

Die Dissertation fundierte auf einer Kooperation mit der Robert Bosch GmbH am Standort Nürnberg, an dem ich das 3D-Printing Manufacturing and Processing Center (3DP-MPC) aufbauen durfte. Hier möchte ich mich zuerst und besonders bei Herrn Dr.-Ing. Jan Tremel bedanken, der all das durch seine überaus engagierte Vorarbeit ermöglichte und durch kreative Impulse, fachliche und persönliche Unterstützung begleitet hat. Dem gesamten und wachsendem Team des 3DP-MPCs, des Kompetenzzentrums 3D-Druck und allen KollegInnen der Robert Bosch GmbH die mich während dieser Zeit fachlich und tatkräftig unterstützten danke ich in besonderem Maße. Besonderer Dank gilt ebenfalls Aleksander Federov, Oliver Hentschel, Christian Scheitler, Michael Rasch und Florian Huber aus der Gruppe für Additive Fertigung am LPT für deren Hilfsbereitschaft, Diskussionsfreude und die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Allen beteiligten StudentInnen möchte ich für die offenen Gespräche, Fragen und die Freude bei der Zusammenarbeit danken. Danken möchte ich auch den freiwillig mitwirkenden Studenten des SDL-One-Studentenprojekts und den High-Octanes-StudentInnen. Außerdem bedanke ich mich bei allen MitarbeiterInnen des LPT und des Bayerischen Laserzentrums GmbH für die Diskussionen, die Hilfsbereitschaft und die Unterstützung. Vielen Dank auch an die engagierten MitarbeiterInnen, besonders Herrn Emmert, der FAU-University-Press für die Unterstützung bei der Formatierung. Der Graduiertenschule School of Advanced Optical Technologies (SAOT) möchte ich für die Unterstützung, die ermöglichten Fortbildungen, Academies und Summer-Schools mit der Princeton University danken.

Meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für die ununterbrochene, geduldige und liebevolle Unterstützung danken.



# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis . . . . .	ix
Bildverzeichnis . . . . .	xi
Tabellenverzeichnis . . . . .	xv
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und Forschung . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Prozessfehler . . . . .	3
2.1.1 Porosität . . . . .	3
2.1.2 Oberflächenrauheit . . . . .	4
2.1.3 Gestaltabweichungen . . . . .	7
2.2 Charakterisierung der Anlagenoptik . . . . .	8
2.3 Einkopplung und Wärmestrahlung . . . . .	8
2.4 Prozessüberwachung für das Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	12
2.4.1 Allgemeine Anlagen-Sensorik . . . . .	14
2.4.2 Kamera-basierte laterale Pulverbett-Überwachung . . . . .	15
2.4.3 Grundlagenexperimente . . . . .	16
2.4.4 Koaxiale Schmelzbad-Überwachung . . . . .	17
2.5 Defizite der Prozessüberwachung . . . . .	23
<b>3 Werkstoffe, Anlagentechnik, experimentelle Methoden und Algorithmen . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1 Werkstoffe . . . . .	25
3.1.1 Werkstoffauswahl . . . . .	26
3.1.2 Charakterisierung metallischer Pulverwerkstoffe . . . . .	27
3.2 Charakterisierung der Anlagenoptik . . . . .	29
3.2.1 Strahlkaustik . . . . .	30
3.2.2 Laserleistungsmessung . . . . .	30
3.2.3 Prozess-Parameter für das Prozess-Toleranzband . . . . .	31
3.2.4 Feldentzerrung des Galvanometer-Scanners . . . . .	32
3.3 Produktionsfehleranalyse mittels lateraler Prozessüberwachung . . . . .	33
3.3.1 Laterale Prozessüberwachung: Systembeschreibung . . . . .	34
3.3.2 Manuelle Klassifizierung von Fehlerbildern . . . . .	36
3.3.3 Automatische Klassifizierung von Schichtbildern . . . . .	36
3.3.4 Fehleranalyse unterschiedlicher Baujobs . . . . .	40
3.3.5 Fehleranalyse eines Serienbauteils . . . . .	40

3.4	Beschreibung des koaxialen Überwachungssystems . . . . .	40
3.4.1	Systemtechnik . . . . .	40
3.4.2	Abbildungsverhältnis . . . . .	44
3.4.3	Datenstruktur . . . . .	47
3.5	Einzelspur-Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung . . . . .	49
3.5.1	Experimenteller Umfang . . . . .	50
3.5.2	Auswertungs-Algorithmen . . . . .	55
3.6	Volumenkörper-Untersuchungen mittels koaxialer Prozessüberwachung . . . . .	58
3.7	Anwendungs-Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung . . . . .	60
3.7.1	Statistische Prozesskontrolle durch Schichtmittelwerte . . . . .	60
3.7.2	Untersuchungen zu Kanalbauteilen . . . . .	61
3.7.3	Spritzer-Signaturen . . . . .	62
3.7.4	Detektion und Laserpolieren von Oberflächen- Rauheit . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Ergebnisse . . . . .</b>	<b>65</b>
4.1	Fehleranalyse und laterale Prozessüberwachung . . . . .	65
4.1.1	Porosität und Härte . . . . .	65
4.1.2	Oberflächenrauheit . . . . .	66
4.1.3	Scannersystem . . . . .	68
4.1.4	Software-Fehler . . . . .	69
4.1.5	Fehlerbild-Klassifizierung mittels Neuronaler Netze	69
4.1.6	Zusammenfassung zur Fehleranalyse . . . . .	70
4.2	Signalverständnis der koaxialen Prozess-Überwachung . .	71
4.2.1	Einzelspur-Untersuchungen . . . . .	71
4.2.2	Umgebungsvariation der Interaktionszone . . . . .	78
4.2.3	Aufbau dünner Wände . . . . .	81
4.2.4	Unterscheidbarkeit aufgenommener Kamerabilder	82
4.2.5	Zusammenfassung zur Signalanalyse . . . . .	83
4.3	Prozess-Parameter-Variationen an Volumenkörpern . . . . .	85
4.3.1	Ergebnisse aus Schichtbild-Daten . . . . .	85
4.3.2	Schmelzbad-Überwachung und Defekt-Generation	88
4.3.3	Einfluss der Partikelgrößenverteilung . . . . .	92
4.3.4	Erkenntnisse der Untersuchungen an Volumenkörpern	94
4.4	Fehler-Klassifizierung aus der manuellen Bildstapel-Analyse	95

4.5	Ergebnisse zur Nutzbarmachung . . . . .	101
4.5.1	Statistische Prozesskontrolle . . . . .	101
4.5.2	Signaturtiefe bei der Analyse von Kanaltestkörpern . . . . .	102
4.5.3	Spritzer-Signaturen . . . . .	106
4.5.4	Topographie-Evaluierung und Laserpolieren . . . . .	110
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>Summary . . . . .</b>	<b>119</b>
<b>7</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>123</b>
7.1	Arbeitssicherheit . . . . .	123
7.2	Grundlagen . . . . .	124
7.2.1	Gaußsches Strahlprofil . . . . .	124
7.2.2	Numerische Simulation . . . . .	124
7.2.3	Einflussfaktoren beim Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	126
7.2.4	Koaxiale Detektion: Grenzflächen und Einflüsse . . . . .	130
7.3	Messmittel und Geräte . . . . .	130
7.3.1	Pulvercharakterisierung . . . . .	130
7.3.2	Laserleistungs-Messgerät . . . . .	130
7.3.3	Laserspot-Monitor . . . . .	131
7.3.4	Handgerät zur Feuchtigkeitsmessung . . . . .	132
7.3.5	Schmelzbad-Überwachung: CMOS-Kamera . . . . .	132
7.4	Parameter . . . . .	133
7.4.1	Signalverhalten beim Aufbau dünner Wände . . . . .	133
7.4.2	Fraktionierte AlSi10Mg Pulver . . . . .	133
7.4.3	Umgebungsvariation der Interaktionszone . . . . .	134
7.4.4	Parameterfenster der Volumenkörper . . . . .	134
7.4.5	Überhang-Optimierung . . . . .	135
7.4.6	Zerspante raue Oberflächen . . . . .	135
7.4.7	Vorversuche der Oberflächen-Evaluierung . . . . .	136
7.4.8	Volumenkörper und Spritzer Detektion . . . . .	136
7.5	Zusatzmaterial . . . . .	137
7.5.1	Testteil-Geometrien . . . . .	137
7.5.2	Bauplatzform mit Kanalbauteilen . . . . .	137
7.5.3	Koaxial sichtbare Spritzerentstehung . . . . .	138
7.5.4	Daten-Analyse-Protokoll . . . . .	138
7.6	Ergebnisse . . . . .	139
7.6.1	Pulvercharakterisierung . . . . .	139
7.6.2	Schlüsselwortsuche zur Prozessüberwachung . . . . .	140
7.6.3	Beobachtungen zur Oberflächenrauheit . . . . .	140

7.6.4	Positionsabhängige Laserleistungsmessung . . . . .	141
7.6.5	Einzelspurversuche mit AlSi10Mg . . . . .	141
7.6.6	Einzelspuren auf 1.4404 Testkörpern . . . . .	142
7.6.7	EDX-Vergleich von 1.4404 Oberflächen . . . . .	142
7.6.8	Einzelspurversuche mit dem Edelstahl 1.4057 . . . . .	142
7.6.9	Einfluss der Pulverwerkstoffe . . . . .	143
7.6.10	Härtemessung beim Werkzeugstahl 1.2709 . . . . .	144
7.6.11	Positionsabhängige Dichte beim Werkzeugstahl 1.2709	144
7.6.12	EDX-Messung an Fehlstellen . . . . .	145
7.6.13	Spritzer-Signaturen . . . . .	145
7.7	Auszug geförderter Projekte zur Prozessüberwachung . . . . .	146
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>147</b>

## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
$\epsilon$ .....	- .....	Emissivität
$\lambda$ .....	nm.....	Wellenlänge
$\rho$ .....	g cm <sup>-3</sup> .....	Dichte
$A_B$ .....	%.....	Bruchdehnung
$A_P$ .....	µm.....	Projizierte Partikelfläche
$c_p$ .....	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> .....	Spezifische Wärmekapazität
$d_h$ .....	µm.....	Spurabstand
$E_A$ .....	J/mm <sup>2</sup> .....	Flächenenergiedichte
$E_V$ .....	J/mm <sup>3</sup> .....	Volumenenergiedichte
<i>exp</i> .....	- .....	Exponentialfunktion
$\gamma$ .....	mN/m .....	Oberflächenspannung
$h$ .....	Js .....	Plancksche Strahlungskonstante
$k$ .....	J/K.....	Boltzmann Konstante
$\kappa$ .....	W/mK .....	Thermische Leitfähigkeit
$L_{\lambda,S}$ .....	W/(m <sup>2</sup> µm) .....	Spektrale Strahldichte
$\lambda_c$ .....	µm.....	Grenzwellenlänge
$M^2$ .....	- .....	Beugungsmaßzahl
$\nabla$ .....	mPas.....	Viskosität
$P$ .....	Watt .....	Laserleistung
$R_a$ .....	µm.....	Arithmetischer Mittenrauwert
$R_e$ .....	N/mm <sup>2</sup> .....	Streckgrenze
$R_m$ .....	N/mm <sup>2</sup> .....	Zugfestigkeit
$R_{p0.2}$ .....	N/mm <sup>2</sup> .....	0.2 % - Dehngrenze
$\rho$ .....	g/cm <sup>3</sup> .....	Absolute Dichte
$\rho_{rel}$ .....	% .....	Relative Dichte
$s$ .....	µm.....	Laserspot Durchmesser
$s_{eff}$ .....	µm .....	Effektive Pulverbett-Schüttdichte
$S_a$ .....	µm .....	Mittlere arithmetische Höhe
$T$ .....	K .....	Temperatur

*Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis*

<b><i>Symbol</i></b>	<b><i>Einheit</i></b>	<b><i>Beschreibung</i></b>
$t_{\text{dwell}}$ ....	s.....	Bestrahlungszeit
$v$ .....	mm/s.....	Scan-Geschwindigkeit

# Bildverzeichnis

1	Schliffbilder zum Prozessfehler Porosität . . . . .	4
2	Schema zur Oberflächenrauheit beim Laserstrahl-Schmelzen	4
3	Ursachen der Oberflächenrauheit . . . . .	5
4	Spritzerbildung Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	6
5	Laser-Material-Wechselwirkungszone . . . . .	9
6	Phänomene beim Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	10
7	Übersicht PÜ Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	13
8	Beispielbauten für koaxiale Sensorik . . . . .	18
9	Visualisierung koaxialer Detektionsmethoden . . . . .	19
10	Koaxiale Beobachtung des Laser-Überlappschweißens . . . . .	20
11	Visualisierung eines Scanpfades zu einem Überhang . . . . .	22
12	Struktogramm des Methodenkapitels . . . . .	25
13	Materialeigenschaften . . . . .	26
14	Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	30
15	Zugversuch zu Laserstrahl-Toleranzband . . . . .	31
16	Vermessung der Feldentzerrung . . . . .	32
17	Ergebnisse Scanner-Skalierung . . . . .	33
18	Aufbau laterale Prozessüberwachung QM-Coating . . . . .	34
19	Inhomogene Beleuchtung der lateralen PÜ . . . . .	35
20	Fehlerbilder 1 der lateralen PÜ . . . . .	36
21	Fehlerbilder 2 der lateralen PÜ . . . . .	37
22	Algorithmus zur lateralen PÜ . . . . .	38
23	CNN-Algorithmus zur lateralen PÜ . . . . .	39
24	Testbauteil 170 mm . . . . .	41
25	QM-Meltpool3D . . . . .	41
26	Signalverarbeitung QM-Meltpool3D . . . . .	42
27	Bewegungsunschärfe und Gasfackel . . . . .	43
28	Spektrale spezifische Ausstrahlung des Schmelzbades . . . . .	44
29	Positionsabhängiger Schmelzbad-Signalunterschied . . . . .	44
30	Abbildungsverhältnis der koaxialen Kamera . . . . .	46
31	Fehlende Kopplung zwischen Laser- und Kamerafokus . . . . .	46
32	FPGA-Bildauswertung und Datenstruktur . . . . .	48
33	Auswertungsmöglichkeiten der zeitlichen Dimension . . . . .	49
34	Schmelzbad-Kamera-Aufnahmefrequenz . . . . .	50
35	Schwellwertvergleich zur Schmelzbad-Überwachung . . . . .	51
36	Testbauteil zur Variation von Einzelspur-Randbedingungen	54
37	Grundlagenversuch zur Rauheitsdetektion . . . . .	55
38	Genauigkeits-Bestimmung FCN . . . . .	57
39	Siebung und Mischung von drei Pulverfraktionen . . . . .	59

40	Testkörperdesign-Vergleich . . . . .	62
41	Rauheits-Evaluierung mittels Schmelzbad-Überwachung .	64
42	Struktogramm des Ergebnisteils . . . . .	65
43	Poren aus Langzeitstudie des Edelstahl 1.4404 . . . . .	66
44	Dichte und Härte der Langzeitstudie des Edelstahl 1.4404	67
45	Oberflächenvergleich Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	68
46	Vergleich zur Porenposition . . . . .	68
47	Beispielbilder zur Oberflächenrauheit . . . . .	69
48	Softwarefehler beim Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	70
49	Fehlerklassifizierung lateraler Schichtbilder . . . . .	70
50	Beschichterstreifen-Konfokal-Mikroskopie . . . . .	71
51	Schliffbilder zur Leistungsvariation von Einzelspuren . . .	72
52	Einzelspurversuch zur Laserleistungsvariation: Kamera- und Photodiodensignal mit Schliffbildauswertung . . . . .	72
53	Schmelzbad-Signal unter Geschwindigkeitsvariation . . . .	73
54	Einzelspurversuche mit Laserspot-Durchmesser-Variation	74
55	Mehrfachspur-Experiment . . . . .	74
56	Positionsabhängigkeit des Kamera-Schmelzbad-Signals bei konzentrischen Kreisen unter dem Scanner . . . . .	75
57	Nutenplatte mit Einzelspuren . . . . .	76
58	Treppenexperiment zum Schichthöheneinfluss . . . . .	77
59	Alu-Erstschicht-Varianz . . . . .	77
60	Einzelspurversuche AlSi10Mg . . . . .	77
61	Schmelzbadsignal und Querschnittsfläche . . . . .	78
62	Schmelzbad-Signal Kantenbelichtung . . . . .	78
63	Bauteilhöheneinfluss auf das Schmelzbad-Signal . . . . .	79
64	Einfluss des Sauerstoff-Gehalts auf das Schmelzbad-Signal	80
65	Rauheitseinfluss auf das Kamerasignal . . . . .	80
66	Wandversuche mit 1.4404: Leistungsreihe . . . . .	81
67	Hauptkomponentenanalyse 1 . . . . .	83
68	Hauptkomponentenanalyse 2 . . . . .	84
69	Manuelle Schichtbild-Auswertung . . . . .	86
70	Helligkeits-Histogramm-Analyse . . . . .	86
71	Signalvergleich von 4 Testkörpern . . . . .	87
72	Schichtbild-Mittelwertanalyse . . . . .	87
73	Das Photodioden-Signal steigt wie erwartet linear mit der Laser-Leistung, das Kamerasignal wird durch die hohe Wel- ligkeit der Insel-Strategie beeinflusst . . . . .	88
74	Die Übersicht der Histogramm-Mittelwerte der Photodiode oder Kamera aller getesteten Parameter zeigt keine Korrelation zur relativen Dichte (blau). . . . .	89
75	Schichtbild Vergleich des Edelstahl 1.4057 . . . . .	89

76	Schichtbildtextur optimierter Parameter 1.4057 . . . . .	90
77	Schmelzbad-Signal und Defekte . . . . .	91
78	Porosität mit Spritzern und Prozessgasströmung . . . . .	91
79	Porosität und KSBÜ-Varianz . . . . .	92
80	Schmelzbad-Signal und PGV-Variation . . . . .	93
81	Varianz durch Stützstruktur und Beschichterstreifen . . . . .	95
82	Slicing-Fehler bei der Schmelzbad-Überwachung . . . . .	96
83	KSBÜ zur Parameteroptimierung bei Belichtungsfehlern . . . . .	97
84	Fehlendes Pulver . . . . .	97
85	Spritzer-Signaturen in Schmelzbad-Schichtbildern . . . . .	97
86	Beschichter-Schnalzen . . . . .	98
87	Schmelzbad-Signal einsackender Überhänge . . . . .	99
88	Verzug, erhöhte Kanten und Photodioden-Fleck . . . . .	99
89	Anfangsschicht-Helligkeit . . . . .	100
90	Effektive Schichthöhe . . . . .	100
91	Software-Fehler: Belichtungszeit . . . . .	101
92	Beispiel zur statistischen Prozessanalyse . . . . .	102
93	Statistische Prozessanalyse: Toleranzbandbeispiel . . . . .	103
94	Signaturtiefe bei stützstrukturfreien Überhängen . . . . .	104
95	Signaturtiefe bei Überhangparameterstest . . . . .	105
96	Vergleich von Schmelzbad-Überwachung, CT und Schliffbild . . . . .	105
97	Signaturtiefe und Einsacken . . . . .	106
98	Prozessgasabhängigkeit der Dichte zum 1.4404 . . . . .	107
99	Mittelwert-Analyse des Würfel-Experiments . . . . .	108
100	Vergleich von Spritzer-Detektion und gemessener Dichte . . . . .	109
101	Spritzer-Simulation: koaxiales Schichtbild . . . . .	109
102	Spritzer-Simulation: Schliffbilder . . . . .	110
103	Koaxiale Beobachtung des Verkippens des Schmelzbades . . . . .	111
104	Rauheits-Evaluierung mittels Schmelzbad-Überwachung . . . . .	111
105	Parameterauswahl Rauheits-Detektion . . . . .	112
106	Auswertung Bauteil-Serie . . . . .	112
107	Ergebnisse zum Laserpolieren . . . . .	113
108	Arbeitssicherheits-Symbole Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	123
109	Koaxiale Detektion: Grenzflächen und Einflüssen . . . . .	130
110	Leistungsmessgerät . . . . .	130
111	Hytelog Feuchtigkeits-Messgerät . . . . .	132
112	Kanaltestkörper in verschiedenen Orientierungen . . . . .	137
113	Schmelzbad-Kamera-Rohbilder zur Spritzerentstehung . . . . .	138
114	Protokoll Interface . . . . .	138
115	Ergebnisse der Pulveranalyse . . . . .	139
116	Scopus-Schlüsselwort-Suche zur PÜ . . . . .	140
117	Beispielbilder zur Oberflächenrauheit . . . . .	140

118	Beispielbilder zur Oberflächenrauheit . . . . .	141
119	Ergebnisse der positionsabhängigen Laserleistungsmessung	141
120	Ergebnisse zu Einzelspuren: AlSi10Mg . . . . .	141
121	Ergebnisse zu Einzelspuren auf Testkörper . . . . .	142
122	EDX-Vergleich von 1.4404 Oberflächen . . . . .	142
123	Ergebnisse zu Einzelspuren: 1.4057 . . . . .	142
124	REM-Aufnahmen präparierter Pulverfraktionen . . . . .	143
125	AlSi10Mg Partikelfraktionen und Proben-Dichte . . . . .	143
126	Dichte und Prozessgasvariation des 1.2709 . . . . .	144
127	Fehlstellen 1.2709 . . . . .	145
128	Spritzer-Signaturen neben Bauteilen . . . . .	145

# Tabellenverzeichnis

1	Mittels He-Pyknometrie gemessene Pulverwerkstoff-Dichte	28
2	Komponenten der lateralen Kamera-PÜ . . . . .	35
3	Feinstaub-Messungen Prozesskette Laserstrahl-Schmelzen	124
4	Einflussfaktoren beim Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	129
5	Übersicht zur Pulvercharakterisierung . . . . .	131
6	Eigenschaften des Laserspot Monitors . . . . .	131
7	CMOS Kamera . . . . .	133
8	Wand-Parameterstudien verschiedener Materialien . . . . .	133
9	Parameter zur Pulverfraktionierung . . . . .	134
10	Verwendete Parameter des Stufenexperiments . . . . .	134
11	Parameter-Fenster der Untersuchungen zu Volumenkörpern	135
12	Verwendete Parameter zur Überhang-Optimierung . . . . .	135
13	Versuche Oberflächenrauheit mit zerspanter Substratplatte	136
14	Parameter Vorversuche Oberflächenrauheit . . . . .	136
15	Parameter für den Versuch zum Positionseinfluss . . . . .	136
16	Härtemessung 1.2709 . . . . .	144
17	Beispiele öffentlich geförderter Projekte zur PÜ beim LSS .	146



# 1 Einleitung

Die Nachfrage nach individualisierten Produkten und beschleunigten Produktentwicklungsprozessen begünstigen die Industrialisierung der materialeffizienten, laserbasierten additiven Fertigung [1]. Dadurch können Prototypen schnell und kosteneffizient gefertigt werden, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit verbessert wird [2]. Im Formen- und Werkzeugbau erhöhen konturnahe Kühlungen die später mögliche Ausbringrate und die Standzeit von Werkzeugen [3].

Aktuell bestehen zahlreiche Handlungsfelder [4] für die Technologie Laserstrahl-Schmelzen von Metallen im Pulverbett (LSS-M). Diese betreffen die unzureichenden Ausbildungsmöglichkeiten von Fachkräften [5], die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität [6], fehlende sowie unzureichend vermittelte Konstruktions-Richtlinien [7], eine wissenschaftlich fundierte Applikationsforschung [8] und strenge Rahmenbedingungen für die Arbeitssicherheit [P1], sowie juristische Fragestellungen [4].

Trotz intensiver Forschung in der Simulation laserbasierter additiver Prozesse ist das Verständnis der physikalischen Wechselwirkungsprozesse noch nicht ausreichend erarbeitet, weshalb Echtzeit-Überwachungssysteme erforderlich sind, um neue Erkenntnisse zu generieren [9]. Um die Interaktionszone von Laserstrahl und Pulver zu überwachen werden seit 2016 koaxiale Aufbauten vertrieben. Diese ermöglichen eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung des gesamten Herstellungsprozesses und ermöglichen dadurch theoretisch einen Bauteil-Datensatz vergleichbar mit einer ex-situ Computer-Tomographie. Koaxiale Schmelzbad-Überwachungs-(KSBÜ-) Systeme sind noch unzureichend untersucht und in Forschungseinrichtungen unterrepräsentiert. Diese Arbeit befasst sich daher mit der Prozessüberwachung beim LSS-M und hat die Ziele das Prozessverständnis und das Signalverständnis einer KSBÜ zu erweitern und daraus Anwendungsmöglichkeiten für die Prozessüberwachung, sowie einen Ausblick auf einen geregelten Prozess abzuleiten.

Im Rahmen dieser Arbeit entstanden Veröffentlichungen, die Ergebnisse zur Erweiterung der Materialpalette durch Selten-Erd-Magnet-Werkstoffe [P2], zur Verformbarkeit von additiv erzeugten Testkörpern [P6], zur Sicherheit beim Betrieb von additiven Fertigungsanlagen [P1], sowie zur Charakterisierung [P7] und den Anwendungsmöglichkeiten der koaxialen Schmelzbad-Überwachung liefern [P5, P3, P4].



## 2 Stand der Technik und Forschung

Zu Beginn zeigt eine Darstellung von Prozessfehlern und zugehörigen Ursachen den Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit. Als Basis für den experimentellen Teil werden die Grundlagen zur Anlagentoptik und der Wärmeleitungsprozesse des Verfahrens in zwei Abschnitten betrachtet. Die zweite Hälfte des Kapitels widmet sich der Prozessüberwachung beim LSS-M, bekannten koaxialen Methoden bei laserbasierten Verfahren und den aus der Literatur abgeleiteten Defiziten.

### 2.1 Prozessfehler

Das LSS erzeugt aufgrund von technologischen Mängeln, Bedienfehlern oder Materialschwankungen Fehler die hier zur Übersicht dargestellt und deren Ursachen diskutiert werden.

#### 2.1.1 Porosität

Porosität beschreibt die durch Lunker, Poren oder Einschlüsse fehlende Materie in einem Vollmaterial und wird beim LSS allgemein zu maximal 0.5 % oder weniger akzeptiert [10]. Ursachen für Porosität sind Parameter-Einstellungen die einen zu hohen Energieeintrag und folglich das Tiefschweißen verursachen, bei dem wie in [11] gezeigt Gasporien entstehen. Dieses Fehlerbild tritt bei mangelhaft ausgelegten Scanstrategien an Wendepunkten auf [12]. Porosität aufgrund eines zu geringem Energieeintrags wird in der Literatur als *lack-of-fusion*-Porosität bezeichnet [13]. Ursache sind sowohl die Parameterwahl, wie beispielsweise zu großer Spurabstand, oder über 150 µm große teils oxidierte Spritzer im Pulverbett die nicht aufgeschmolzen werden [14]. Außerdem werden durch Beschichtungsfehler Lücken im Pulverbett erzeugt, die in folgenden Schichten zu höheren Schichtstärken führen und aufgrund des unregelmäßigen Energieeintrags nicht komplett aufgeschmolzen werden [15]. Weitere Ursachen sind Feuchtigkeit und verdampfendes Material, wenn Gasblasen bei der schnellen Erstarrung des Materials eingeschlossen werden [16]. Durch Feuchtigkeit tritt beispielsweise bei  $AlSi10Mg$  Rissbildung auf und das Material ist nicht verarbeitbar. Wenn durch die automatisierte Auslegung der Scanpfade und die dazu abgestimmten Einschwingzeiten der Laserleistung der Überlapp zwischen unterschiedlichen Segmenten einer belichteten Schicht zu gering gewählt ist, ähnlich bei zu großem Spurabstand, führt dies zu regelmäßig angeordneten Poren (Bild ).

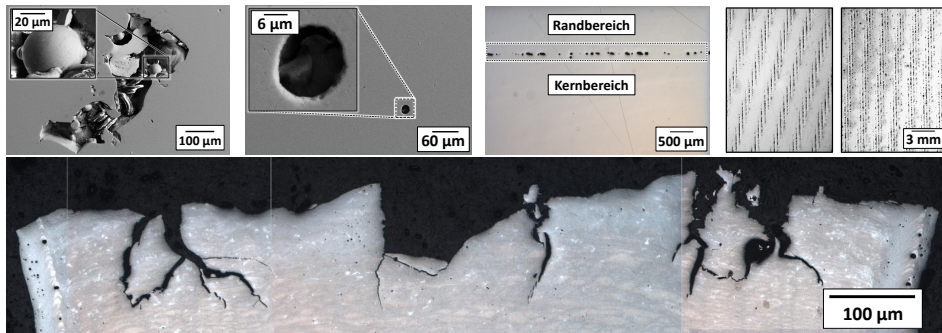


Bild 1: Schlißbilder zum Prozessfehler Porosität: a) Energiemangel, b) Gas-Pore, c) Geringer Überlapp im Randbereich, d) Geringer Spurbestand zwischen Scanvektoren, e) Rissbildung bei feuchtem  $\text{AlSiO}_2\text{Mg}$ .

### 2.1.2 Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit von Bauteilen während des Aufbaus ist ein kritischer Prozessfehler, dessen aus der Literatur bekannte Ursachen und Folgen hier diskutiert werden. Die Oberflächenrauheit ist wegen mitunter  $25\ \mu\text{m}$  dünnen Schichten von Bedeutung für die Prozessstabilität. Wie auf Bild 2 dargestellt, führt Rauheit lokal zu tieferen Pulverschichten und somit zu unaufgeschmolzenem Material. Konsolidiertes aus dem Pulverbett herausragendes Material beschädigt den Beschichter. Mögliche Ursachen für Oberflächenrauheit

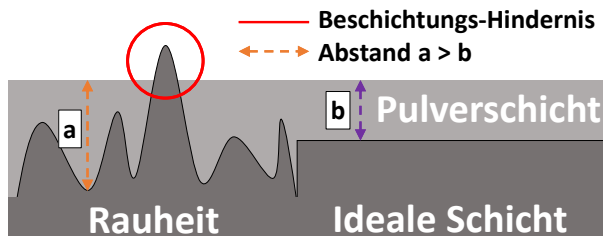


Bild 2: Oberflächenrauheit führt zur Beschädigung des Beschichters und erzeugt, im Vergleich zur eingestellten (b), durch lokal größere Pulverschichtstärken bei (a), Porosität.

sind auf Bild 3 zusammengefasst und Beispielbilder werden im Anhang (Bild 117) gezeigt.

Durch die Verwendung von Insel-Belichtungs- oder Schachbrett-Strategien [20], welche sich durch kurze Scanpfade und häufige, beispielsweise in  $5\ \text{mm}$  Abständen, Segment-Grenzen und erhöhte Kanten auszeichnen [S5], wird Oberflächenrauheit erzeugt [14]. Abhängig von der Scan-Strategie treten am Ende eines Belichtungs-Vektors große Leistungsgradienten auf und führen ebenfalls zu Materialtransport [21]. Zahlreiche Arbeiten untersuchen den

damit verbundenen Balling-Prozess und die ihn beeinflussenden Parameter [22]. Laut [23] ist das Balling nur in unteren Schichten relevant. Zhou *et al.* untersuchten das Phänomen bei der Verarbeitung von Wolfram und konnten zeigen, dass Wolfram aufgrund der niedrigen Viskosität und der hohen Oberflächenspannung eine schlechte Benetzungsgeschwindigkeit aufweist, was den Balling-Effekt begünstigt. Hohe Abkühlraten sorgen für eine Verstärkung des Balling-Effekts und resultieren ebenfalls in Oberflächenrauheit [24].

Wie beim Laserstrahl-Bohren [25], dem -Schneiden [26] und dem -Schweißen [27], entstehen beim LSS Spritzer und Funken. Ursachen sind der Druck der Dampfackel [28], die Marangoni-Strömung [29], Gasexpansion im Pulvermaterial und die Prozessgas-Erwärmung [30]. Spritzer werden durch den zugrunde liegenden Entstehungsmechanismus in Kategorien eingeteilt, deren Größe von einem  $\mu\text{m}$  bis hin zu Agglomeraten oder kombinierten Spritzern von mehreren hundert  $\mu\text{m}$  reichen [30] (Bild 4). Dies wurde in Simulationen bestätigt [31]. Gasper *et al.* [30] kategorisieren dabei in Spritzer mit Oxiden, eingesaugte Partikel mit oder ohne Laserstrahl-Interaktion, Partikel aus der Gasfackel und verdampfendes Material. Sie konnten mithilfe von EDX in Kombination mit Ionenstrahl Bohrung zeigen, dass sich in den mit 1000 ppm Rest-Sauerstoff inertisierten Prozesskammern Oxide im Schmelzbad und daraus heraus spritzende Funken beobachten lassen, deren Aspektverhältnis bei 2,4-4,7 (Breite zu Tiefe) liegt. Ashcroft *et al.* zeigten dass Spritzer mit Oxiden behaftet sind die sich am Rand dieser großen Partikel an den flüchtigen und  $\text{O}_2$ -affinen Elementen bilden. Dort können diese Oxid-Bereiche mehrere  $\mu\text{m}$  tief sein [32]. DePond *et al.* betonen die stochastische Entstehung dieses Fehlerbildes [14]. Die prozentuale Masse an durch Spritzer ausgeworfenen Partikeln korreliert direkt mit dem Anstieg der Laserleistung und erreicht zusammen mit dem verdampften Material bis zu 15 % der eingesaugten Masse,



Bild 3: Ursachen der Oberflächenrauheit werden bezüglich der Schmelzbadynamik [17], der Anlagen-/Pulver-Randbedingungen [18], und der Prozess-Parameter [19] unterteilt.

was in [33] gezeigt wurde. Als direkte Folge des *denudation*-Effekts ist ebenfalls eine Erhöhung an den Kanten von Bauteilen oder Belichtungssegmenten zu beobachten [34].

**Definition 1 Denudation-Effekt:** Matthews et al. konnten in [35] zeigen, dass durch das Verdampfen von Material und das Erhitzen des Prozessgases im Schmelzbad ein bereits von Yadroitsev et al. erwähnter [36] Saugeffekt dazu führt Pulvermaterial neben der Interaktionszone anzuziehen. Gunenthiram [37] konnte zeigen dass dieser Verarmungs-/eng.: denudation-Bereich mit der Laserleistung 30-250  $\mu\text{m}$  ( $P = 300-1500$ ) oder dem Energieeintrag wächst. Die Partikel werden dabei mit einer Geschwindigkeit von etwa 0.4 m/s angesaugt und teilweise von der Laserstrahlung erhitzt, sowie vornehmlich entgegen der Scanrichtung abgelenkt. In [38] werden dabei im Flug kombinierende Spritzer nachgewiesen.

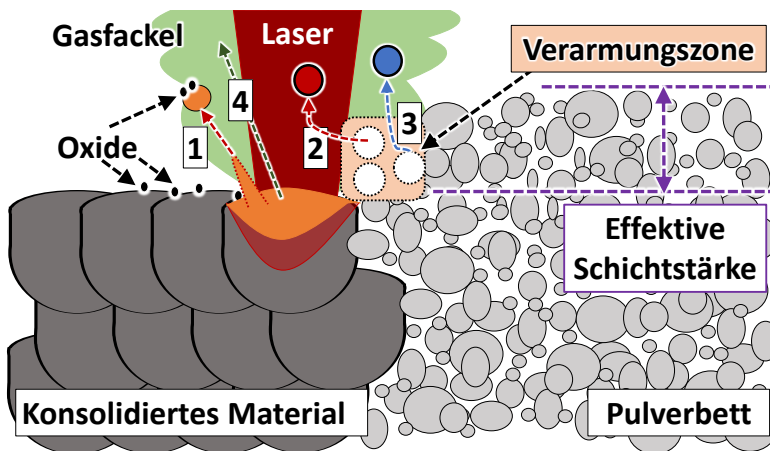


Bild 4: **Kategorien der Spritzerbildung:** 1) Ausstoß, mit dunkel visualisierten Oxiden; 2) Eingesaugt mit Laserstrahl-Interaktion; 3) Eingesaugt ohne Laserstrahl-Interaktion; 4) Gasfackel und Verdampfen (nach [30]). Die Durchmesser von Spritzern beim LSS-M kann mehrere hundert  $\mu\text{m}$  erreichen [38] was besonders für das Bauteil-Design zu berücksichtigen ist.

**Definition 2** Der Füllfaktor bezeichnet bezogen auf das Baujob-Volumen oder die Baujob-Schicht den Anteil an belichteter zu unbelichteter Volumina bzw. Flächen. Bei hohen Füllfaktoren  $> 40\%$  besteht eine statistisch erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen von Spritzern auf belichteten Bereichen, wodurch Fehlstellen generiert werden und die relative Dichte lokal unter die angestrebte Qualitätsgrenze von 99,5 % sinkt.

### 2.1.3 Gestaltabweichungen

Eine häufige Klasse von Prozessfehlern die vor allem bei großen und komplexen Bauteilen auftritt, ist die Gestaltabweichung. Einflüsse neben der bereits beschriebenen Oberflächenrauheit werden hier aufgezählt.

**Treppenstufeneffekt:** Entsprechend der eingesetzten parameterabhängigen Spurbreite und der Schichtdicke werden runde Bauteilkonturen in Aufbaurichtung nur näherungsweise abgebildet. Je größer die Schichtstärke und das vom Energieeintrag abhängige Schmelzbad, desto stärker ist die dadurch entstehende Abweichung [39].

**Abbildungsfehler der Laseroptik** führen zu mangelnder Positioniergenauigkeit. Das betrifft sowohl die Position in der Fläche und der Strahltaile in Aufbaurichtung, als auch die Verzerrung des Laserspots in Abhängigkeit des Auslenkungswinkels [40]. Weiter variiert die resultierende Schichtstärke durch eine fehlerhafte Positionierung der Bauplattform [41].

**Verzug:** Die Schrumpfung [42] beim Erstarrungsprozess bringt zyklisch und schichtweise Spannungen in das generierte Werkstück ein [43]. Diese Spannungen müssen durch die Stützstruktur oder das bereits konsolidierte Bauteilmaterial aufgefangen werden, weil sonst während dem Prozess makroskopische Deformationen im Bauteil entstehen. Diese treten mitunter nach dem Vereinzeln von der Bauplattform auf, so dass stets eine thermische Nachbehandlung, das Spannungsarmglühen empfohlen wird.

**Stützstrukturfreie Überhänge:** Die Pulverbett-Schüttdichte beeinflusst die Wärmeleitungsseigenschaften [44], die Materialschrumpfung [42] und folglich die Performanz von Prozess-Parametern stützstrukturfreie Überhänge aufzubauen, weil die flüssige Schmelze im weniger dichten Pulverbett schneller absinkt [45]. Die hervorgehobenen Vorteile durch die Designfreiheiten müssen daher aufgrund der teils notwendigen Verwendung von Stützstrukturen eingeschränkt werden. Folglich sind an Überhängen einsackende Bereiche und Anhaftungen an den Unterseiten bekannt, sowie eine Fehlerquelle durch die manuelle Bearbeitung bei der Entfernung der Stützstruktur gegeben.

**Definition 3** *Bei ungestützten Überhängen kommt es in Abhängigkeit von der Materialdicke und Oberflächenspannung zur Ausprägung des **Dross-/Tropfen-Effekts**, der zu Abweichungen und Fehlstellen im Gefüge der darüber einsackenden Schichten [19] führt. Ein präziser Nachweis wird bei [14] mittels Kohärenztomographie gezeigt.*

## 2.2 Charakterisierung der Anlagenoptik

Hier werden die Grundlagen für die Prüfung der Anlagenoptik erläutert. Für reproduzierbare Ergebnisse muss die gemessene Intensitätsverteilung eines Laserspots nach DIN EN ISO 11146 [46] mit dem kreisförmigen Idealzustand verglichen werden. Der Laserspot-Durchmesser ist als die  $2\sigma$  Umgebung, die doppelte Standardabweichung des Strahlprofils, definiert und wird aus der Varianz der Leistungsdichteverteilung bestimmt. Dafür wird der Schwerpunkt der Leistungsdichteverteilung über das Moment erster Ordnung, im Anschluss die Hauptachsen über das Moment zweiter Ordnung, welche die Varianz der Leistungsdichteverteilung in Abhängigkeit des Schwerpunkts beschreiben, bestimmt [47]. Im Fall von Single-Mode-Fasern wird die gemessene Intensitätsverteilung  $I$  mit einer idealen Gaußverteilung  $I$  verglichen, was als *Goodness of Fit Index GFI* bekannt ist. Bei der Vermessung der Laserstrahl-Kaustik wird die Beugungsmaßzahl  $M^2$  bestimmt [46], die den Divergenzwinkel  $\phi$  eines realen Laserstrahls mit einem idealen Gaußstrahl vergleicht. Zur normgerechten Ermittlung [46] wird der Strahldurchmesser an mindestens 10 Stellen innerhalb und außerhalb der doppelten Rayleighlänge vermessen, so dass die Strahltaile  $d_0$  bestimmt und zur Berechnung von  $M^2$  herangezogen werden kann:

$$M^2 = \frac{\pi d_0 \phi}{\lambda} \frac{1}{4} \quad (1)$$

Durch die Messung der Strahlkaustik werden Störungen in der Strahlführung, der Laserstrahl-Quelle und der Fokusslage relativ zum Nullpunkt der LSS Anlage sichtbar. Im ISO Standard gibt der  $D_{4\sigma}$  den Radius entsprechend der zweiten zentralen Momente,  $\langle x^2(z) \rangle$  und  $\langle y^2(z) \rangle$ , an, welche der Varianz und deren Wurzel der Standardabweichung entsprechen. Demnach wird die doppelte Varianz als Strahlradius definiert. Beim LSS sind folgende Methoden zur Laserspot Durchmesser-Bestimmung bekannt:

- Messung der Strahlkaustik mit einem Strahl-Profil-2D-Sensor.
- Belichten von Einzelspuren bei verschiedenen Baukammer-Höhen auf einem eloxiertem Material und nachgelagerter Vergleich mit einem Mikroskop zur Feststellung der minimalen Spurbreite [40].
- Messung des Speckle-Profiles [48].

## 2.3 Einkopplung und Wärmestrahlung

Beim LSS erzeugt die absorbierte Energie der bewegten Wärmequelle, des Laserstrahls, ein zeitabhängiges Temperaturfeld im Pulverbett und zusammen mit den Einflussgrößen des Pulvermaterials ein Schmelzbad [49]. Dabei

wird die Absorption der Infrarotstrahlung durch die Absorption der freien Elektronen im Leitungsband dominiert und korreliert mit dem elektrischen Widerstand des Materials [50]. Die Einkopplung der Laserstrahlung wird beim LSS nicht analytisch berechnet, weil die genaue Anordnung der Pulverpartikel, deren Größe, Form und Wechselwirkung nicht bekannt [28] und extreme Rechenleistungen erforderlich sind [51]. Daher werden Ansätze entwickelt, um die Anordnung der Pulverpartikel numerisch zu simulieren [52]. Die Absorption des Pulverbetts ist im Verhältnis zu ebenen Flächen des Vollmaterials höher [53], weil durch Mehrfachreflexion innerhalb des Pulverbetts und zwischen Partikeln die sonst reflektierte Strahlungsanteile wiederholt einwirken können [54]. Im statisch genäherten Fall für eine einzelne Schmelzspur zeigt sich jedoch auch, dass der Großteil der absorbierten Strahlung, mehr als 60 %, auf das durch Wärmeleitung geschmolzene Material, das Schmelzbad, einwirkt [54]. Hier ist der Absorptionskoeffizient niedriger und schwankt zwischen 0.3-0.7 in Abhängigkeit des Materials, der Temperatur und des Aggregatzustands [55]. Bild 5 zeigt unterschiedliche Fälle der Laserstrahl-Material-Wechselwirkung. Ausgehend von [56] werden in [57] mit kalorimetrischen Versuchsaufbauten Messungen zur Absorption der Laserstrahlung im Pulverbett durchgeführt, die mit der Simulation durch Ray-Tracing übereinstimmen. Weiter zeigen [58], dass die gemessene Absorption von der verwendeten Laserleistung abhängt, wenn diese ein Regime des Keyhole-Schweißens erreicht. [58] zeigen ebenfalls, dass die Absorption ab der Entstehung des Keyholes durch den Druck der Dampfackel höhere Werte erreicht, als das durch niedrige Leistung und Mehrfachreflexion möglich ist.

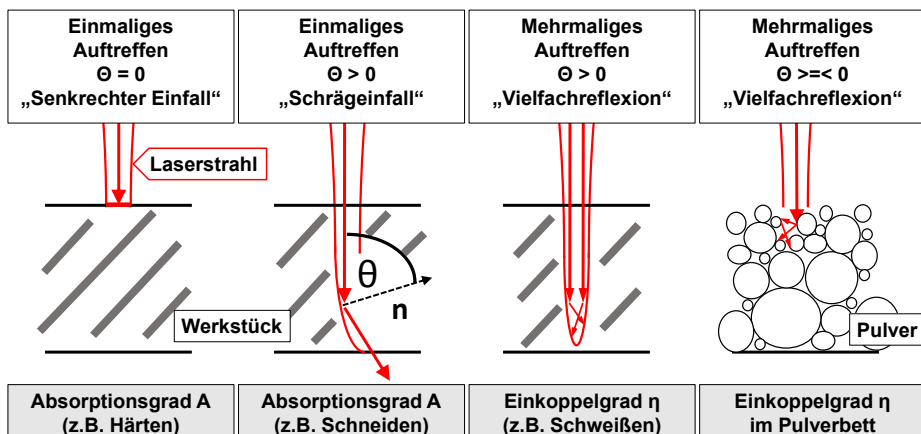


Bild 5: Wechselwirkungszone bei der Lasermaterialbearbeitung.

Das beim LSS entstehende Schmelzbad wird von den auf Bild 6 gezeigten Phänomenen (vgl. [59]) dominiert und beeinflusst durch den Kapillareffekt,

die Spritzerbildung, die Benetzung und das Sintern die unmittelbare Umgebung im Pulverbett [28]. Die Schmelzbad-Dynamik und der Strömungsfluss folgen komplexen und simulationstechnisch aufwändigen Überlagerungen [60] aus Oberflächenspannung [61], Auftrieb [62], Materialverdampfung [63] und dem Temperaturfeld [64]. Die aufgrund von Gradienten der Oberflächenspannung wirkende Marangoni-Strömung [65] erreicht bei Laserschweiß-Anwendungen Strömungsgeschwindigkeiten von 1 m/s [66], so dass eine hohe Schmelzbad-Dynamik vorliegt, die durch die Prozessgas-Strömung [67], den Druck der Dampffackel [63] und hohe Abkühlraten [68] am Rand des Schmelzbads beeinflusst wird. Durch den Druck der Dampffackel der bei [69] für das Laserstrahl-Schweißen mit 200-600 kPa angegeben ist, erreicht der Siedepunkt von Titan im Schmelzbad Temperaturen von über 4000 K [70]. Dabei erreichen die Abkühlraten Werte von 1-40 K/ $\mu$ s und die Abkühlgradienten Werte von 5-20 K/ $\mu$ m [70]. Die Form des Schmelzbades ist mit Hilfe eines Modells von Rubenchik durch die statische Temperaturverteilung in Abhängigkeit von Materialparametern abschätzbar, wobei sowohl die Pulverschicht-Höhe, Schmelzbad-Dynamik, Verdampfung und Oberflächenspannung vernachlässigt werden [54]. Dabei bildet sich durch die Schmelzbad-Dynamik und den Druck der Dampffackel eine gegen die Scanrichtung weisende Oberflächennormale aus, welche das Emissionsverhalten beeinflusst [60] (siehe Abschnitt 7.2.2 im Anhang).

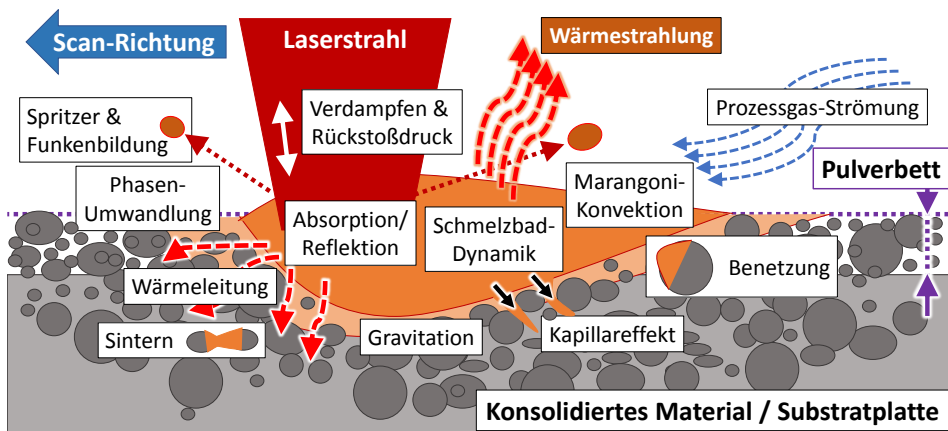


Bild 6: Schematische Darstellung der Schmelzbad-Phänomene beim Laserstrahlschmelzen, vgl. [59]. Die Wärmestrahlung als Grundlage für die koaxiale PÜ ist orange hervorgehoben.

Jeder Körper dessen Temperatur über dem Nullpunkt ( $T = 0$  Kelvin) liegt strahlt Energie ab. Diese Energie steigt mit der Temperatur bei gleichzeitiger Reduzierung des Strahlungsmaximums [71]. Die emittierte Strahlung hängt

vom Emissionsgrad ab, der das Verhältnis der emittierten Strahldichte eines realen Strahlers zu der eines idealen schwarzen Strahlers beschreibt [72]  $\epsilon(\lambda) = \frac{L_\lambda}{L_{\lambda,S}}$ . Bei bekannter Temperatur  $T$ , wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz das spektrale Strahlungsmaximum eines Strahlers berechnet. Die Strahldichte ist beschrieben als  $L_{\lambda,S}(\lambda, T) = \frac{\beta}{\lambda^5} \cdot F(\lambda \cdot T)$ , mit der Konstanten  $\beta$  und der Funktion  $F$  in Abhängigkeit des Produkts aus Wellenlänge  $\lambda$  und Temperatur  $T$ . Für die Wellenlänge des Maximums der spektralen Strahldichte  $\lambda_m$  gilt:  $\lambda_m \cdot T = b = konst.$  Wenn hier über die Wellenlänge integriert wird, folgt das **Stefan-Boltzmannsche Gesetz**

$$M = \sigma \cdot T^4, \quad (2)$$

mit der spezifischen Ausstrahlung  $M$  und der Stefan-Boltzmann-Konstanten  $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ . Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Strahldichte des Schwarzen Strahlers bei gegebener Temperatur und Wellenlänge

$$M(\lambda, T) = \epsilon \cdot \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]}, \quad (3)$$

mit  $h = 6.626070040 \cdot 10^{-34}$  Js, dem Planckschen Wirkungsquantum,  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s, der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Boltzmann Konstanten  $k = 1.38064852 \cdot 10^{-23}$  J/K [71]. Für reale Temperaturstrahler und Metalle ist der Brechungsindex komplex  $\frac{\sin \chi}{\sin \theta_i} = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} = \frac{n_1 - ik_1}{n_2 - ik_2}$  und die Reflexion durch parallel und senkrecht polarisierte Komponenten darstellbar. Weil Metalle einen großen Extinktionskoeffizienten  $k$  aufweisen und stark absorbieren, ergibt sich für unpolarisierte einfallende Strahlung  $\rho(\theta_i) = (\rho_{\parallel}(\theta_i) + \rho_{\perp}(\theta_i)) / 2$ . Daraus lässt sich die Emissivität ableiten  $\epsilon(\theta) = 1 - \rho(\theta)$ , die für die unpolarisierte und senkrechte Einstrahlung  $\epsilon_n = (4n) / ((n+1)^2 + k^2)$  ergibt. Für Metalle ist die Emissivität bis 50° meist konstant [71]. Ein grauer Strahler besitzt einen spektralen Emissionsgrad dessen Wellenlängenabhängigkeit dem eines Schwarzen Strahlers entspricht, jedoch im Verhältnis geringer ist. Metalle weisen eine starke Abhängigkeit des Emissionsgrades von der Wellenlänge und der Temperatur auf und werden daher als selektive Strahler bezeichnet [73]. Die thermische Strahlung des Schmelzbads wird von der Strahlung der Dampfackel überlagert, welche durch die Interaktion mit der Laserstrahlung beeinflusst wird. Sie besteht daher zum Teil aus ionisierten Atomen und Molekülen, so dass ein Großteil der Strahlung bei diskreten Wellenlängen im ultravioletten Bereich emittiert wird [74]. Die Emissivität von flüssigen Metallen in Abhängigkeit

des Temperaturfeldes schwankt, was bei kleinen Geometrien von 200  $\mu\text{m}$  Ausdehnung, hoher Laserleistung von über 300 W, und hoher Schmelzbad-Dynamik in Verbindung mit dem umgebenden Pulverbett lokal zu einer stark verrauschten thermischen Strahlungsquelle führt. Um die thermische Strahlung der Interaktionszone, also des Schmelzbades und seiner Umgebung, zu detektieren, wird daher eine zeitlich und räumlich hochauflösende Sensorik benötigt.

## 2.4 Prozessüberwachung für das Laserstrahl-Schmelzen

Wie aus den Handlungsfeldern von Standardisierungsorganisation wie der *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, der Anzahl an Veröffentlichungen (Bild 116) und öffentlich geförderten Projekten hervorgeht (Tabelle 17 im Anhang), steht die Entwicklung von Methoden zur Prozessüberwachung (PÜ) im Fokus der Forschung. Daher werden sensorbasierte PÜ- und -Regelungsmethoden [75] und die Verbindung von in-situ Sensorik und physikalischen Simulations-Modellen [60] benötigt. Die Verwendung von PÜ-Systemen erzeugt drei Vorteile für Anwender von LSS-Anlagen:

- 1. Prozessverständnis:** Mangels ausgereifter oder präziser physikalischer Modelle oder Vorhersagen, ist die PÜ beim Laserstrahl-Schmelzen ein notwendiges Mittel zur Steigerung des Prozessverständnisses.
- 2. Wirtschaftlichkeit:** Mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Produktion, wird durch eine funktionierende PÜ das Eintreten von kritischen Fehlern erkannt und der Herstellungsprozess unter- oder abgebrochen, um Material sowie Maschinenstunden effizient zu nutzen.
- 3. Überwachung der Prozess- und Produktqualität:** Im Idealfall werden physikalische Größen direkt gemessen, oder fehlerbehaftete Messgrößen zur Berechnung ebendieser herangezogen. Alternativ werden relative Prozessschwankungen für statistische Prozessanalysen zur Untersuchung der Fähigkeit eines Fertigungsprozesses analysiert.

Eine Strukturierung zur Prozessüberwachung entlang der Prozesskette beim LSS ist zur Übersicht in Bild 7 dargestellt. In diesem Abschnitt werden die bekannten Ergebnisse der PÜ beim LSS, also allgemeiner Sensorik, lateraler PÜ, weitere in Laborexperimenten evaluierte Methoden und die koaxiale Schmelzbad-Überwachung vorgestellt und kritisch betrachtet.

Der hochdynamische Laserstrahl-Schmelz-Prozess macht eine direkte Detektion von Prozessfehlern anspruchsvoll: Zhal *et al.* [11] zeigten, dass die Prozessfehler-Entstehung in Zeitintervallen zwischen 10 und 100  $\mu\text{s}$  stattfindet. Die für PÜ abzudeckenden räumlichen und zeitlichen Skalen [60] zwischen der Defekentstehung im Mikrometer-Bereich, sowie Bauzeiten von Minuten

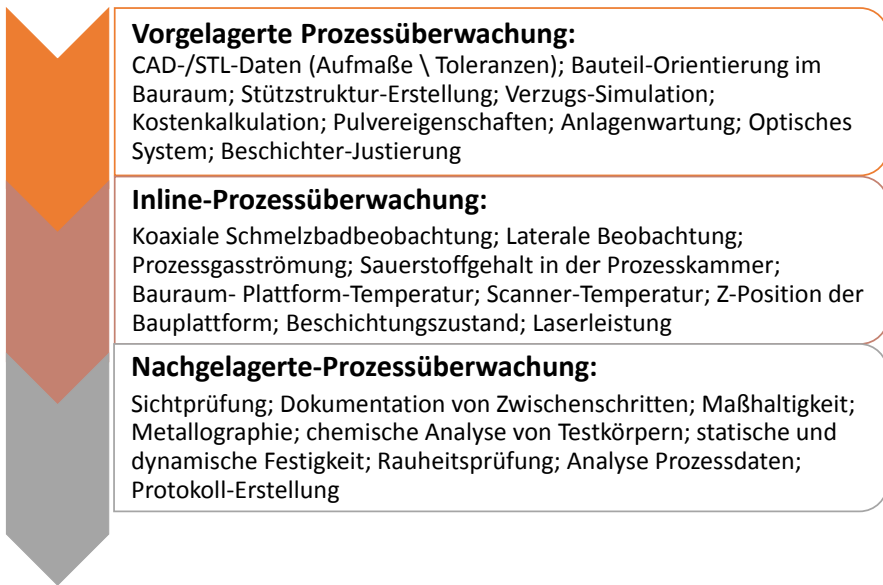


Bild 7: Prozessüberwachung entlang der Prozesskette beim Laserstrahl-Schmelzen.

bis über 100 Stunden und Bauteilvolumina von unter bis mehreren Kubikdezimetern benötigen zudem kostenintensive Hardware für die notwendige Rechenleistung. Colosimo strukturiert in [76] und erweitert in [77] die PÜ beim Laserstrahl-Schmelzen treffend in den Ebenen:

- 1. Schmelzbad und Umgebung:** Die vom Schmelzbad emittierte Strahlung unterteilt sich in thermische Strahlung, reflektierte Laserstrahlung und Strahlung aus ionisiertem Material [78] (Bild 109 im Anhang). Dies beinhaltet die Temperaturverteilung, Form, Spritzer-Bewegung und die Verdampfung des Materials, sowie die das Schmelzbad umgebende noch pulverförmige, flüssige, erstarrende oder kondensierte Materie.
- 2. Scanpfad oder Schmelzspur:** Die Betrachtung kurzer zeitlicher und räumlicher Einheiten nehmen Bezug auf die lokalen Unterschiede in der Pulverbett-Anordnung und der Beschaffenheit des darunter liegenden Substrats oder Bauteils in Abhängigkeit der Position auf der Bauplattform.
- 3. Kompletten Schichten:** Während des LSS-Prozesses interagieren Temperaturverteilung, Pulver-Beschichtungszustand, Prozessgasströmung und Bauteilanordnung und beeinflussen die Prozess- und Bauteilqualität.
- 4. Volumina** die unter Variation von Prozess-Parametern, geometrischen Randbedingungen oder Prozessfehlern generiert werden ermöglichen durch die Rekombination aufgezeichneter Prozessdaten eine dreidimensionale Repräsentation. Diese eingangs als theoretische Ziel festgelegte Auswertungs-

Methode ist konzeptuell und auch bezüglich bildverarbeitender Auswertungsmethoden mit Computer-Tomographie-Methoden vergleichbar.

Basierend auf den Erfahrungen laserbasierter Fertigungsverfahren wurde in wissenschaftlichen Studien etablierte Sensorik zur PÜ und Regelung auf das Laserstrahl-Schmelzen (LSS) übertragen, diese verändert oder erweitert und untersucht. Der folgende Abschnitt analysiert bereits für das LSS verwendete Methoden der PÜ und gliedert sich in die Abschnitte allgemeine Sensorik, laterale Pulverbett-Überwachung, Alternativen ohne fertigungstechnischer Zielsetzung und schließt mit koaxialen Schmelzbad-Überwachungs-Methoden aus der gesamten laserbasierten Fertigung.

**Definition 4** Als *laterale*, auch *Off-Axis* genannte, PÜ werden hier optische Systeme bezeichnet, die einen Prozess von der Seite (lateinisch *lateralis* ‚seitlich‘) betrachten.

#### 2.4.1 Allgemeine Anlagen-Sensorik

Unter allgemeiner Sensorik werden hier Messmittel und Software-Lösungen verstanden, welche nicht direkt die Interaktionszone untersuchen, aber die Randbedingungen des LSS im Betrieb aufzeichnen. Die Anlagensoftware kommerzieller Systeme ermöglicht die Ausgabe von Protokollen. Das SPS-Protokoll beinhaltet üblicherweise Anlagen-Einstellwerte, die Information zu Bauteilen wie Name, zugewiesene Prozess-Parameter, Sensorwerte sowie die zeitlichen Prozessablaufdaten.

##### 2.4.1.1 Temperatursensoren

Die Temperatur ist ein wesentlicher Einflussfaktor für den LSS-Prozess, weil sie das Abkühl- und Konsolidierungsverhalten [79], die internen Spannungen [80] und den Verzug von Bauteilen beeinflusst [81]. Temperatursensoren befinden sich an den Scanner- [82] und Laser-Systemen [83], sowie an beheizten Bauplattformen [84, 85] und der Verrohrung des Prozessgas-Kreislaufs [84]. Für alle Komponenten der optischen Systeme muss mittels aktiver Kühlung eine konstante Temperatur eingehalten werden, um den temperaturbedingten Drift der Scanneroptik, thermische Linseneffekte [86] oder Leistungsvariationen zu verhindern [S10]. Durch die Betrachtung der Temperatursensoren unter der Bauplattform ist lediglich eine gemittelte und aufgrund des Abstands zum Bauteil von 10 bis über 800 mm, gedämpfte Aussage zur Temperatur-Historie eines Bauteils möglich.

#### 2.4.1.2 Prozessgas-Sensorik

Um die Oxidation von Metallen beim LSS zu verhindern werden Prozesskammern mit Argon- und Stickstoff-Prozessgas-Strömungen durchflutet [1]. Weiter werden durch die Prozessgas-Zirkulation Spritzer abgesaugt [37] und Schmauch von den Scannerfenstern abgehalten. Weil vor allem die Spritzerbildung im Prozess für die Bildung von Fehlstellen verantwortlich gemacht wird [35], sind in neueren kommerziellen Anlagengenerationen stärkere Prozessgas-Pumpen verbaut [87]. Um einen konstanten Fluss des Prozessgases sicherzustellen, befinden sich an mehreren Stellen des Prozessgas-Systems, Sensoren zur Vermessung der Strömungs-Geschwindigkeit, der Pumpen-Drehzahl, des Filter-Zusetzungs-Zustandes, des Sauerstoffgehalts [84] sowie der Temperatur.

#### 2.4.2 Kamera-basierte laterale Pulverbett-Überwachung

Die laterale, auch Off-Axis genannte, Beobachtung des kompletten Bau-raums oder einzelner Ausschnitte ist geeignet vor, während und nach der Belichtung die Interaktionszone zu beobachten. Sie eignet sich zur Überwachung des Erstarrungsprozesses [88], der Spritzerbildung [89] und der Pulverbeschichtung. Islam *et al.* [90] untersuchten mit einer Kombination aus lateraler Kamera und Pyrometer das Balling-Verhalten bei der Verarbeitung von Edelstahl [90] und konnten die Variation von Prozessparametern nachweisen. In [91] konnte bei der Untersuchungen zu Inconel 718 erfolgreich eine Verringerung der Schmelzbadbreite mit der Scan-Geschwindigkeit nachgewiesen werden. Weiter wird die relative Temperaturänderung einer Schmelzbadgröße zugeordnet und als unabhängig von der Schichthöhe beschrieben. Kleszczynski beschreibt in mehreren Veröffentlichungen Untersuchungen mit hochauflösenden lateralen Aufbauten (29 Megapixel CCD Kamera: SVS29050, SVS-VISTEK GmbH, Auflösung: 25  $\mu\text{m}$  / Pixel) [92, 93, 94, 95, 96, 97, 98]. Dabei wurde eine Kanten-Erhöhung durch starke Leistungs- oder Spurbabstands-Manipulationen von maximal 40 % beobachtet [99]. In [98] wurde die Oberflächen-Rauheits-Inspektion als notwendig diskutiert und eine Methode zur Auswertung von Schichtbildern entwickelt, welche eine Aufnahme nach der Belichtung einer Schicht analysiert. Besonders die laterale Verwendung von Photodioden im Spektralbereich zwischen 1300-1800 nm in Kombination mit koaxialen Kameradaten durch [100, 101] zeigt offenbar erfolgreich, dass die hochfrequent aufgenommene und durch die Scannerinformation räumlich zugeordnete Prozesssignatur verwertbare Information beinhaltet. Der spektral langwellige Bereich gibt in [100] Aufschluss über Prozess-Schwankungen jedoch ohne über das Signalverständnis aufzuklären. Zusammen mit Coeck *et al.* [13] ist es für ein Ein-Laser-System

mit Hilfe von lateral angeordneten Photodioden im NIR-Bereich scheinbar gelungen die Position von Poren größer als  $150\ \mu\text{m}$  zuzuordnen und diese Position mittels CT zu bestätigen. Eine Diskussion der Signalanalyse fehlt hierzu ebenfalls. In [102] wurde gezeigt, dass Beschichtungsfehler mit einem Kamera-System, welches als Vorversion für das in dieser Arbeit verwendete System zu verstehen ist, detektiert werden können. Eine umfassende Auflistung von Prozessfehlern und deren Häufigkeit fehlt in der Arbeiten von Craeghs *et al.*.

### 2.4.3 Grundlagenexperimente

Hier werden Forschungsarbeiten gezeigt, welche aufgrund kostenintensiver Ausrüstung nicht auf die Fertigung skalierbar sind, aber das Prozessverständnis erweitern. Die Spritzerbildung konnte mit Hilfe von Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen erforscht werden, wobei gezeigt wurde, dass anstatt des induzierten Drucks der Dampffackel, tatsächlich der Verdampfungs-Unterdruck Partikel in das Schmelzbad zieht [31] und diese teilweise kombiniert [38]. Bertoli *et al.* konnten das komplette Aufschmelzen von Pulverpartikeln noch vor der Interaktion mit dem Laserstrahl und Abkühlraten von mehr als  $10^6\ \text{K/s}$  zeigen [103]. Dies wird durch Beobachtungen von [35] bestätigt. Dynamische Instabilitäten wie Balling oder Humping, Spritzerbildung, Pulverablösung wurden durch [37] und durch [35] experimentell nachgewiesen. Experimente mit in-situ Applikationen von **Synchrotronstrahlung** sind zuletzt besonders gewinnbringend, weil dadurch die Defekt-Entstehung zeitlich hochauflösend untersucht wird [11]. Diese kostenintensiven Aufbauten beschränken sich bei [11] auf die Variation von Prozess-Parametern.

In der Lasermaterialverarbeitung werden **Spektroskopie-Versuche** [78] untersucht, weil sie Signaturen von Prozessfehlern im Emissionsspektrum auflösen [104]. Dabei eignet sich die Untersuchungen der Dampffackel, durch die indirekte Bestimmung der Elektronentemperatur und -dichte des Plasmas [74]. Die Anwendung von **Pyrometern** mit denen Schwankungen der Prozessparameter detektiert werden konnten [105], sind ebenfalls zur Untersuchung der Temperatur im Schmelzbad verwendet worden [104], wobei keine Publikationen mit Korrelationen zu realen Prozessfehlern bekannt sind. Systeme zur **Ultraschall PÜ** werden erforscht, weil dies in anderen Fertigungsbereichen mit hoher zeitlicher Auflösung erfolgreich eingesetzt wird [106]. Diese eignen sich für den industriellen Einsatz von Multilaser-Anlagen vermutlich nur bedingt, weil hier mehrere Geräusch- und Laserquellen ohne Synchronisation überlagert werden. Ebenso muss davon ausgegangen werden, dass der Körperschall durch die Größe von Bauteilen und die umgebende

Pulvermasse verrauschte Signaturen erzeugt. **Interferometrische Methoden** sind für die Evaluierung der Oberflächentopografie eingesetzt worden [107]. Eine Studie mit Grundlagenversuchen zur Verwendung der Optischen Kohärenz-Tomographie wurde von [108] publiziert, sie enthält keine Hinweise auf Anwendungsmöglichkeit, obwohl die Topographie-Bestimmung während dem Prozess nutzbare Informationen liefert. Die Entwicklung von Hyperspektral-Kameras wird für die Additive Fertigung vorgeschlagen [109] und bietet sicherlich weitere und später kommerziell nutzbare Methoden.

#### 2.4.4 Koaxiale Schmelzbad-Überwachung

KSBÜ-Aufbauten werden für das Beschichten [110], das Schweißen [111], das Schneiden [112], Härten [113] eingesetzt. Die hierzu bekannten Methoden können nicht direkt auf das LSS übertragen werden, weil die Anzahl, die Parametervariationen und Form der Scanpfade, die Schmelzbad-Umgebung im Pulverbett und der schichtweise Aufbau von Bauteilen die Sekundärstrahlung beeinflussen. Hier werden Erkenntnisse zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung aus der laserbasierten Fertigung analysiert und deren Anwendbarkeit auf das LSS geprüft.

##### 2.4.4.1 Koaxiale Sensorik

Bild 8 zeigt eine Auswahl an koaxialen Aufbauten. Beispiel eins zeigt einen Parabolspiegel mit Pinhole-Optik, was abhängig von der Laser-Wellenlänge oder -Leistung vorteilhaft ist. Beispiel zwei verwendet einen dichroitischen Spiegel, um die optischen Achsen des Laserstrahls und der Sensorik zu kombinieren. Die Beispiele drei bis fünf zeigen 2D-Scanner-Varianten wie sie in LSS-Anlagen verwendet werden. In Aufbau drei wird für die Flachfeldkorrektur eine F-Theta Linse, in den Aufbauten vier und fünf ein zusätzliches Teleskop verwendet, welches die dynamische Variation Laserspot-Durchmessers ermöglicht. Aufbauten mit integrierter oder aktiver Beleuchtung für die Sensorik werden nicht gezeigt, weil dies im experimentellen Teil nicht untersucht wird.

##### 2.4.4.2 Defekt-Signaturen in koaxial detektierter Strahlung

Hier werden die bekannten Defekt-Signaturen und bekannte Auswertungsmethoden sowie deren Übertragbarkeit für das LSS beurteilt.

1. **KSBÜ beim Laser-Durchschweißen:** In [114] wird ein koaxiales System diskutiert, um bei weniger als 100 mm/s Vorschub mit einem 3 kW Nd:YAG Laser die Stumpfstoß-Verbindung zu überwachen. Dabei sind die vollständige Durchdringung der Werkstücke und eine breite Schmelzspur relevant.

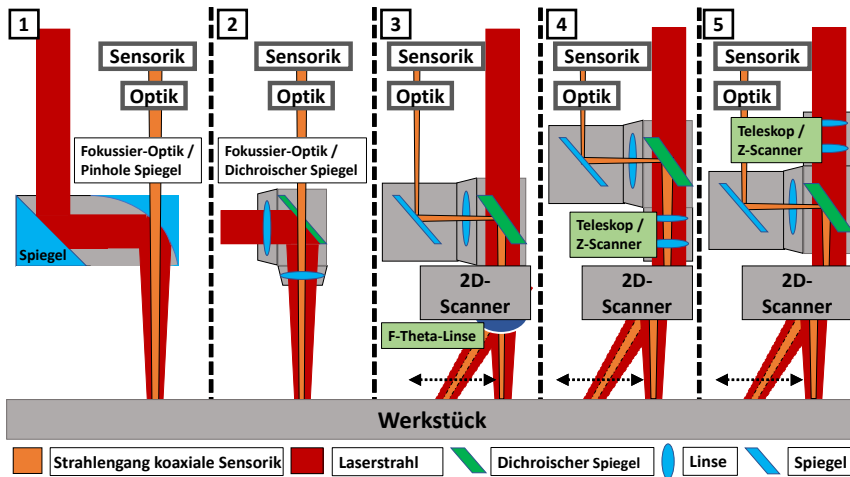


Bild 8: Fünf Beispiele für Aufbauten koaxialer Sensorik, basierend und erweitert aus [114].

[114] zeigen die Unterscheidbarkeit voller und unvollständiger Durchdringung, welche aufgrund eines Vorhandenseins eines Intensitäts-Minimums in der Mitte des koaxial aufgenommenen Schmelzbads identifiziert wird. Dieses Minimum entsteht bei einem vollständig offenem Keyhole. Bild 9 zeigt eine Visualisierung der beiden Fälle: 1A) Komplettes Durchdringen des Keyholes durch die Werkstücke mit Intensitäts-Minimum und 1B) ohne Durchdringung. Mit der Verwendung der Keyhole-Beobachtung entfällt diese Methode für das LSS, weil das Keyhole-Regime beim LSS vermieden werden muss.

2. **KSBÜ beim Laserschweißen:** [114] zeigt, wie eine Scanpfad-Positionsabweichung von der vorgesehenen Nahtposition hin zum dickeren Werkstück zu einem Intensitätsanstieg führt, so dass Abweichungen ab 150  $\mu\text{m}$  nachgewiesen werden. Die höhere Intensität resultiert aus dem kleineren Keyhole im dünneren Material, weil dieses eine niedrigere Plasma- und damit Strahldichte besitzt (Bild 9). Die untersuchten Materialstärken betragen 0,8 und 1,2 mm, der Laserfokus-Durchmesser 600  $\mu\text{m}$ , die Laserleistung 3 kW (Nd:YAG) und die Scangeschwindigkeit unter 5,5 m/min, dies gilt auch für die folgenden beiden Fälle. Die Keyhole-Verwendung schließt diese Methode wie zuvor erwähnt aus.
3. **KSBÜ von Werkstück-Löchern beim Laserschweißen:** Der dritte von [114] beschriebene Fall betrifft das Vorhandensein von Löchern in der Werkstücknaht vor dem Schweißen. Die Signatur dieses Defekts äußert sich durch ausbleibende Intensität auf der Seite mit dem Loch im Material (Bild 9). Grund ist, dass das fehlende Material keine detektierbare Strahlung emittiert. Eine Intensitäts-Variation am Rand der koaxial detek-

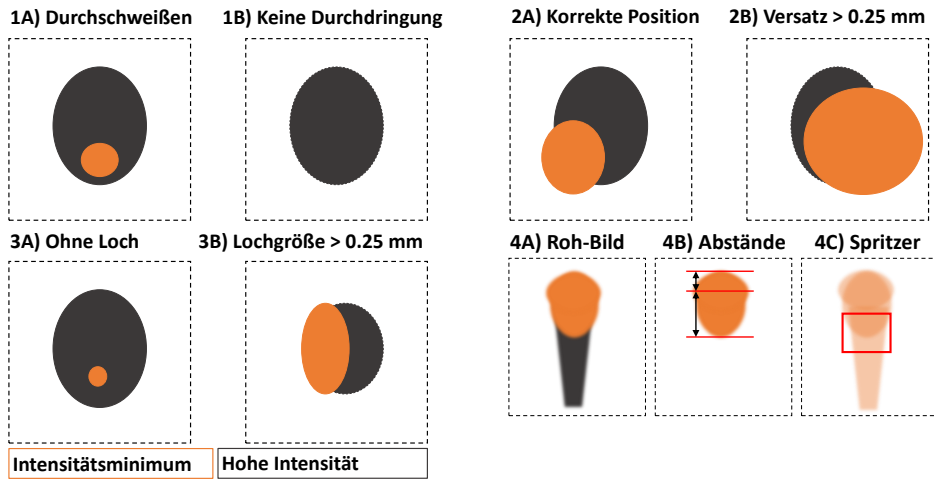


Bild 9: a) Visualisierung der unterschiedlichen Aufnahmen für Schweißen einer Stoßnaht mit und ohne Durchdringen (nach [114]):  $v=92$  mm/s. b) Visualisierung der unterschiedlichen Aufnahmen für Schweißen einer Stoßnaht ohne und mit Positionsabweichung (nach [114]):  $v=92$  mm/s. c) Visualisierung der unterschiedlichen Aufnahmen für Schweißen einer Stoßnaht ohne und mit Werkstück-Loch (nach [114]):  $v=92$  mm/s. d) Visualisierung einer coaxialen Regelung beim Laserschneiden nach [115]:  $v=60$  mm/s.

tierten Intensitätsverteilung ist für das LSS denkbar, weil die Schmelzbad-Umgebung aufgrund der Bauteilgeometrie oder der verwendeten Scanpfade derartige Anomalien hervorruft.

4. **KSBÜ von Spritzern beim Laserschweißen:** Der vierte Fall aus [114] beschreibt die Detektierbarkeit von Schweißspritzern hinter dem Schmelzbad und eine damit einhergehende Veränderung der coaxial sichtbaren Schmelzbad-Geometrie. Spritzer sind ein Zeichen instabiler Prozessbedingungen, weil das ausgeworfene Material in der Schweißnaht fehlt oder andere Bereiche verunreinigt. Die beschriebene Spritzer-Detektion ist ebenfalls eine anwendbare Methode für das LSS, weil durch die Verwendung von Pulvermaterial eine hohe Spritzer-Anzahl und Intensität beobachtbar ist.
5. **KSBÜ für das Laserschneiden:** In [115] wird eine Methode vorgestellt, bei der die Abstände zwischen Schmelzbad-Zentrum, Front und Ende zur Regelung einer groben Vorschub-Geschwindigkeit verwendet werden. Zusätzlich wird über die Auswertung der Spritzer-Intensität mit der Rauheit der Schnittkante korreliert, um die Vorschubgeschwindigkeit in kleineren Schritten kontrollieren zu können. Bild 9 zeigt das Schema des Rohbilds des coaxial detektierten Schmelzbades mit den untersuchten Distanzen und dem Bereich zur Spritzer-Intensitäts-Auswertung. Eine derartige Auswertung erscheint für das LSS verwendbar, wobei die Software

zur Bildverarbeitung in Abhängigkeit der Scanpfad-Richtung programmiert werden muss.

6. **KSBÜ für das Laser-Pulver-Auftragsschweißen:** In [116] zeigen Kelbassa *et al.* die erfolgreiche Korrelation von LPAS Parametervariationen zur koaxial detektierten Schmelzbad-Breite und -Länge. Diese wird von Spritzern gestört. Die ausgewerteten Größen eignen sich als Regelungsgrößen für die Laser-Leistung und die Auswertungsmethode ist auf das LSS übertragbar.
7. **Koaxiale Regelung für das Laser-Überlappschweißen:** In [117] zeigen Li *et al.* die erfolgreiche Unterscheidung von Schmelzbad-Breite und Keyhole-Tiefe mit Hilfe von Algorithmen des Regionen-Wachstums zur Beurteilung der Schmelzbad-Größe und Canny-Algorithmen zur Berechnung der Keyhole-Kontur-Abstände (Bild 10). Die Flächenberechnung erscheint für das LSS verwendbar, wohingegen die Keyhole-Ausbildung stets vermieden werden muss, um beim LSS einen stabilen Prozess zu gewährleisten.

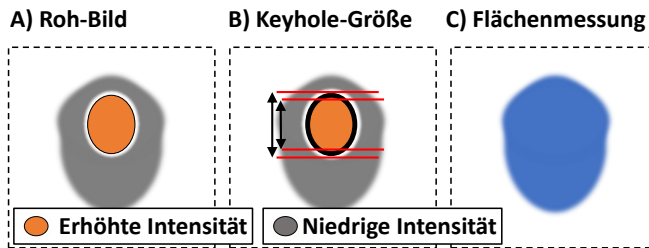


Bild 10: Visualisierung einer Methode zur Auswertung des mittels Kamera koaxial detektierten Schmelzbad für das Laser-Überlappschweißen aus [117]:  $v=20$  mm/s

Die technologischen Unterschiede der gezeigten Applikationen zum Laserstrahl-Schmelzen sind die höheren Scan-Geschwindigkeiten beim LSS von mehr als 1000 mm/s, die ständige Scanpfad-Richtungs-Variation verbunden mit den hochfrequenten Ein- und Ausschalt-Vorgängen der Laser-Strahlquelle, die Einflüsse aus variierenden Randbedingungen durch die Umgebung des lokal beobachteten Schmelzbad, die hochfrequente Variation der lokal verwendeten Prozess-Parameter, sowie die Ausnutzung der gesamten 2D-Scanner-Fläche im Bauraum mit einhergehenden Abbildungsfehlern. In den folgenden zwei Abschnitten werden die für die experimentelle Arbeit relevanten Erkenntnisse aus dem Stand der Technik zusammengefasst und Defizite benannt, um auf die Zielsetzung der Arbeit hinzuführen.

### 2.4.4.3 Zusammenfassung relevanter Ergebnisse zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung beim LSS

1. **Kohärenztomographie (KT):** In [107] berichten Fraser *et al.* von der erfolgreichen Detektion von Defekt-Signaturen bei durch Prozess-Parameter-Variation hervorgerufenen Einzelspur-Instabilitäten die durch den Balling-Effekt induziert worden sein sollen. Weitere Veröffentlichungen der Autoren fehlen, weshalb angenommen wird, dass eine Detektion weiterer Prozessfehler nicht betrachtet wurde. In [108] zeigen Emmelmann *et al.* die Anwendung der KT zusammen mit der Fa. Precitec zur präzisen Auflösung der Oberflächenrauheit im Pulverbett. Auch hierzu wurden bislang keine Ergebnisse publiziert. Zusätzlich zeigen Matthews *et al.* in [14] ausführlicher deren Ergebnisse zur KT. Dabei belegen sie die Korrelation des detektierten Signals zur Maßhaltigkeit bei Überhängen. Zusätzlich detektieren sie Spritzersignaturen auf Bauteiloberflächen aus zuvor belichteten Schichten. Die letztgenannten Arbeiten des Lawrence-Livermore-National-Laboratories zeigen vielversprechende Möglichkeiten zum Einsatz der KT.
2. **Multi-Photodioden-Aufbauten und Quotientenpyrometer:** Die Verwendung von zwei koaxial ausgerichteten Photodioden bei unterschiedlichen Wellenlängen wird von Alberts in [118] gezeigt, jedoch werden hier nur die aufgrund von Parametervariationen entstehenden Intensitäts-Unterschiede dargestellt und mit der relativen Bauteildichte korreliert, wobei diese im weiten Bereich von 80-100 % dargestellt ist. Entsprechend lassen sich daraus keine Aussagen zur Detektion von realen Prozessfehlern oder in für die Bauteil-Zertifizierung notwendiger Genauigkeit machen. Artzt geht in ihrer Arbeit [119] weiter auf die Anwendung dieses bereits von Alberts gezeigten Systems ein und zeigt ebenfalls die Abhängigkeit des koaxial detektierten Signals von Prozess-Parametern. Intensitäts-Schwankungen und Flächenmittelwerte korrelieren bei der Verarbeitung des Werkstoffs CuCr1Zr demnach nur bedingt mit der Porosität des Bauteils, seien aber hilfreich für die Prozess-Parameter-Entwicklung.
3. **Kamera und Photodioden-Kombination:** Erstmals berichtet [23] und patentiert einen Kamera- und Photodioden-basierten Aufbau, der von Kruth *et al.* weiter beschrieben wird [120]. Durch die Concept Laser GmbH wird der Aufbau [121] ab 2016 kommerziell vertrieben. Die Studien von Clijsters *et al.* konnten die Verwendung einer Schmelzbad-Überwachung mittels Optimierung von Prozessparametern, Balling-Effekte bei dreidimensionalen Bauteilen und Tests zum Gaseinfluss zeigen [23]. Die Arbeit wurde von Craeghs in [122] weitergeführt. Dabei wird mittels numerischer Simulation die Belichtung eines Überhangs senkrecht zum Überhang, wie in Bild 11 gezeigt, untersucht. Dadurch verlängert sich das Schmelz-

bad durch einen Hitzestau aufgrund der niedrigen Wärmeleitung im Titan-Pulverbett ( $k_{Pulverbett} = 0.2\text{W/mK}$ ;  $k_{Substrat} = 7.2\text{W/mK}$ ). Die Verwendung eines derartigen Scanpfades ist in der Anwendung mit Scan-Strategien nach heutigem Stand der Technik unüblich. Weiter werden bei [122] Signale von Konturen verglichen, bei denen aufgrund unbekannter Parameterwahl, unabsichtlich erhöhte Kanten ausgebildet werden und die Überhitzung von Scanpfad-Start-Positionen mit der Porosität in Schliffbildern verglichen. Die Unterscheidung der Photodioden- und Kamera-Daten wird in den erwähnten Quellen nur unzureichend behandelt. Craeghs geht nur bezüglich des unterschiedlich großen Messfeldes der beiden Sensoren ein. Eine Auswertung der Spritzer, der Formfaktoren oder der Intensitätsverteilung wird nicht diskutiert [122].

4. **Regelungs-Versuche:** Weiter zeigten Craeghs *et al.* Versuche für einen geregelten Prozess [120], der das näherungsweise lineare Verhältnis von Laserleistung und Schmelzbadgröße ausnutzt [123]. In [19] wurde gezeigt, dass durch eine Regelung auf Basis des Photodiodensignals die Oberflächenrauheit und das Einsacken bei ungestützten Überhängen reduziert werden konnte. Untersuchungen von King *et al.* [124] zeigten weitere Erfolge von Überhang-Parametern zur Reduktion des *Dross-Effekts*.

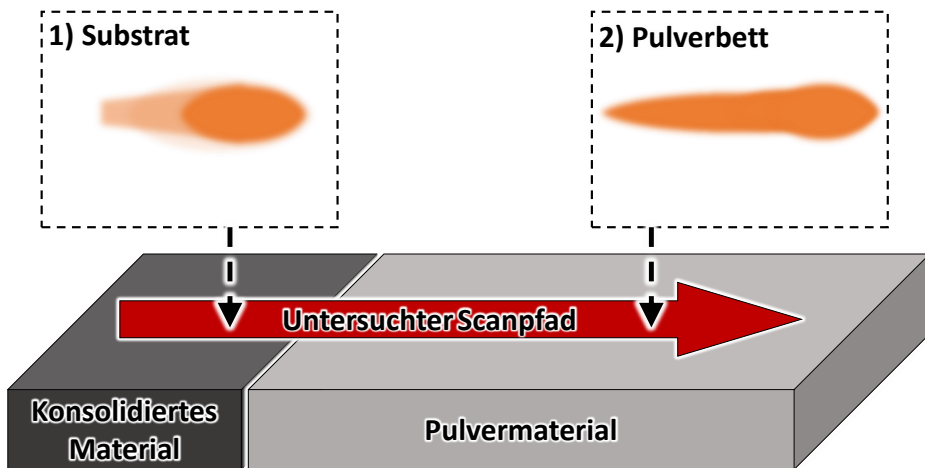


Bild 11: Der Scanpfad zeigt die Richtung senkrecht zum Überhang. Die numerisch simulierte Situation deckt sich mit der koaxialen Beobachtung eines elongierten Schmelzbades (2) aufgrund der thermischen Isolationswirkung des Pulverbetts [122]. Im Vergleich dazu ist der Normalfall (1) eines Schmelzbades über konsolidiertem Material bzw. Substrat gezeigt.

5. **Laser-Parameter und Schmelzbad-Einfluss:** In [125] werden Untersuchungen zur Schmelzbad-Emission gezeigt. Dort korreliert die Schmelz-

bad-Größe stark mit der Emission. Anhand der Variation von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Substrattemperatur wird ein linearer Zusammenhang für die detektierte Schmelzbad-Größe und die gemessene Schmelzspur-Breite gezeigt.

## 2.5 Defizite der Prozessüberwachung

Die Weiterentwicklung der Prozessüberwachung (PÜ) steht im Fokus aktueller Forschungs-Bemühungen (vgl. Tabelle 17 im Anhang). Bisherige Defizite sind hier zusammengefasst:

**Fehlerbilderkataloge:** Fundierte Darstellungen von Fehlerbildern unterschiedlicher PÜ-Systeme sind in keiner gesammelten Darstellung verfügbar. Somit ist die Schulung und die Entfaltung des Potentials der verfügbaren PÜ-Systeme erschwert.

**Prozess-Fehleranalyse:** Für das LSS wurden im Abschnitt 2.1 Beschreibungen verschiedener Fehlerbilder vorgestellt. In der Literatur werden zwar Übersichten gegeben [45], die tatsächliche Häufigkeit und Relevanz unterschiedlicher Fehlerbilder ist nicht ausreichend diskutiert. Ohne deren Kenntnis ist die Entwicklung von Methoden zur PÜ nicht zielgerichtet.

**Signalverständnis zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung:** Es liegen Arbeiten zur KSBÜ vor [126], aber Korrelationen zu Parametern, Materialunterschieden, die Quantifizierung von Randbedingungen und die Unterschiede zwischen Kamera und Photodiode sind unzureichend abgebildet.

**Software-Lösung für Datenauswertung:** Dem Autor sind keine kommerziellen oder wissenschaftlichen Software-Lösungen zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung bekannt, welche solide automatisierte Datenauswertung zur Detektion von Fehlstellen ermöglichen.

**Echtzeit Regelung:** Zwar wurden wiederholt Ergebnisse von Forschungsgruppen veröffentlicht bei denen Echtzeit-Regelungen aufgebaut wurden 2.4.4.3. Aber eine einsatzfähige Echtzeit-Regelung ist dem Autor noch nicht bekannt. Zusätzlich ist bei den gezeigten Ergebnissen zur Regelung im Fall der Oberflächenrauheit keine präzise Analyse der Bauteildichte bzw. Bauteilqualität gezeigt. Ebenso werden bei dem zweiten Fall der erfolgreichen Regelung aufgebaute Überhänge gezeigt, deren Dichte nicht analysiert wurde.



### 3 Werkstoffe, Anlagentechnik, experimentelle Methoden und Algorithmen

Dieses Kapitel beinhaltet die Beschreibung und Auswahl der verwendeten Pulverwerkstoffe, sowie Prüfungsmethoden zur Anlagentechnik. Zur Prozesscharakterisierung dient die hier beschriebene Fehleranalyse zu gewonnenen Schichtbildern der lateralen Prozessüberwachung. Die dafür notwendigen Methoden der Bildverarbeitung werden in Abschnitt 3.3 beschrieben. Die Analyse dient als Basis für die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung. Die Untersuchungen zur koaxialen Sensorik betrachten die Variation von Prozess-Parametern bei Einzelspuren mit variierenden Werkstoffen, Partikelgrößenverteilungen, bei Wänden und Volumenkörpern, auf Testgeometrien, sowie unter Berücksichtigung der Scan-Trajektorien-Richtung und Position. Damit ist eine quantitative Untersuchung der physikalischen Einflüsse auf die koaxial detektierbare thermische Strahlung durch die gegebene Sensorik möglich. Mit diesem Signalverständnis werden vier Methoden zur Entwicklung von Anwendungsmöglichkeiten untersucht.

4) Vorgehen & Methoden	
4.1) Werkstoffauswahl	4.1.1) Werkstoffauswahl, 4.1.2) Pulver-Charakterisierung
4.2) Anlagentechnik & -prüfung	4.2) System: Concept Laser GmbH M2 4.2.1)-4) Optik: Strahlkaustik, Laserleistung, Scanner-Justierung
4.3) Prozessfehleranalyse der lateralen Prozessüberwachung	4.3.1)-3) Lateralen Prozessüberwachung: Systemcharakterisierung, Fehlerbild-Klassifizierung, Klassifizierungs-Algorithmus 4.3.4)-5) Untersuchungs-Baujobs für Prototyping und Serienbauteile
4.4) – 7) Charakterisierung, experimentelle Methoden & Algorithmen zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung	4.4) Systemcharakterisierung: Abbildung, Datenstruktur & -handling 4.5) Signalverständnis & Einzelspurversuche 4.6) Defekterzeugung & Detektion 4.7) Anwendungsentwicklung: Statistische Prozesskontrolle, Scan-Strategie-, Überhang-Optimierung, Detektion & Laserpolieren von Spritzern- & Topographie

Bild 12: Struktogramm des Kapitels Werkstoffe, Anlagentechnik, experimentelle Methoden und Algorithmen.

#### 3.1 Werkstoffe

Die Materialauswahl wird aufgrund von Materialeigenschaften und deren Einfluss auf koaxial beobachtbare Signaturen getroffen und wird im folgenden Abschnitt dargestellt. Im Anschluss werden Charakterisierungs-Methoden

für Pulverwerkstoffe beschrieben die für die Erstellung von Datenbanken sinnvoll erscheinen, weil deren Einfluss auf den LSS-M Prozess noch nicht abschließend geklärt ist.

### 3.1.1 Werkstoffauswahl

Als Vorauswahl für Materialien werden diejenigen bewertet, die bereits wissenschaftlich untersucht sind, um eine grundsätzliche Verarbeitbarkeit sicherzustellen. Um die konkrete Auswahl der Werkstoffe vorzunehmen, werden diese Materialien mit der Werkstoff-Simulations-Software JMatPro (Matplus GmbH) analysiert, um die temperaturabhängigen Eigenschaften Dichte  $\rho$ , thermische Leitfähigkeit  $\kappa$ , spezifische Wärmekapazität  $c$  und Oberflächenspannung  $\gamma$  zu ermitteln. Die Vorauswahl beschränkt sich auf die Edelstähle 1.4404 und 1.4542, den Werkzeugstahl 1.2709 und die Aluminiumlegierung AlSi10Mg. Flüssige Metalle zeigen niedrige Viskositätswerte zwischen  $\eta \approx 1$  bis 5 mPa·s und dabei ebenfalls hohe Oberflächenspannungs-Werte zwischen  $\gamma \approx 400$  bis 2000 mN/m [127], wodurch das Abkühlverhalten und die Schmelzbad-Form im Zusammenspiel mit temperaturabhängiger Schmelzbad-Dynamik beeinflusst werden. Hier wird der Temperaturbereich zwischen 0 und 4000 ° K betrachtet, weil durch den in [60] nachgewiesenen Druck der Dampfackel in genannte Schmelzbad-Temperaturen beobachtet wurden [70](Bild 13). Es ist erkennbar, dass sich AlSi10Mg und die Stahllegierungen stark unterscheiden und aufgrund dieser Unterschiede eine geeignete Auswahl zur Untersuchung einer Schmelzbad-Überwachung darstellen:

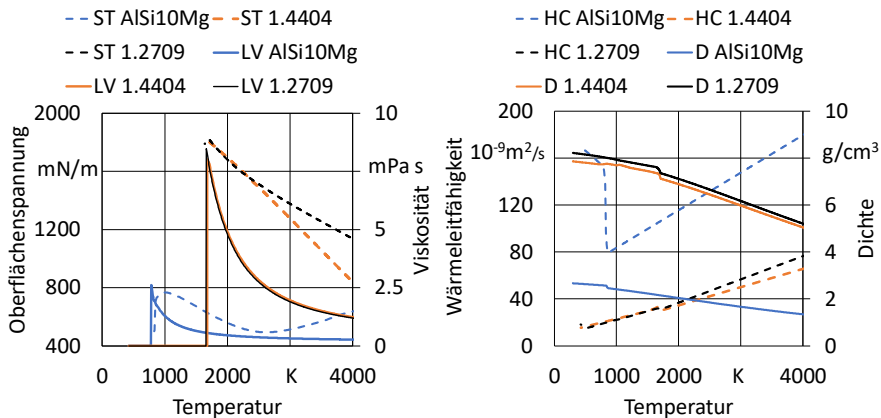


Bild 13: Materialeigenschaften errechnet mit der Software JMatPro (Matplus GmbH): Viskosität (LV), Oberflächenspannung (ST), Wärmeleitfähigkeit (HC), Dichte (D).

**1. Oberflächenspannung und Viskosität:** Die Oberflächenspannung von AlSi10Mg zeigt ein Maximum bei 1000 K mit einem Maximalwert bei 766 mN/m, während die Stähle ein Maximum bei 1802 mN/m erreichen. Ein ähnlich starker Unterschied zeigt sich beim Vergleich der Maxima der **Viskosität:** AlSi10Mg mit 2.61 und 1.2709 mit 8.48 mPa s. Daher ist bei Stählen von einer geringeren Benetzungsfähigkeit und einer größeren Neigung zum Balling auszugehen.

**2. Wärmeleitfähigkeit:** Trotz eines stark ausgeprägten Minimums bei der Liquidus-Temperatur zeigt AlSi10Mg stets die doppelte Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu den betrachteten Stählen. Entsprechend ist eine niedrige Wärmeakkumulation in Bauteilen und bei der Beobachtung von nebeneinander belichteten Vektoren zu erwarten. Weiter kann die in das umgebende Pulver abgegebene Wärme neben oder unterhalb von Scan-Pfaden zusammen mit der Pulverpackungsdichte Auswirkungen auf das Schmelzbad zeigen. Dies soll anhand der Variation der Partikelgrößenverteilung für den Werkstoff AlSi10Mg untersucht werden.

**3. Dichte:** Die Dichteunterschiede sind für die Fertigung von Überhängen relevant, weil zusammen mit der Viskosität die von der Gravitation getriebene Neigung der flüssigen Schmelze zum Einsacken in das Pulverbett verantwortlich ist.

### 3.1.2 Charakterisierung metallischer Pulverwerkstoffe

Hier werden messtechnische Größen und Methoden zur Charakterisierung metallischer Pulverwerkstoffe vorgestellt. Weil der Fokus dieser Arbeit nicht die Untersuchung der Pulverwerkstoffe betrifft, werden aus Gründen der Reproduzierbarkeit im Anhang gemessene Größen in Tabelle 115 dargestellt und mit der Übersichtstabelle 5 die verwendeten Methoden genannt.

**Dichte:** Die Dichte der Pulverwerkstoffe variiert bei Verdünnungsverfahren aufgrund von Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung und resultierenden Gaseinschlüssen, weshalb eine Eingangskontrolle ratsam ist. Ein geeignetes Messverfahren ist die He-Pyknometrie und für Stichproben ebenso die Anfertigung von Schliffbildern. Die gemessenen Dichtewerte sind in Tabelle 1 gezeigt und es wird deutlich, dass aufgrund der normgerechten Elementverteilungs-Toleranzen große Abweichungen von über 10 % (siehe 1.4057) auftreten.

**Thermische Leitfähigkeit:** Das LSS ist ein Wärmeleitungsschweiß-Prozess [54] und hängt daher von der thermischen Leitfähigkeit des Werkstoffs ab [128]. Die temperaturabhängige Leitfähigkeit von Pulvern wird durch die Packungsdichte und Morphologie des Pulvers, sowie die Leitfähigkeit des Gases zwischen den Partikeln beeinflusst [129]. Eine Evaluierung wird hier

Material	Theoretische Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Gemessene Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
AlSi10Mg	2.68	2.6477(0.0006)
1.4404	8.0	7.9209(0.0011)
1.4542	7.8	7.6142(0.0009)
1.2709	8.0	7.9983(0.0008)
1.4057	7.0	7.7352(0.0018)

Tabelle 1: Mittels He-Pyknometrie (AccuPyc II 1340 V1, Micromeritics Instrument Corp.) gemessene Dichte von verwendeten Pulverwerkstoffen, jeweils n=10 und Standard-Abweichung in Klammern.

nicht durchgeführt, weil die Modifikation der Pulverwerkstoffe nicht im Fokus dieser Arbeit steht und diese nur für eine Versuchsreihe, siehe Abschnitt 3.6, modifiziert werden. Die thermische Leitfähigkeit von Pulverwerkstoffen unterscheidet sich von der des Vollmaterials im Fall von Edelstahl 1.4404 um 3 Größenordnungen 13.4 zu 0.03 W/mK [130] und zeigt hier bei dem verwendeten Normaldruck (1 bar) bis 430 K keine Temperaturabhängigkeit [130].

**Sphärizität:** Generelle Anforderungen an Pulverwerkstoffe sind eine hohe Packungsdichte und gute Fließeigenschaften [131]. Beides wird durch sphärische Partikel und bimodale Partikelgrößen-Verteilungen erreicht [132]. Die statische und die dynamische Bildanalyse ermöglichen die Untersuchung der Sphärizität von Partikeln, welche über die mittlere Rundheit beschrieben wird: Sphärizität =  $\frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{U^2}$ , wobei  $A_p$  die telezentrisch projizierte Fläche des Partikels auf die Kamera-Sensorfläche beschreibt und  $U$  den ermittelten Partikelumfang darstellt.

**Partikelgrößenverteilung:** Die Partikelgrößenverteilung (PGV) lässt sich mit zertifizierten Methoden auf Basis der dynamischen Bildanalyse, der Laserbeugung, der statischen Bildanalyse oder durch Siebung bestimmen. Spierings *et al.* [133] konnten zeigen, dass ein Feinanteil bei Edelstahl-Pulverwerkstoffen hilfreich ist um die relative Dichte, die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächengüte zu optimieren. Große Partikel verlangen eine höhere Energie für das Aufschmelzen [134] und bestimmen die minimale Schichtdicke. Außerdem wirken sie sich laut [133] positiv auf die Streckgrenze von Bauteilen aus. Breite PGVn wirken sich vorteilhaft auf die Pulverbett-dichte aus, weil kleine Partikel die Lücken zwischen den großen Partikeln schließen. Speziell bimodale PGV ermöglichen Packungsdichten von bis zu 84 % [135].

**Fließfähigkeit und Schüttdichte:** Die Fließfähigkeit beeinflusst den Pulverauftrag [131] und folglich die Packungsdichte im Pulverbett [136]. Dadurch beeinflusst sie direkt die mechanischen Eigenschaften und die Prozessstabilität.

**Feuchtigkeit:** Durch die große Oberfläche von Pulverwerkstoffen wird Wasser aus der Luft leicht adsorbiert, was bei reaktiven Materialien zur Bildung von Oxiden und Hydroxiden führt. Beide beeinflussen die Absorption der Laserstrahlung [137], sowie die Erstarrung und begünstigen die Ausbildung von porösen oder spröden Strukturen [134]. Li *et al.* untersuchten die Trocknung von Al-12Si [138] und konnten dabei mittels Röntgen Spektroskopie feststellen, dass Aluminium-Karbonat Hydroxid durch das Trocknen verdrängt werden konnte. Feuchte Pulverwerkstoffe verschlechtern zudem die Fließfähigkeit im Prozess [128].

**Chemische Eigenschaften:** Neben der Elementhäufigkeit eines Materials wirken sich Oxide und adsorbierte Gase [128] negativ auf den Prozess aus, weil diese Gasporen im Gefüge ausbilden [137]. Diese Verunreinigungen beeinflussen die Erstarrung und die mechanischen Eigenschaften negativ [139].

**Optische Eigenschaften:** Die wellenlängenabhängige Absorption der Laserstrahlung bestimmt die Einkopplung und den Wirkungsgrad. Sie werden durch Bildung einer Oxidschicht reduziert [128]. Die Absorption im Pulverbett ist beim Einkoppeln der Laserstrahlung am Anfang eines Scanpfads aufgrund der Mehrfachreflexion erhöht, danach werden über 60 % der Strahlung von der flüssigen Phase absorbiert [60].

### 3.2 Charakterisierung der Anlagenoptik

In der laserbasierten Fertigung sind Verfahren zur Prüfung der Kollimation des Laserstrahls, der Laserleistung und der Strahlführung notwendig, um die Prozessfähigkeit von Anlagen sicherzustellen. Für das Laserstrahlschmelzen sind spezielle Methoden zur Anwendung in der Prozesskammer notwendig, die hier bezüglich der Messmittelfähigkeit untersucht werden. Die regelmäßige Prüfung der Anlagenoptik wird hierbei als Grundlage für die durchgeführten Experimente angesehen. Die verwendete LSS-Serienanlage M2 des Herstellers Concept Laser GmbH wird im Originalzustand verwendet. Die Anlage ist mit zwei 400 W Lasersystemen (IPG YLR 400 ac) der Fa. IPG Photonics ausgestattet, die separate Optiken verwenden und bei einer Brennweite von  $f = 490\text{mm}$  jeweils den gesamten Bauraum mit Laserspot-Durchmessern zwischen 50 und 500  $\mu\text{m}$  belichten können. Als Scanner kommen die Systeme Intelliscan 30 und Varioscan 40i der Fa. Scanlab GmbH zum Einsatz. Der Bauraum verwendet eine quadratische Bauplattform mit 250 mm Kantenlänge. Die Anlage verfügt über die Monitoring-Systeme QM-Coating und QM-Meltpool die später erläutert, untersucht und

mittels Algorithmen weiterentwickelt werden. Bild 14 veranschaulicht das Laserstrahl-Schmelz-Prinzip und zeigt den Parameter-Raum der Anlagen.

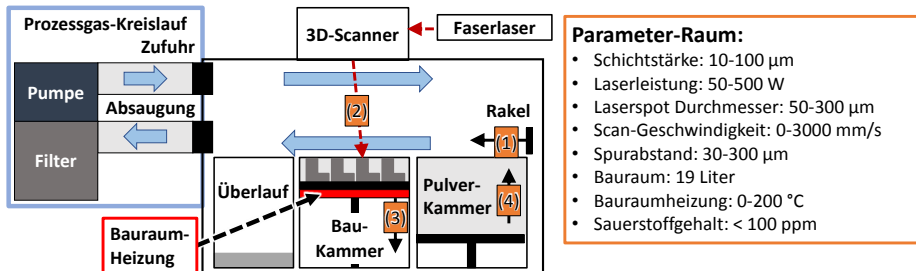


Bild 14: Funktionsprinzip Laserstrahl-Schmelzen mit Pulvervorrats-Zylinder-Beschichter-System. Nach dem Beschichten (1) folgt das selektive Aufschmelzen (2) und das Absenken der Bauplattform (3). Die Pulvervorratskammer wird angehoben (4).

### 3.2.1 Strahlkaustik

Die in dieser Arbeit verwendeten 400 Watt Ytterbium-YAG Faserlaser des Herstellers IPG [83] emittieren bei 1070 nm in guter Näherung in der Laguerre-Gauß Grundmode  $\text{TEM}_{00}$ , so dass ein Gaußsches Strahlprofil angenommen werden kann (siehe Anhang 18). Die Messung der Strahlkaustik wird mit einem Focus Beam Profiler der Fa. Cinogy GmbH durchgeführt. Dabei wird über mehrere wassergekühlte Spiegel der senkrecht einfallende Laserstrahl um den Faktor  $10^{-7}$  abgeschwächt und mit einem wassergekühlten CMOS-Sensor detektiert [140]. Durch die Bewegung der z-Achse entlang der optischen Achse wird die Kaustik vermessen. Bei den Messungen der Strahlkaustik wurden bei 24 unabhängigen Messungen der Beugungsmaßzahl zu unterschiedlichen Zeiten Werte zwischen 1,20 und 2,36 und ein Mittelwert von 1,57(0,26) ermittelt. Werte über 1,5 wurden nicht akzeptiert und durch Service-Einsätze durch den Anlagenhersteller korrigiert. Die Ursache geht auf eine falsche Justierung der optischen Komponenten oder durch Verunreinigungen zurück. Die Prüfung der Strahlkaustik dient als Früherkennungs-Werkzeug und schützt Beschädigungen des Systems.

### 3.2.2 Laserleistungsmessung

Die Leistungsmessung beim LSS erfolgt durch Systeme die mittels Strahlteiler einen Teilstrahl überwachen [141, 101]. Dieses Vorgehen ist hilfreich um Schwankungen der Laserleistung im Prozess zu überwachen. Um Verschmutzung, Verschleiß oder andere Einflüsse auf den Strahlengang zu prüfen, muss eine Prüfung im Bauraum erfolgen. Hier wird das Laserleistungsmessgerät

Cube der Fa. Primes GmbH verwendet, das für den begrenzten Raum in LSS-Prozesskammern ausgelegt ist [142]. Durch ein Mikrolinsen-Array ist ein Laserstrahl-Einfallswinkel von bis zu  $20^\circ$  erlaubt, damit eine Laserleistungsmessung an verschiedenen Positionen im Bauraum ermöglicht wird (Bild 110 im Anhang). Die Ergebnisse zeigen, siehe Bild 119 im Anhang, dass die Laserleistungen an fünf gemessenen Positionen, in den Ecken und im Zentrum, weniger als 5 % um den eingestellten Wert schwanken, was als akzeptabel eingestuft wird.

### 3.2.3 Prozess-Parameter für das Prozess-Toleranzband

Um die für die Prozessstabilität notwendige Messmittelfähigkeit der oben beschriebenen Geräte und die vom Hersteller angegebene Toleranz zu prüfen werden horizontal aufgebaute Norm-Zugproben, Form B [143], mit variierten Prozess-Parametern, je  $n=3$ , aus dem Edelstahl 1.4404 untersucht. Dabei werden die Grenzen der Prozess-Parameter für die Prozess-Toleranzen geprüft, indem Laserleistung und Laserspot-Durchmesser eines Standard-Parametersatzes variiert werden. Die Variationen sind durch die 0.2 mm Toleranz der Fokusalagen-Einstellung des Herstellers via Reflexionsmethode festgelegten  $5\ \mu\text{m}$  und die  $3\ \mu\text{m}$  durch die Messungenauigkeit des Beam-Profilers [140] vorgeben. Der Einfluss der Laserleistung wird mit der drei prozentigen Abweichung durch das Messgerät [142] und weitere 10 und 25 % Variationen geprüft. Die Ergebnisse der Zugprüfung und der Oberflächenevaluierung mittels Konfokal-Mikroskop werden auf Bild 15 gezeigt.

Weil für die unteren Toleranzbänder zur Leistungsmessung, P2 und P3, sowie zur Spotgröße, S7 und S8, die Zugfestigkeit über dem Richtwert von 650 MPa [144], der arithmetische Mittenrauwert beinahe konstant bei  $R_a = 5,5\ \mu\text{m}$  und die relativen Dichte-Werte stets oberhalb von 99,5 % liegen [144], sind die Messmittel geeignet die verwendeten Prozess-Parameter Laserleistung und Laserspot-Durchmesser zu prüfen.

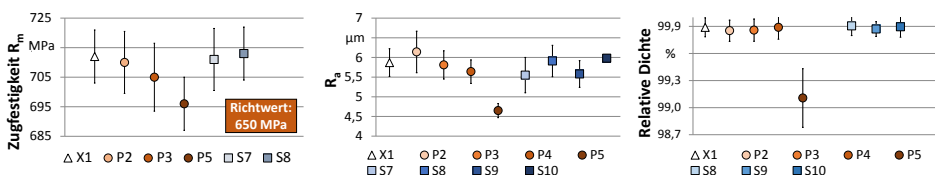


Bild 15: Laserstrahl-Toleranzband ohne signifikante Änderung: X1 Standard-Parametersatz; Leistungsveränderung: P2 +3 % / P3: -3 % / P4: -10 % / P5: -25 %; Spotgrößenvariation: S7: +5  $\mu\text{m}$  / S8: -5  $\mu\text{m}$  / S9: +10  $\mu\text{m}$  / S10: -10  $\mu\text{m}$ ; a) Zugfestigkeit von zylindrischen Normproben [143], b) Oberflächenrauheit von Testwürfeln, c) Rel. Dichte aus Schlibbildern [S10].

### 3.2.4 Feldentzerrung des Galvanometer-Scanners

Galvanometer-Scanner arbeiten mit zwei verkippten, rotierenden Spiegeln zur Positionierung des Laserspots auf einem Werkstück oder im Fall von LSS-Anlagen auf einer ebenen Fläche. Weil aufgrund des Weglängenunterschieds durch den optischen Abbildungsfehler Verzeichnung eine kissenförmige Abbildung entsteht, wird dieser Effekt bestmöglich durch eine Kalibrierung des Scanners ausgeglichen [145]. Weiter verfügen Multilaser-Systeme über mehrere Scanner die in überlappenden Bereichen des Bauraums verwendet werden und zur effizienten Fertigung von Bauteilen gleichzeitig an Bauteilen arbeiten. Weil die Software des Anlagenherstellers nicht für

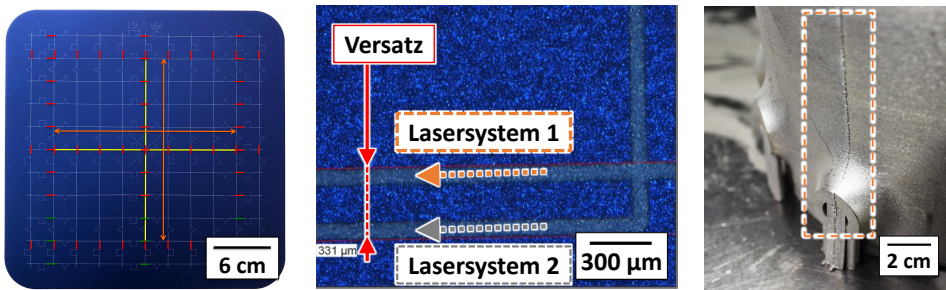


Bild 16: Scanner-Skalierungs-Prüfung: a) Belichtetes Prüfmuster in der Prüfsoftware, b) Versatz zwischen Lasersystemen  $> 300 \mu\text{m}$ , c) Versatz-Beispiel mit Abweichung  $> 300 \mu\text{m}$  [Sio].

den Anwender freigegeben ist, wird ein eigenes Verfahren entwickelt. Zur Prüfung der Bildfeldkalibrierung und Verdrehung der Systeme zueinander werden Belichtungsmuster auf eloxierten Platten eingebrannt, welche zuvor auf der Bauplattform positioniert werden. In einer anschließenden Untersuchung mittels Lichtmikroskop werden die Abstände zwischen Laserspuren und deren Dicke bewertet. Um die Kalibrierung der Scannersysteme für sich und zueinander zu prüfen wird hier ein indirektes Messverfahren verwendet, bei dem beide optischen Systeme ein Muster auf einer eloxierten Aluminium-Platte belichten, wobei durch Muster die Zuordnung der Lasersysteme erreicht wird. Bild 16 zeigt das belichtete Prüfmuster auf einer blau-eloxierten Aluminium-Prüfplatte, zum Vergleich den virtuellen Prüfmuster-Entwurf, einen mikroskopierten Ausschnitt mit Versatz zwischen zwei belichteten Strecken und ein mit dejustierten Scannern hergestelltes Bauteil. Durch falsche Justierung können bei Bauteilen, welche zur beschleunigten Fertigung mit mehreren Lasersystemen hergestellt werden, Versatzlinien auf der Bauteilkontur auftreten die in der Größenordnung von mehreren als  $100 \mu\text{m}$  liegen.

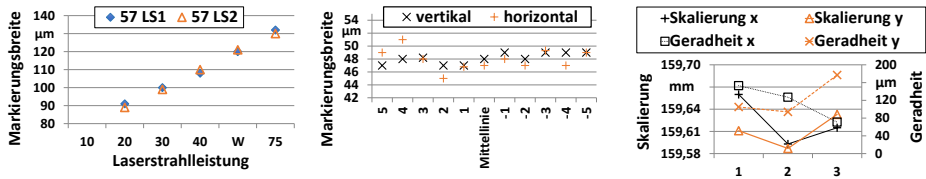


Bild 17: Ergebnisse der Scanner-Skalierungs-Prüfung: a) Linear mit Laserleistung skalierende Markierungsbreite; b) Positionsabhängige Markierungsbreite; c) Skalierung und Geradheit von drei unabhängigen Prüfmustern [Sto].

Um die Skalierung zu bewerten, wird die durch die Laserstrahlung erzeugten Spurbreite auf der eloxierten Testplatte vermessen. Bild 17 zeigt die Markierungsbreite in Abhängigkeit der Laserleistung und reproduziert das erwartete lineare Verhältnis. Die geringste Spurbreite bei 20 W Laserleistung liegt bei 89 und 91  $\mu\text{m}$  für Lasersystem 2 und 1. Die Standardabweichung beträgt 1.4  $\mu\text{m}$  und die maximale Abweichung vom Mittelwert 2  $\mu\text{m}$ . Die Positionsabhängigkeit der Spurbreite wird an den vertikalen Linien des Prüfmusters untersucht. Die minimale Markierungsbreite beträgt 51  $\mu\text{m}$  und die Standardabweichung der gemessenen Spurbreiten beträgt 1.2  $\mu\text{m}$  und ist kleiner als die Messabweichung von 1.4, weshalb der Einfluss des Laserstrahl-Auslenkungswinkels auf die Spurbreite vernachlässigbar ist.

Für die theoretische Präzision zur Prüfung des Offsets und der Skalierung wurde 17  $\mu\text{m}$  gemessen. Für die gemessene Wiederholgenauigkeit des Scanners werden im Mittel über drei Versuchsreihen 66  $\mu\text{m}$  der maximale Offset mit 47  $\mu\text{m}$  gemessen. Bei der Prüfung der Linearität wird eine Streubreite von 83  $\mu\text{m}$  gemessen. Die vom Hersteller angegebene Wiederholgenauigkeit des Scanners von maximal 1  $\mu\text{m}$  wird nicht erreicht.

### 3.3 Produktionsfehleranalyse mittels lateraler Prozessüberwachung

Um die Häufigkeit und Relevanz von Fehlerbildern beim LSS zu erfassen, werden Serien- und Prototypen-Baujobs untersucht, die mit gleichen Parametern aufgebaut werden. Mit dieser Daten-Grundlage lassen sich Fehlerklassen definieren und deren Signifikanz auf die Prozessstabilität einordnen, damit die Untersuchungen zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung zielgerichtet ausgelegt werden. Für die Untersuchung wird die laterale PÜ herangezogen, weil die schichtweise Betrachtung des Pulverbetts frühe Erkenntnisse zum Ablauf einzelner Fehlerbilder liefert und qualitativ interpretierbar ist. Weiter werden Schliffbild-Analysen durchgeführt, um die Porosität als Prozessfehler zu untersuchen. Außerdem wird die Rauheit von Bauteilen untersucht.

Die notwendigen Methoden, Algorithmen und Baujob-Rahmenbedingungen werden hier erläutert.

### 3.3.1 Laterale Prozessüberwachung: Systembeschreibung

Wie aus dem Stand der Technik hervorgeht bietet die Kamera-basierte laterale PÜ vor und nach dem Schichtauftrag eine Möglichkeit zur Abbildung des Pulverbetts. Zuerst wird hier das System und dann eine Fehlerbild-Klassifizierung vorgestellt, mit deren Hilfe ein Klassifizierungs-Algorithmus programmiert und zur Untersuchung von Baujobs herangezogen wird.

#### 3.3.1.1 Systemcharakterisierung

Das Kamera-basierte System zur lateralen Pulverbett-Überwachung QM-Coating (Bild 18, Tabelle 2), ermöglicht die automatische Abbildung der gesamten Bauplattform vor und nach dem Beschichtungsprozess, sowie manuell ausgelöste Aufnahmen zu beliebiger Zeit. Durch die Auflösung der CCD-Kamera von 2452 x 2056 px und die Auslegung der Optik ohne Zwischenringe und Tilt-Shift-Optik, ergibt sich ein verzerrtes Bild und ein Rand um die Bauplattform, so dass diese nur eine Sensorfläche von 1530 x 1390 px einnimmt. Das Abbildungsverhältnis  $\beta$ , das an einem 5 mm Target in den vier Ecken der Bauplattform mittels 160 Messwerten gemessen wurde, berechnet sich zu:

$$\bar{\beta} = \frac{l}{\bar{x}} = \frac{5000 \mu\text{m}}{31,83 \text{ px}} = 138,9 \mu\text{m/px}; \quad (4)$$

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial x} \cdot \Delta x = \frac{5000 \mu\text{m}}{31,83^2 \text{ px}} \cdot 3,62 = 17,9; \quad (5)$$

$$\beta = 139 \pm 18 \mu\text{m/px}; \quad (6)$$



Bild 18: Aufbau laterale Kameraüberwachung QM-Coating: a) Schema und Probleme (rot); b) Innenansicht der Prozesskammerdecke (links) und Außenansicht (rechts).

Die verwendete LED-Balkenbeleuchtung sorgt für eine inhomogene Ausleuchtung, weshalb Bildverarbeitungsalgorithmen keine einheitlichen Kontrast-, Form- oder Filtereinstellungen verwenden können, was deren Ausle-

Komponente	Hersteller-Typ	Spezifikation
CCD	Allied Vision AV STINGRAY-II F-504B	2452 x 2056 px, Format: 2/3"
Objektiv	QIOptic-Linos-Mevis -C-Mount	f: 12 mm, k: 10
Filter	Schneider Kreuznach-465-70 HT	440-490 nm
Balken-LED	CCS LDL2-197/16-BL2-WD	467 nm, $\Omega=40^\circ$

Tabelle 2: Komponenten der lateralen Kamera-Prozessüberwachung QM-Coating (Fa. Concept-Laser GmbH).

gung und Präzision erschwert. Bild 19 zeigt eine ausgeschnittene Aufnahme der Bauplattform mit farbig markierten Teststellen, deren Flächen im Histogramm auf Bild 19 verglichen werden. Es ist klar erkennbar, dass die Helligkeit der orangenen und der hellblauen Fläche auf der rechten Bildseite signifikante Helligkeitsunterschiede aufweisen. Unten zeigt Bild 19 einen Ausschnitt einer Aufnahme nach dem Belichten mit deutlich überbelichteten Bereichen, wodurch der Informationsgehalt der Aufnahme reduziert wird.

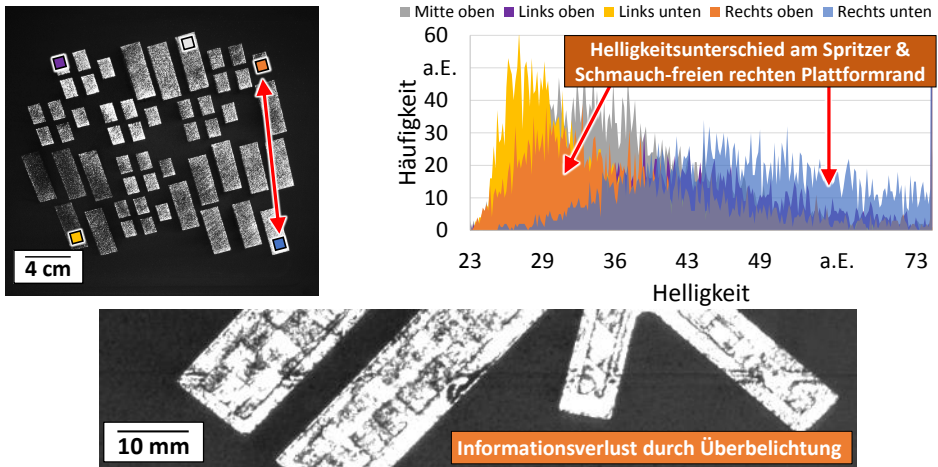


Bild 19: a) Inhomogene Beleuchtung einer belichteten Schicht mit markierten Bereichen deren Helligkeitshistogramm in b) dargestellt ist. Die mittels rotem Pfeil verbundenen orangenen und blauen Bereiche a) und Helligkeitsdaten b) auf der rechten Seite der Bauplattform sind nicht von Spritzern oder Schmauch bedeckt und sollten im Idealfall homogene Helligkeitsverteilungen zeigen. c) Informationsverlust durch überbelichtete Bereiche der Abbildung nach der Belichtung.

### 3.3.2 Manuelle Klassifizierung von Fehlerbildern

Hier werden aufgenommene Fehlerbildtypen vorgestellt. Durch die Adsorption des Wassers aus der Luft verlieren vor allem reaktive Materialien wie  $AlSi10Mg$  an Fließfähigkeit, wodurch das Aufschmelzverhalten gestört wird. Schliffbilder von Testkörpern zeigen außerdem deutliche Gas-Einschlüsse bei feuchtem Pulvermaterial [S5]. Mit dem Kamerasystem ist es möglich, feuchtes Pulver zu erfassen, weil der Reflexionskoeffizient variiert und das lateral aufgenommene feuchte Pulver dunkler erscheint (Bild 20).

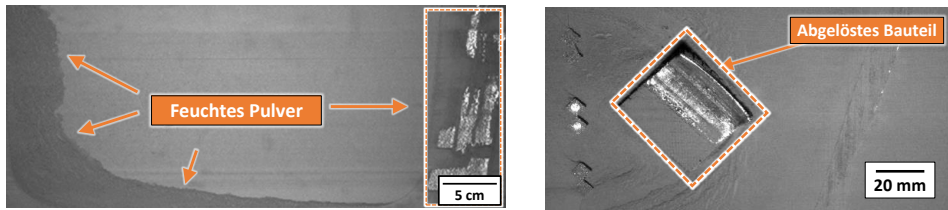


Bild 20: Links: Feuchtes Pulver; rechts: Verzug und abgerissenes Bauteil.

Kommt es aufgrund von thermisch induziertem Verzug, falsch ausgelegten Stützstrukturen und mangelnder Haftung zum Bauteilverzug oder Abreißen von Stützstrukturen, ragen Bauteilkanten oder Bereiche aus dem Pulverbett heraus und werfen Schatten (Bild 20). Durch das Pulverkammer-Vorratszylinder-Konzept können bei unzureichender Verdichtung des Pulvers in der Pulverkammer Lücken auftreten und zu unbeschichteten Bereichen auf der Bauplatzform führen (Bild 21). Die entstehenden Beschichtungskanten mit starkem Kontrast zwischen der neuen Pulverschicht sind deutlich erkennbar.

Durch hohen Energieeintrag, kurze Scanvektoren und damit einhergehenden unregelmäßigen Materialtransport, große PGV und mangelnde Kantenglättung der Konturparameter kommt es zu Gestaltabweichungen der Oberfläche. Sobald diese die Schichtstärke übersteigen, sind helle Flecken nach der Beschichtung erkennbar (Bild 21). In einer stärkeren Ausprägung führen diese Unebenheiten zu einem typischen Fehlerbild für flexible Silikon-Beschicht-erlippen, bei dem helle Flecken parallel zur Beschicht-erlippe auftreten (Bild 21). Die Streifenbildung im Pulverbett durch beschädigte Beschicht-erlippen sind mit der Kamera durch den Schattenwurf deutlich erkennbar (Bild 21).

### 3.3.3 Automatische Klassifizierung von Schichtbildern

Ein Bildverarbeitungsalgorithmus für Inspektion von Schichtbildern beim Laserstrahl-Schmelzen muss folgenden Anforderungen gerecht werden:

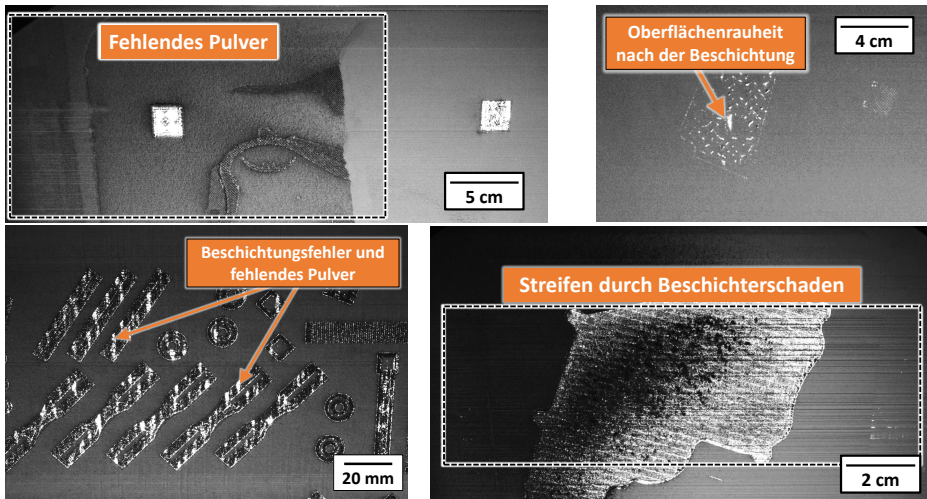


Bild 21: Übersicht 2 zu Prozessfehlern die mit dem lateralen Kamerasystem QM-Coating (CL) aufgenommen wurden.

**Bauteilunabhängig:** Durch die im Prototypenbau stark variierende Zusammenstellung von Bauplattformen muss ein Algorithmus unabhängig von der Bauteilform, -Größe, -Orientierung, -Stützstrukturanbindung arbeiten.

**Materialunabhängig:** Materialabhängige Reflexionseigenschaften verschiedener evtl. wechselnder Werkstoffe sollen durch den Algorithmus automatisch berücksichtigt werden.

**Zeitlicher Rahmen durch Beschichtung:** Die gesamte Beschichtungszeit ist als Auswertungszeit für die Bildverarbeitung verwendbar. Diese wird bei der verwendeten Serienanlage mit minimal 8 Sekunden gemessen.

**Inhomogene Beleuchtung:** Die Prozessüberwachungs-Systeme liefern inhomogen helle Schichtbilder. Durch Filtermethoden wie dem Otsu-Filter [146], können Helligkeitsunterschiede ausgeglichen werden.

**Detektion von klassifizierten Fehlerbildern:** Die oben beschriebenen Fehlerbilder sollen durch den Algorithmus erkannt werden.

Als Beispiellösung wird ein Algorithmus gezeigt, der in der Lage ist helle und dunkle Pixelwerte in einer Umgebung zu detektieren, um deren beider Häufigkeit separat auszugeben. Der Graph auf Bild 22 zeigt, dass Bauteilverzug detektierbar ist. Bis Schicht 184 bleibt die Ausgabe des Algorithmus in einem niedrigen Bereich von maximal 500 gezählten Pixeln. Danach reißt das Bauteil von der Stützstruktur ab und ragt aus dem Pulverbett heraus, was zu einem deutlichen Anstieg führt der bis 8000 gezählte Pixel reicht. Der Algorithmus kann jedoch nicht global verwendet werden, weil die starken Helligkeitsunterschiede aufgrund der inhomogenen Beleuchtung zu

einer unbrauchbaren Fehlerrate führen, so dass keine quantitative Bewertung der Rauheit möglich ist. Daher konzentrieren sich die später vorgestellten Arbeiten auf die Klassifikation von Fehlerbildern.

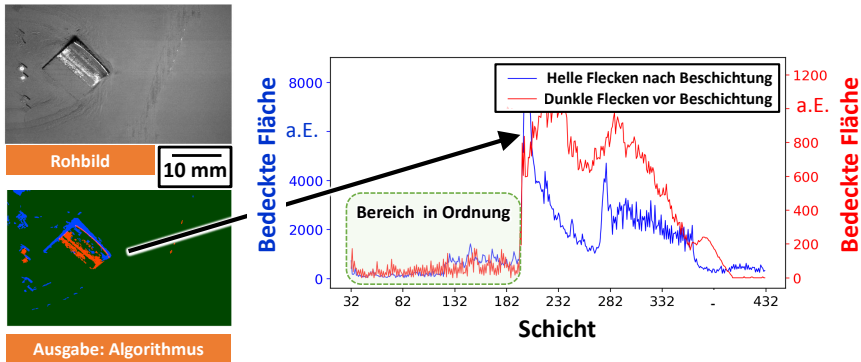


Bild 22: Grundlagen-Algorithmus für die laterale Prozessbeobachtung.

Die hohe Anzahl an Schichtbildern ermöglicht es in Verbindung mit einer Fehlerklassifizierung Algorithmen zu entwickeln. Zur Klassifikation von Bildinformationen eignen sich insbesondere Algorithmen aus der Gruppe des Maschinellen Lernens, bei dem in der Ausprägung des *überwachten Lernens*, Daten oder Regeln zum Training eines Modells vorgegeben werden. Eine bewährte Methode für die Bild-Erkennung stellen Faltungsbasierte Neuronale Netzwerke (FNN) dar [147] zu denen hier Rahmenbedingungen und Begriffe erläutert werden:

**Software-Umgebung:** Das Modell zur Klassifizierung wird mittels Python (Version 3.6.5), die Implementierung mittels Keras und den Bibliotheken Tensorflow (Version 1.9.0), SkikitLearn programmiert.

**Fully Connected Network (FCN):** Bei einem FCN werden die Knotenpunkte einer Ebene mit allen Knotenpunkten der darauffolgenden Ebene verbunden und jede Verbindung gewichtet. Die Gewichtung jeder Verbindung erfolgt während des Trainings, so dass eine hohe Rechenleistung erforderlich ist.

**Convolutional Neural Network (FNN):** FNN eignen sich im Gegensatz zu FCNs zum Erkennen räumlicher Information und nicht nur zur bloßen Klassifizierung, weil die Bilddaten in den Faltungsebenen in virtuelle Teilbilder aufgeteilt werden. Am Ende einer FNN-Ebene werden FCNs eingesetzt um die Klassifizierung vorzunehmen.

**Faltungsschicht:** Bei der Verarbeitung in Faltungsschichten, wird eine diskrete Faltung mit einem Filter einstellbarer Größe auf die Bilddaten oder

Daten-Matrizen berechnet. Das Ergebnis wird an eine Poolingschicht weitergereicht.

**Poolingschicht:** Durch das Pooling werden entweder die maximalen Werte einer beliebig definierten Nachbarschaft entnommen (Max-Pooling) oder der Durchschnittswert (Average-Pooling). Dadurch wird eine starke Reduktion der Variablen erreicht, was durch eine Vielzahl an Kombinationen aus Faltungs- und Poolingschichten verstärkt wird.

**Aktivierungsschicht:** Durch Aktivierungsschichten die nach den Faltungsschichten verwendet werden,

**Rectified Linear Unit (ReLU):** Als Aktivierungsfunktion wird die Rectified Linear Unit-Funktion (ReLU) verwendet.

**Softmax-Funktion:** Durch die Softmax-Funktion, eine Aktivierungs-Funktion, wird die Zuordnung der letzten Klassifizierungs-Schicht des FCNs mit Wahrscheinlichkeiten dargestellt die normalisiert sind [148].

Die Architektur des FNN ist in Bild 23 dargestellt und beinhaltet zwei Faltungs- und Pooling-Schichten, ein FCN mit 64 Schichten und eine Softmax-basierte Klassifizierungs-Schicht mit 6 Klassen. Die Anzahl der Klassen orientiert sich an der manuellen Fehlerklassifizierung und beinhaltet die fünf Fälle: Fehlendes Pulver, Verzug und Ablösen, Oberflächenrauheit, Beschichtungsstreifen, Fehlerfreie Beschichtung.

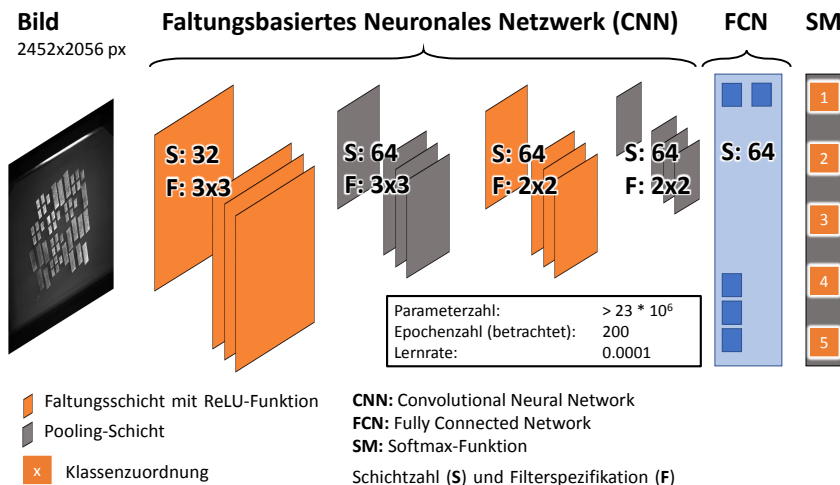


Bild 23: CNN Algorithmus zur Schichtbildauswertung bei der Prozessfehler-Analyse mit der lateralen PÜ.

Für das Training des Modells werden zu jeder Fehlerklasse manuell mindestens 400 Bilder die nach der Beschichtung aufgenommen wurden sortiert.

Zusätzlich werden die Beispielbilder mittels Helligkeitsschwellwert verdunkelt und aufgehellt, wodurch der Datensatz vergrößert und das trainierte Modell gegenüber Helligkeitsschwankungen stabilisiert wird, die durch äußere Einflüsse erzeugt werden können. Die verwendeten Hyperparameter lauten: Lernrate: 0.0001, Epochenzahl: 200, Batch-Größe: 32. Das Modell erreicht eine Genauigkeit von 96,89 % und eine Validierungs-Genauigkeit von 96,05 % was aufgrund der einfachen Betrachtung mit sich überlagernden Fehlerbildern als ausreichend eingestuft wird.

### **3.3.4 Fehleranalyse unterschiedlicher Baujobs**

Durch die Analyse von 39 Baujobs mit unterschiedlichen Bauteilen, Nesting-Anordnungen und Materialien wird der untersuchte Ereignisraum größtmöglich gehalten, um ein umfassendes Fehlerspektrum zu betrachten. Weiter kann durch die Abfolge der Fehler und im Zusammenhang mit stattfindenden Abbrüchen eine Bewertung zur Signifikanz von Fehlerbildern aufgestellt werden.

### **3.3.5 Fehleranalyse eines Serienbauteils**

Die zu analysierenden Serienbaujobs aus einer Kleinserie umfassen 56 Bauteile auf 28 Baujobs die auf einer Anlage bei gleichbleibenden Bedingungen gefertigt werden. Bild 24 zeigt eine CAD-Darstellung des Testbauteils mit einer Aufbau-Höhe von 170 mm. Die gezeigte Darstellung soll das Testbauteil visualisieren, die genauen geometrischen Abmessungen sind für die spätere Datenanalyse nicht von Relevanz. Jedes Bauteil wird durch ein separates Lasersystem belichtet. Als Material wird der Edelstahl 1.4404 verwendet, die Schichtstärke beträgt 25  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$  im Kernbereich. Die innen liegenden Kanäle werden ohne Stützstruktur aufgebaut, die Ausleger und Stützen werden durch Stützstrukturen die von der Bauplattform ausgehen gestützt.

## **3.4 Beschreibung des koaxialen Überwachungssystems**

Als Grundlage für die später erfolgenden Experimente werden hier das System zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung 25, typische Abbildungsphänomene und die Datenstruktur erläutert.

### **3.4.1 Systemtechnik**

Der Aufbau des Systems QM-Meltpool3D ist im Bild 25 dargestellt. Der durch den 3D-Galvanometer-Scanner gelenkte Laserstrahl wird durch das Pulver absorbiert und es entsteht ein Temperaturfeld aus dem eine flüssige Schmelze

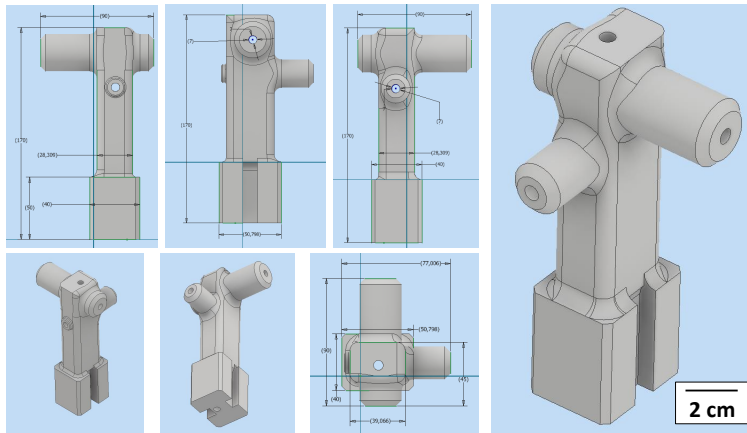


Bild 24: Die Darstellung zeigt eine vereinfachte Visualisierung des Testbauteils welches für die statistische Prozesskontrolle herangezogen wird.

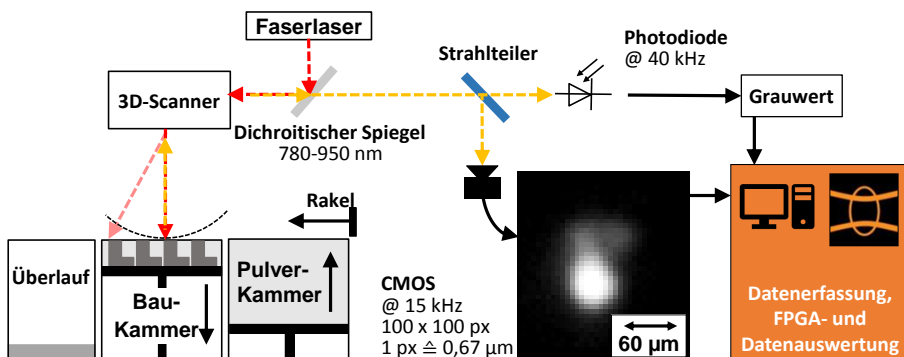


Bild 25: Schmelzbad-Überwachung QM-Meltpool 3D (Fa. Concept-Laser GmbH). Thermische Strahlung der Interaktionszone (gelb) wird emittiert und auf dem Strahlengang des Lasers (rot) durch den dichroitischen Einkopplungsspiegel zur Sensorik transmittiert.

bei 1500-4000 °C [70] resultiert. Die in die Halbkugel emittierte thermische Strahlung wird im begrenzten Raumwinkel-Element durch die Scannerspiegel reflektiert und durch einen dichroitischen Spiegel auf die koaxiale PÜ transmittiert. Diese besteht aus einer Photodiode und einer CMOS-Kamera in zwei optischen Armen, welche durch einen 50/50 Strahlteiler miteinander verbunden sind. Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz liegt das Maximum der emittierten Strahlung des Schmelzbades im Infrarot-Spektrum bei 1000 nm, also nahe der eingestrahnten Laserwellenlänge von 1070 nm. Um die Laserwellenlänge und das Umgebungslicht als Fehlerquelle aus der KSBÜ zu filtern, wird das Signal durch den dichroitischen Spiegel transmittiert, der gleich-

zeitig zur Einkopplung des Lasers verwendet wird. Die Grenzwellenlängen betragen 780 und 950 nm [120]. Für die Auswertung und Reduktion der koaxial aufgenommenen Prozessdaten wird ein Messrechner verwendet. Dieser ist mit der RTC5-Kontrolleinheit des Galvanometer-Scanners verbunden und verwendet **Field Programmable Gate Arrays (FPGA)** zur hardwarenahen und zeitlich synchronisierten Datenaufnahme. Ein Schema der Datenübertragung und des NI-Messrechners mit den NI-Komponenten ist auf Bild 26 abgebildet. Als Sensorik werden eine CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera

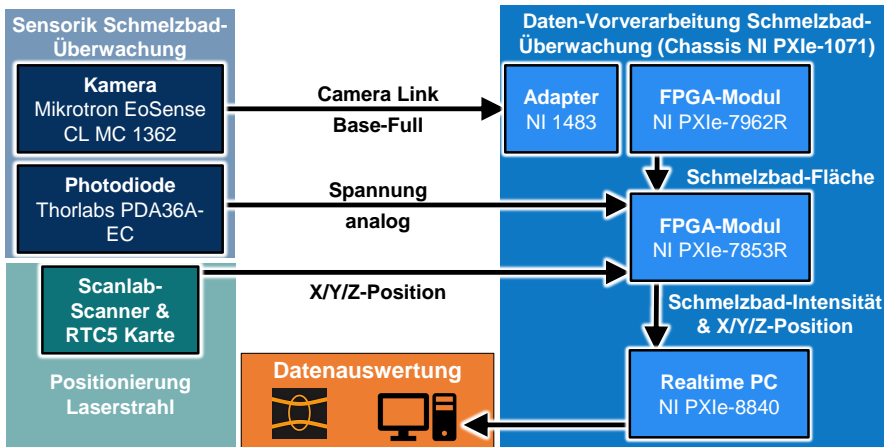


Bild 26: Schema des in der M2 LSS-M Anlage verwendeten Messrechners und der Datenübertragung des Schmelzbad-Überwachungssystems.

(Eosens CL, Fa. Mikrotron GmbH [149], siehe Tabelle 7 im Anhang) und eine Silizium-Photodiode (PDA36A-EC, Thorlabs [150]) mit analog verstellbarer Verstärkung, verwendet. Mit dem Planckschen Strahlungsgesetz wird gezeigt, dass das Photodioden-Signal im betrachteten Wellenlängenspektrum kaum von der Temperatur, jedoch stark von der Größe des Schmelzbades abhängt [120]. Die Kamera arbeitet mit einer Aufnahme­frequenz von 15 kHz (bei 60 ms Belichtungszeit) und die Photodiode mit einer Aufnahme­frequenz von 40 kHz. Bei einer realistischen Scangeschwindigkeit von 1000 mm/s ergibt sich dadurch ein räumlicher Abstand  $s_{Kamera}$  zwischen zwei Bildern bzw. zwischen zwei Photodioden-Signalen  $s_{Photodiode}$  von

$$s_{Kamera} = \frac{\text{Scan-Geschwindigkeit}}{\text{Aufnahmefrequenz}} = \frac{1.000.000 \mu\text{m/s}}{15.000 \text{fps}} = 66,7 \mu\text{m}, \quad (7)$$

$$s_{Photodiode} = \frac{1.000.000 \mu\text{m/s}}{40.000 \text{fps}} = 25 \mu\text{m}. \quad (8)$$

Damit entspricht der Abstand in etwa der Größe eines Schmelzbades [54]. Die daraus resultierende Bewegungsunschärfe verursacht zusammen mit dem Prozessleuchten ein stets unscharfes Bild (Bild 27). Die im System verbaute



Bild 27: a) Die bei der Schmelzbad-Überwachung überstrichene Wegstrecke zwischen zwei Kamera-Aufnahmen entspricht der Größenordnung des Schmelzbades. b) Die Gasfackel streut die Laserstrahlung und die koaxial detektierte thermische Strahlung.

NIR-CMOS-Kamera mit  $1280 \times 1024$  Pixeln bei  $14 \times 14 \mu\text{m}$  Pixelgröße ermöglicht im Vollbildmodus eine maximale Bildwiederholrate von 506 Bildern pro Sekunde (fps). Bei einer Reduktion des Bildausschnitts (Region of Interest: ROI) auf  $60 \times 60$  Pixel kann die Bildwiederholrate auf 33390 fps gesteigert werden. In der vordefinierten Einstellung durch CL wird die Kamera bei mit 15 kHz und einer Belichtungszeit von  $60 \mu\text{s}$  betrieben, um trotz der geringen thermischen Strahlungsintensität innerhalb des Transmissionsspektrums des dichroitischen Spiegels ein verwertbares Signal zu generieren. In einer kurzen Beispielrechnung wird nun die Emission des Schmelzbades abgeschätzt. Dazu wird aus der Literatur eine Emissivität des grauen Strahlers von  $\epsilon = 0.4$  angenommen [151]. Im ersten Schritt wird das Verhältnis aus abstrahlender  $A_{\text{Emission}}$  und absorbierenden Fläche,  $A_{\text{Detektion}}$ , berechnet:

$$\frac{A_{\text{Detektion}}}{A_{\text{Emission}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot a^2}, \quad (9)$$

wobei  $r = 15 \text{ mm}$  der Scanneröffnung und  $a = 490 \text{ mm}$  dem Arbeitsabstand zwischen Scanneröffnung und Schmelzbad entspricht. Näherungsweise wird die Umgebungstemperatur und der Schmelzbad-Durchmesser ( $\ll a$ ) als Punktquelle vernachlässigt, eine Lambertsche halbsphärische Abstrahlung und der Reflektionskoeffizient der Spiegel als unabhängig vom Einstrahlungswinkel angenommen. In Bild 28 wird die Abschätzung in zwei Diagrammen visualisiert. Durch Betrachtung der Positionsabhängigkeit des Signals auf der Bauplattform über die Variable  $a$  in Gleichung 9 ergibt sich eine Abschwächung des Signals um bis zu 11 % (Bild 29) bei der maximalen Auslenkung vom Zentrum der Bauplattform.

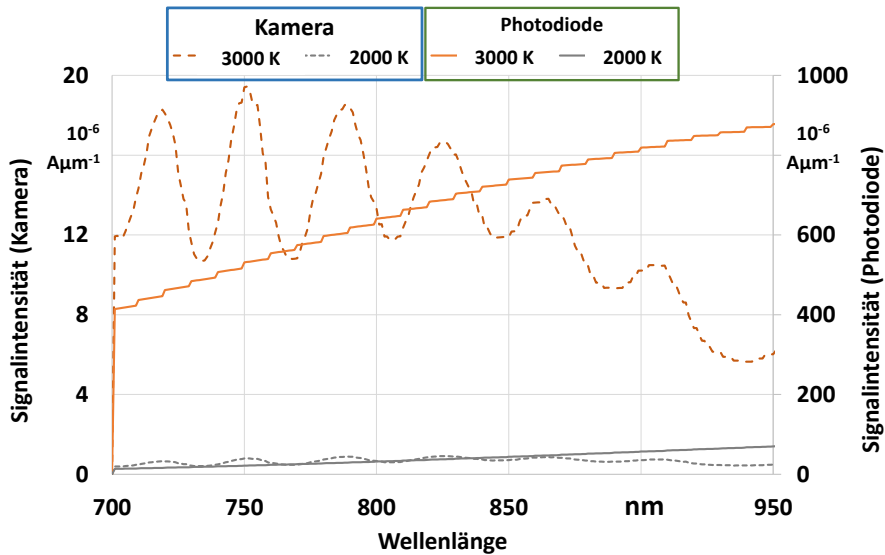


Bild 28: Die mittels Planckschem Strahlungsgesetz (grauem Strahler) abgeschätzte Kamera- und Photodiodenintensität [120] unter Berücksichtigung der aus Datenblättern extrahierten Sensitivität der Photodiode / Kamera zeigt visualisiert die starke Temperaturabhängigkeit.

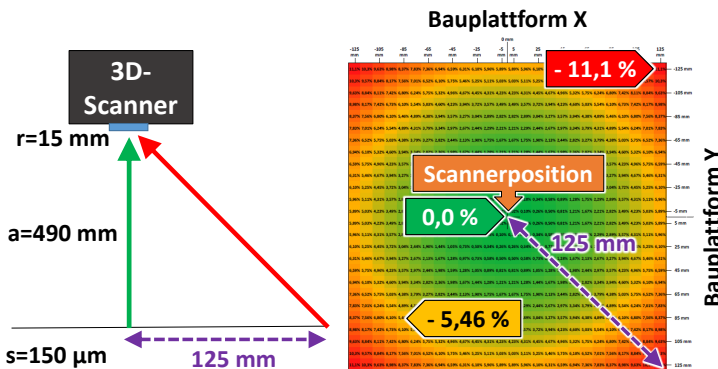


Bild 29: Positionsabhängiger Signalunterschied: Mit steigender Entfernung verringert sich das koaxial detektierbare Signal um bis zu 11 %, was eine Orts-Kalibrierung notwendig macht und absolute Messungen einschränkt.

### 3.4.2 Abbildungsverhältnis

Für das Signalverständnis der kamerabasierten Schmelzbad-Überwachung ist die Untersuchung des Abbildungsverhältnisses notwendig, um die Pixelgröße mit dem untersuchten Schmelzbad in Relation setzen zu können. Daher wird

hier die Abbildung eines bestrahlten Targets vermessen. Bei der Prüfung des Abbildungsverhältnisses der durch die koaxiale Kamera abgebildeten Fläche wird die Herstellerangabe des Systems von  $1 \text{ mm}^2$  Messbereich nicht reproduziert. Als Target wird Millimeter-Papier verwendet, welches mit einer Infrarot-Lampe (Wellenlänge:  $\lambda = 850 \text{ nm}$ ) bestrahlt wird, um trotz des Strahlengangs eine kontrastreiche Abbildung auf der Kamera zu erzeugen. Für die Messung wird die gesamte Sensorfläche, der Vollbildmodus verwendet. Um die Abstände zwischen den Gitterknoten,  $\Delta a$  und  $\Delta b$ , in beiden Dimensionen,  $x$  und  $y$ , richtig zu vermessen, wird die Drehung des Koordinatensystems berücksichtigt,

$$\Delta a_{n,m} = \frac{1}{\sqrt{(x_{n,m} - x_{n+1,m})^2 + (y_{n,m} - y_{n+1,m})^2}}, \quad (10)$$

$$\Delta b_{n,m} = \frac{1}{\sqrt{(x_{n,m} - x_{n,m+1})^2 + (y_{n,m} - y_{n,m+1})^2}}, \quad (11)$$

wobei hier der Spaltenindex  $n$  und der Zeilenindex  $m$  verwendet werden. Um Verzerrungen oder Messfehler auszuschließen, wird die Messung an 49 Strecken wiederholt (siehe Bild 30). Über den gesamten Kamerachip wurde keine signifikante Abweichung festgestellt. Das hieraus berechnete Auflösungsvermögen beträgt  $6,7 \text{ }\mu\text{m}$  pro Pixel. Damit beträgt die tatsächlich untersuchte Fläche des reduzierten Bildbereichs /ROI:  $\text{ROI} = 100 \cdot 100 \text{ px} = 670 \cdot 670 \text{ }\mu\text{m}^2 = 448900 \text{ }\mu\text{m}^2 \approx 0,45 \text{ mm}^2$ .

Es ist notwendig die Lage des Schmelzbades zu untersuchen, weil Abbildungsfehler, wie die chromatische Aberration [152], eine erhöhte Schmelzbaddynamik, Spritzer und die Schmelzbad-Fackel das mit der Kamera detektierte Signal beeinflussen. Folgende Gleichungen werden zur Koordinatenberechnung des Schwerpunktes herangezogen:

$$x = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} i \cdot x(i)}{\sum_{i=0}^{N-1} x(i)}, \quad (12)$$

$$y = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} i \cdot y(i)}{\sum_{i=0}^{M-1} y(i)}. \quad (13)$$

Wie in Bild 30 dargestellt, wurde bei Experimenten mit steigender Scan-Geschwindigkeiten keine signifikante Positionsänderung des Schwerpunktes erkannt. Die koaxial zum Laser geführte Kamera mit elektrisch verstellbarer Fokusslage ohne Kopplung an den 3D-Galvanometer-Scanner bildet die

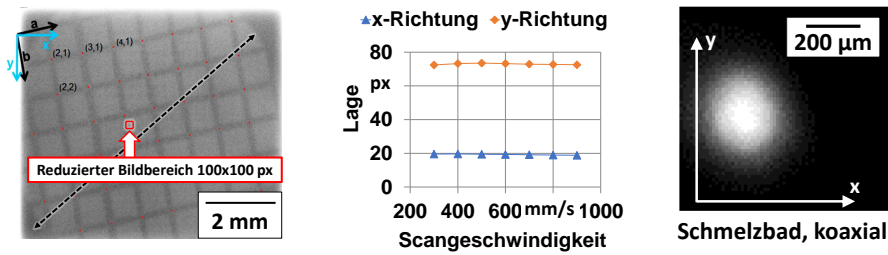


Bild 30: a) Mit koaxialer Kamera betrachteter und mittels Infrarot-Strahlung beleuchteter Target mit Messpunkten (rot) und Betrieb verwendetem reduziertem Bildbereich (100 x 100 px, rot); b) Intensitätsgewichteter Flächenschwerpunkt (Standard-Abweichung < 1 px) des koaxialen Signals bei Variation der Scangeschwindigkeit bei Variation der Scan-Pfad-Richtung in zwei Einheitsvektoren der Bauplattform-Fläche; c) Koaxiales Kamera-Rohbild des reduzierten Bildbereichs.

thermische Strahlung der Interaktionszone unbestimmt ab, was in Bild 31 dargestellt ist. Ohne eine Kopplung mit dem Teleskop ist daher keine präzise Messung zur Schmelzbad-Größe möglich. Alternativ wird die Auskopplung der detektierbaren thermischen Strahlung vor dem Teleskop vorgeschlagen und in [70] bereits verwendet.

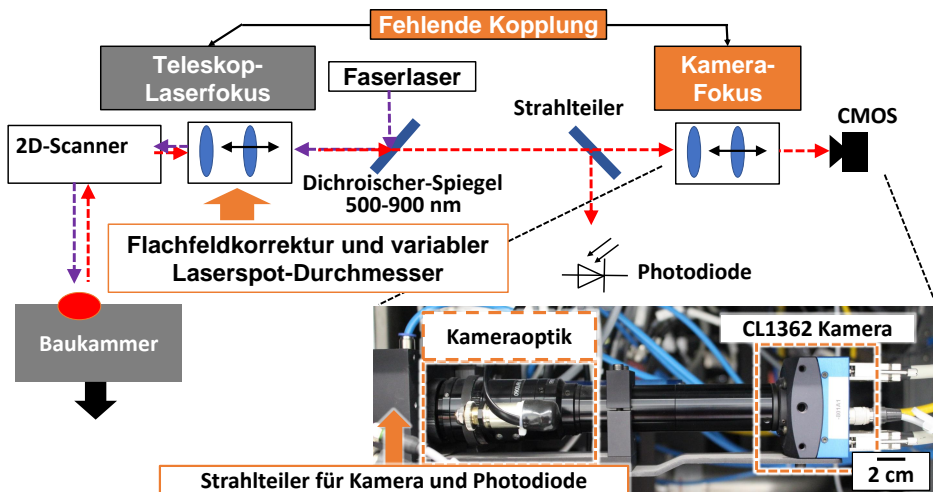


Bild 31: Schema zur fehlenden Kopplung zwischen Kamera- und Laserfokus (QM-Meltpool3D). Somit wird eine präzise Abbildung der Schmelzbad-Geometrie bei dynamisch variierten Laserspot-Durchmessern verhindert.

### 3.4.3 Datenstruktur

Das oben beschriebene KSBÜ-System QM-Meltpool3D (3.4) stellt die Messdaten eines Baujobs in drei Datensätzen bereit, die hier beschrieben werden.

#### 3.4.3.1 Schicht-Mittelwert-Betrachtung

Eine effiziente Methode zur Analyse der Schmelzbad-Überwachungsdaten wird durch die Darstellung der Schicht-Mittelwerte eines Bauteils ermöglicht. Dafür werden durch die Hersteller-Software für jedes Bauteil schichtweise die Mittelwerte der Kamera und der Photodiode mit den Varianzwerten pro Sensor gespeichert, so dass das Datenvolumen nur wenige Megabyte pro Baujob beträgt.

#### 3.4.3.2 FPGA-Rohdaten-Tabellen

Die Signale der CMOS-Kamera und der Photodiode werden durch einen Field-Programmable-Gate-Array (FPGA)-Chip prozessiert und schichtweise im TDMS-Format, dem Technical Data Management Solution - 16-bit - Format [153], gespeichert. Der FPGA-Chip verarbeitet die Bildinformation der CMOS-Kamera zu einem Pixelwert, welcher die Größe des Schmelzbades in einer einzigen Pixelzahl repräsentiert [154]. Die Pixelzahl wird ermittelt, indem jedes CMOS-Kamera-Bild in einem ersten Schritt mit einem festen Schwellwert binarisiert wird. Aufgrund des reduzierten Bildausschnitts von  $100 \times 100$  px liegt das theoretische Maximum der Schmelzbadfläche bei  $10.000$  px (Bild 32). Die ermittelten Werte werden schichtweise in mit der X- und Y-Position des Scanners, dem Photodioden-Intensitätswert, dem Schmelzbad-Flächenwert und einem Scanparameter-Marker gespeichert. Weil die Aufnahmefrequenz der Kamera mit  $15$  kHz und die der Photodiode mit  $40$  kHz beträgt, werden die Werte der Kamera nach einer Taktung kopiert eingetragen die in Bild 32 dargestellt ist.

Für jede Schicht wird eine TDMS-Datei erstellt, welche die Daten der koaxialen Schmelzbad-Überwachung für alle Bauteile bündelt. Trotz der Reduktion der Datenmenge aufgrund der FPGA-Bilddaten Verarbeitung fallen pro Bauteil wegen der hohen Abtastrate große Datenmengen an, was die folgenden beiden Beispiele verdeutlichen. Zuerst wird die Anzahl der Messpunkte für einen Kubikzentimeter aufgeschmolzenes Bauteil abgeschätzt, wobei die Photodioden-Aufnahmerate  $R$  von  $40$  kHz, die Breite  $B$  und Länge  $s$  einer Würfelschicht von je  $1$  mm, ein Spurbstand  $h_s$  von  $100$   $\mu\text{m}$  und eine

Schichtstärke  $d_s$  von 25  $\mu\text{m}$  und somit eine Schichtzahl  $l$  von 400, sowie eine Scangeschwindigkeit  $v$  von 500 mm/s angenommen werden:

$$\text{Anzahl von Scanvektoren pro Fläche} = \frac{\text{Breite}}{\text{Spurabstand}} = \frac{B}{h} = \frac{1000 \mu\text{m}}{100 \mu\text{m}}, \quad (14)$$

$$\text{Scanzeit pro Scanvektor} = \frac{\text{Länge}}{\text{Scangeschwindigkeit}} = \frac{s}{v} = \frac{10 \text{ mm}}{500 \text{ mm/s}}, \quad (15)$$

$$\text{Messpunkte pro Würfel} = \frac{B \cdot s}{h \cdot v} \cdot l \cdot R = 3,2 \cdot 10^7 \quad (16)$$

Für ein Bauteil mit  $1000 \text{ cm}^3$  werden folglich  $\approx 3 \cdot 10^{10}$  Wertereihen mit je 40 Bytes aufgezeichnet, was einem Datenvolumen von etwa 400 GB entspricht.

### 3.4.3.3 Darstellungsmöglichkeiten von TDMS-Daten

Eine Möglichkeit zur Datenanalyse ist die Darstellung der TDMS-Daten als Funktion der Zeit. Dadurch werden Signal-Korrelationen zur Belichtungsreihenfolge oder der Scanstrategie sichtbar. Ein Beispiel dieser Analysemethode zeigt Bild 33. Die regelmäßigen Nullwerte des Signals treten aufgrund der Scannersprünge bei ausgeschaltetem Laser zwischen den jeweiligen Scanvektoren auf.

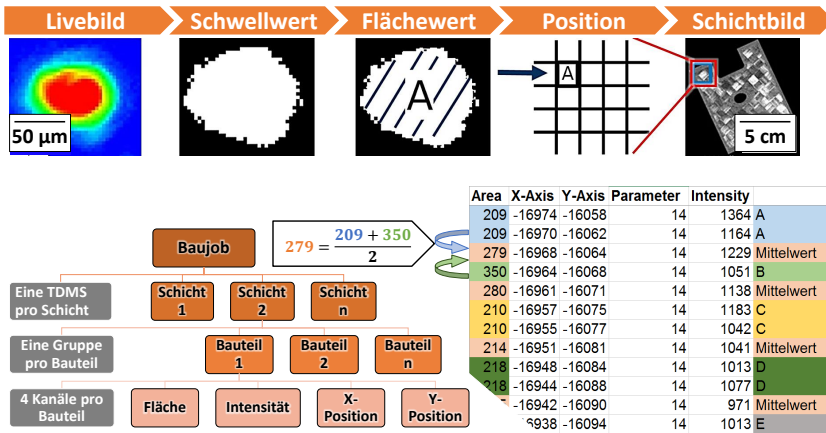


Bild 32: (a) FPGA-Bildauswertung der Schmelzbad-Überwachung. (b) **Links:** TDMS-Datenstruktur, **Rechts:** Aufgrund unterschiedlicher Aufnahmefrequenzen von 15 (CMOS) und 40 kHz (Photodiode) werden die Kamera-Werte in einer Reihen-Taktung gemittelt. Die Photodioden-Intensität, die Schmelzbadfläche, die X- und Y-Position und der Scanparameter werden zeilenweise festgehalten.

Das Mapping der TDMS-Daten, also die räumliche Zuordnung von Messpunkten in der jeweiligen Schicht, liefert entsprechend der hohen Aufnahmege-  
 schwindigkeit, eine hochaufgelöste Darstellung des LSS-Prozesses. Neben der positionsabhängigen Darstellung der Messwerte ist durch die serielle  
 Ablage der Daten auch die zeitliche Komponente darstellbar. Bild 33 zeigt,  
 dass bei Bauteilen ein Anstieg im detektierten Signal durch einen Wärmestau  
 erkennbar ist.

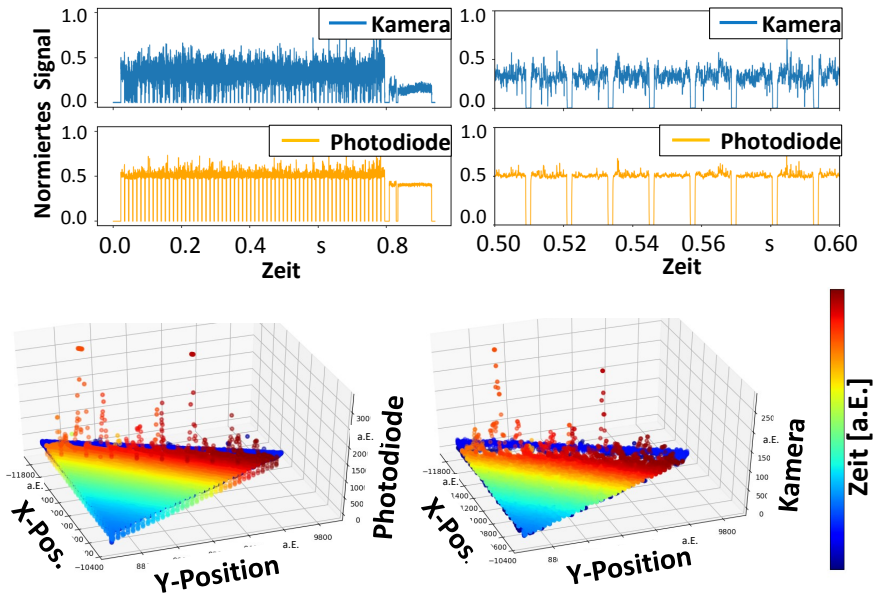


Bild 33: (a): Zeitlicher Verlauf des Schmelzbad-Signals: Links: Komplettes Signal während einer Schicht; Rechts: Ausschnitt mit hoher Varianz im Kamera-Signal und geringer Varianz im Photodioden-Signal. (b): Farbkodierung der Datenaufnahme: Eine Steigerung der Signalwerte als Funktion der Zeit ist erkennbar.

### 3.5 Einzelspur-Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung

Das LSS ist prozesstechnisch von der einzelnen Spur, über eine belichtete Fläche, hin zur gesamten Bauplattform in verschiedene Größen unterteilbar [155]. Die kleinste zu untersuchende Einheit, die Einzelspur, wird in der Literatur sowohl theoretisch, simulativ [156] als auch experimentell in zahlreichen Arbeiten untersucht [137]. Dabei werden sowohl anlagentechnisch kontrollierbare Laser-Parameter und das Schmelzbad umgebende Einflüsse variiert. Einzelspurversuche werden zur Qualitätssicherung des Scanners zur Vermessung der Wiederhol- und Positioniergenauigkeit, der Skalierung

und der Justierung von Multilaser-Systemen wie im Abschnitt 3.2 beschrieben. Weiter werden material- und zeitsparende Versuche zur Untersuchung des Spurquerschnitts durchgeführt [P3]. Aufgrund fehlender Materialdaten werden bei numerischen Simulationsmodellen ebenfalls Einzelspur-Experimente durchgeführt [157]. Zur Untersuchung des Denudation-Effekts [35], des Balling-Effekts [22], der unten gezeigten Schichthöhenabhängigkeit und der Oberflächenrauheit wurden ebenfalls Einzelspurversuche herangezogen.

Für Grundlagen-Experimente wird die Kamera direkt an einen Messrechner mit Framegrabber (Typ: micro Enable IV AD4-PoCL, Fa. Silicon Software [158]) angeschlossen und die Bilddaten abgespeichert. Zur experimentellen Auswahl und Prüfung werden die Aufnahme­frequenz (8, 11, 15 und 20 kHz) und die Belichtungsdauer (45, 60, 86 und 116  $\mu\text{s}$ ) variiert. Verwendete Prozessparameter:  $P=250\text{ W}$ ,  $v=1000\text{ mm/s}$ ,  $s=70\text{ }\mu\text{m}$  (Bild 34). Um die Optik der Kamera auf die Arbeitsebene zu fokussieren, wird das elektrische Objektiv verwendet. Bei einer Defokussierung sind Interferenzeffekte, Newtonsche Ringe [159], zu beobachten wie auf Bild 34 in der zweiten Reihe zu sehen sind.

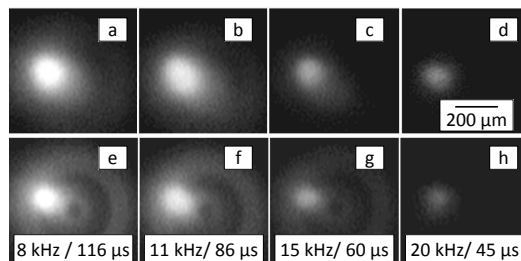


Bild 34: Testbilder zur Aufnahmefrequenz (Spalten) mit Fokussierung (Zeile 1) und Defokussierung (Zeile 2):  $P = 250\text{ W}$ ,  $v = 1000\text{ mm/s}$  =  $70\mu\text{m}$ ;

Die koaxiale Erfassung des Schmelzbades mit einer CMOS-Kamera ermöglicht aus der Berechnung des Kreisflächenäquivalents einen Schmelzbad-Durchmesser. Eine beispielhafte Darstellung von verschiedenen Schwellwerten ist im Diagramm 35 abgebildet.

### 3.5.1 Experimenteller Umfang

Die durchgeführten Untersuchungen zu Einzelspuren werden hier bezüglich ihres Umfangs und der verwendeten Auswertungs-Methoden beschrieben. Bei Einzelspur-Untersuchungen sind mehrere besondere Randbedingungen zu beachten:

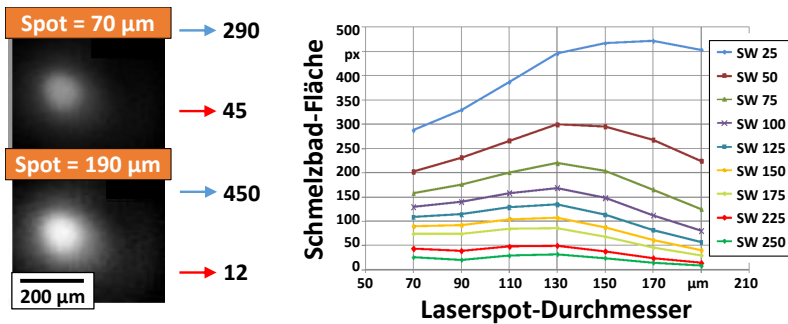


Bild 35: **Links:** Schmelzbad-Livebilder mit Laserspot-Durchmessern 70 und 190 µm mit unterschiedlichen Schwellwerten (25, blau / 225, rot). **Rechts:** Schwellweltergebnisse in Abhängigkeit zum Laserspot-Durchmesser.

**Unebenheit:** Die Substratplatte kann bei einer Vorbereitung mittels Fräsen, Zerspanen und Sandstrahlen oder durch thermisch induzierten Verzug Unebenheiten in der Größenordnung des Schmelzbades (100 µm) aufweisen.

**Pulverbeschichtung:** In der Literatur ist die möglicherweise unregelmäßige Pulverbeschichtung in den räumlich eingeschränkten Prozesskammern nicht vermessen. Die effektive Pulverschicht-Höhe steigt durch die Material-schrumpfung in den ersten 5 Schichten auf das doppelte der üblicherweise eingestellten Pulverschicht.

**Wärmeleitung:** Ohne Vorheizung, also bei 25° C Raumtemperatur, zeigt die noch kalte Bauplattform eine andere physikalische Umgebung als im Bauprozess üblich. Das Gefüge gegossener Substratplatten verfügt über eine abweichende Mikrostruktur und u.U. auch andere Wärmeleitungseigenschaften als das im Bauprozess entstandene Gefüge.

**Denudation-Effekt:** Einzelne Scan-Pfade werden durch den Denudation-Effekt, bei dem das umliegende Pulver von beiden Seiten angezogen wird, höher aufgeschmolzen [35].

Für das Verständnis des koaxial detektierbaren Schmelzbad-Signals werden die Parameter Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Laserspot-Durchmesser, der Spurabstand, die Positions- und Richtungsabhängigkeit des Signals sowie die Schichthöhe untersucht. Zur Durchführung dieser Einzelspurversuche werden 10 mm dünne Opferplatten (BxLxH: 120 x 120 x 10 mm) verwendet, die auf einer Trägerplatte in der Anlage montiert werden. Dabei ist das verwendete Substratplattenmaterial stets gleich dem untersuchten Pulvermaterial. Für die Einzelspurversuche werden CLI-Dateien generiert, um einzelne Vektoren auf den Opferplatten zu belichten und die koaxialen Schmelzbad-Daten mit den Schliffbildern der Einzelspuren verglichen. Die mikroskopierte Fläche wird unter Annahme eines kreisförmigen Schmelzbades aus der gemessenen Breite

eines Schliffbildes genähert. Als Materialien werden der Edelstahl 1.4404 und die Aluminium-Legierung AlSi10Mg verwendet.

**Kontrollierbare Laserparameter:** Die Variation der drei kontrollierbaren Laserparameter, Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Laserspot-Durchmesser, gibt Aufschluss über die Breite des Prozessfensters, Effekte an dessen Rändern und deren Auswirkungen auf das Schmelzbad-Verhalten, sowie das Auflösungsvermögen des verwendeten Algorithmus. Die Versuche werden mit der Aluminiumlegierung AlSi10Mg und den Edelstählen 1.4404 und 1.4057 durchgeführt, um die Materialeigenschaften zwischen Aluminium und Edelstahl berücksichtigen zu können, sowie um bei den Edelstählen eine Redundanz zur Bestätigung des Verhaltens zu erzeugen.

**Thermische Historie:** Weil die thermische Historie einen Einfluss auf das koaxial detektierte Signal ausübt, soll dieser quantifiziert werden, indem parallele Einzel-, Doppel- und Dreifachspuren auf der Substratplatte belichtet und deren Schliffbilder und Kamerasignale miteinander verglichen werden. Die Einzelspuren sind dabei 100 mm lang und die Doppel- und Dreifachspuren werden in konstantem Abstand von 85  $\mu\text{m}$  zueinander belichtet. Der Abstand von 85  $\mu\text{m}$  entspricht einer typischen Einstellung beim LSS. Um gleichzeitig die Ergebnisse zur Parametervariation zu validieren, wird das Experiment mit dem Edelstahl 1.4057 durchgeführt und bei unterschiedlichen Laser-Parametern wiederholt.

**Positions- und Richtungsabhängigkeit:** Wie oben bezüglich der Projektion berechnet (Bild 29) muss ein kalibrierter FPGA-Algorithmus zur Auswertung die Positionsabhängigkeit des Signals integrieren. Abbildungsfehler der Scanneroptik und der Schmelzbad-Form die als Linse angenommen wird, sowie der Einfluss der durch Material-Verdampfung entstehenden Streuung der detektierten thermischen Strahlung des Schmelzbades erschweren die KSBÜ. Um die Kombination aus Richtungs- und Positionsabhängigkeit quantitativ zu untersuchen, werden hier drei Experimente durchgeführt. Als Material wird der Edelstahl 1.4404 ausgewählt, ohne dass eine Materialabhängigkeit angenommen wird. Dazu werden konzentrische Kreise mit steigendem Radius um den Scanner und radial vom Scanner wegführende und hinführende Einzelspuren mit dem Lasersystem 1 belichtet. Dabei werden für die radialen Vektoren (Index  $r$ ) und die konzentrischen Kreise (Index  $k$ ) eine Laserleistung von  $P_r = 180 / P_k = 120 \text{ W}$ , ein Laserspot-Durchmesser  $s_r = 140 / s_k = 50 \mu\text{m}$  und eine Scangeschwindigkeit  $v=700 \text{ mm/s}$  verwendet. Weiter werden die radialen Vektoren auf einer dünnen Pulverschicht auf der Substratplatte aufgeschmolzen, während die konzentrischen Kreise bei einer Schichthöhe von 300 und den folgenden 50 und 25  $\mu\text{m}$  aufgeschmolzen werden. Neben der Belichtung von konzentrischen Kreisen unter dem verwendeten Scannersystem werden ebenfalls unter dem nicht verwendeten

Scannersystem Kreise belichtet. Bei einer weiteren Untersuchung soll das Signalverhalten untersucht werden, wenn die gesamte Bauplattform belichtet wird. Die zu untersuchende Richtungsabhängigkeit des Schmelzbad-Signals führt abhängig von den Scan-Trajektorien zu einem hohen Berechnungsaufwand für eine Kalibrierungsfunktion. Diese wird durch die Positionsabhängigkeit des Signals überlagert. Um eine effiziente Möglichkeit zu prüfen das Signal der Schmelzbad-Überwachung zu kalibrieren, wird die komplette Bauplattform belichtet und das pro Schicht aufgenommene Signal bezüglich der Helligkeitsverteilung untersucht.

**Schichthöhe:** Die Schichthöhen-Abhängigkeit des Signals ist für die Prozessstabilität im Fall von fehlendem Pulver, rauen Oberflächen, Bauteilverzug und der Erstschicht-Anbindung relevant und wird daher untersucht. Beispiele für diese Fälle sind Beschichtungsfehler, falsch positionierte Bauplattformen im Verlauf eines Baujobs oder beim Einstellen der Anlage, oder Übergangsbereiche zwischen Stützstruktur und Bauteil (*eng.: Transition Zone*). Falls mittels koaxialer Beobachtung die Schichthöhen-Variation gemessen werden kann, sind Anwendungen zur Prozessstabilität denkbar. Im ersten Versuch werden Spurversuche durchgeführt bei denen eine Substratplatte mit 50 und 100  $\mu\text{m}$  tiefen und 4 cm breiten Nuten verwendet wird. Darin werden 3,8 cm lange Einzelspuren unter Variation des Laserspot-Durchmessers (50-200  $\mu\text{m}$  bei konstanten Parametern  $P=380\text{ W}$  und  $v=500\text{ mm/s}$ ). In einem zweiten Versuch wird die Auflösung erhöht indem eine Substratplatte präpariert wird, welche über ausgefräste Treppenstufen mit 25  $\mu\text{m}$  hohen Stufen verfügt, so dass eine Schichtstärken-Varianz von 0 bis 900  $\mu\text{m}$  abgedeckt werden kann. Als Material wird für beide Versuche der Edelstahl 1.4404 ausgewählt. Um die zunehmende Schichtstärke zu durchdringen, werden zwei Laser-Leistungen, 120 und 350 W, verwendet. Die Geschwindigkeit ist mit 200 mm/s zusätzlich niedrig gewählt, um den Energieeintrag zu erhöhen.

**Umgebungsvariation:** Abhängig von der Umgebung der Interaktionszone ergibt sich ein Zustand mit unterschiedlichem Emissionsverhalten [160]. Zur effizienten und gleichzeitigen Untersuchung des Parametereinflusses wird ein Testbauteil, hier Parameterblock genannt, neun mal aufgebaut und auf unterschiedlichen Bauteilhöhen mit Einzelspuren belichtet (Bild 36). Die Anordnung der Einzelspuren ist mittels CLI-Daten derart programmiert, dass Einzelspuren in unterschiedlichen Abständen zueinander, in verschiedenen Schichthöhen neben dem Bauteil, an dessen Kanten und Überhängen mit Abständen zu selbigen unter Variation von Parametern stattfindet. Die Parameter sind im Anhang in Tabelle 10 aufgelistet. Bild 36 zeigt deren Kombination hier bereits qualitativ. Zur Analyse werden die Mittelwerte der Einzelspur-Vektoren aus den Schichtbildern der CL-Software betrachtet und mit der Position sowie den verwendeten Laser-Parametern in Verbindung gebracht. Ziel der Untersuchung ist die Untersuchung der Detektierbarkeit von unterschied-

lichen physikalischen Randbedingungen wie sie bei der anwendungsorientierten Fertigung von Bauteilen auftreten. Mit der Kenntnis der resultierenden Signaturen können Steuerungs- oder Regelungsgrößen für spezifischen Situationen abgeleitet werden, die in einer später zu implementierenden Software benötigt werden.

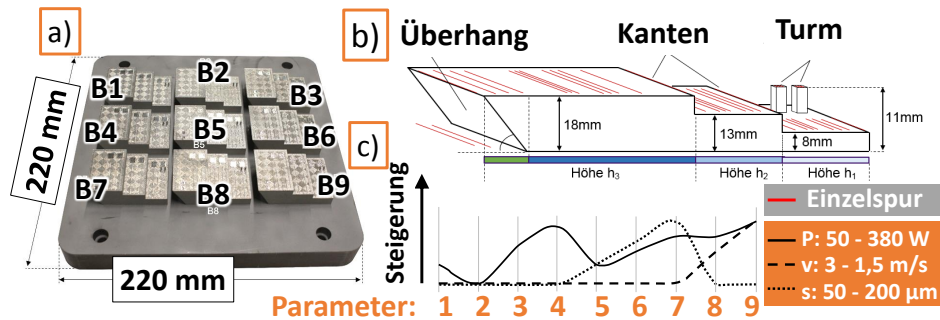


Bild 36: Stufenexperiment zu variierten physikalischen Randbedingungen: a) Bauplattform mit 9 Parameterblöcken; b) Schema mit Belichtungs-/CLI-Vektoren (rot); c) Relative Parameteränderung der Parameterblöcke, siehe Parameterliste 10

**Rauheitsdetektion:** Mit Hilfe der KSBÜ wird die thermische Strahlung der Interaktionszone detektiert, die beim LSS neben den verwendeten Prozessparametern (siehe Abschnitt 4.2.1), den Werkstoffeigenschaften, der Anlagentechnik, vom Untergrund der belichteten Schicht, also dem zuvor erstarrten Material oder der Substratplatte, abhängt. Ein dominanter Einfluss auf das Signal, die Oberflächen-Topographie wird hier untersucht.

Dazu werden Versuchsplattformen mit spitz zulaufenden Nuten unterschiedlicher Tiefe präpariert. Die erste quadratische Bauplattform mit 120 mm Kantenlänge wurde manuell in vier Spalten zerspannt. Danach weisen diese eine taktil gemessene Rauheit von  $R_z = 148, 218, 277$  und  $300 \mu\text{m}$  auf. Im zweiten Versuch werden neun Versuchsplatten belichtet, wie auf Bild 37 dargestellt. Diesmal werden die Nuten aus Gründen der Reproduzierbarkeit maschinell zerspannt und die Rauheitswerte  $R_z = 78, 174, 304, 375$  und  $535 \mu\text{m}$  gemessen. Die Pulverbeschichtung erfolgt mit einer  $30 \mu\text{m}$  hohen Schicht entlang der Nuten, um diese aufzufüllen. Die Belichtung erfolgt senkrecht zu den Nuten mit Einzelspuren und Flächen, wobei die Parameter in Tabelle 13 im Anhang verwendet werden. Dabei wird stets eine niedrige Scangeschwindigkeit zwischen 150 und 300 mm/s gewählt, um die räumliche Auflösung zu verbessern. Die verwendete Leistung zwischen 70 und 200 Watt deckt den niedrigen bis mittleren Leistungsbereich ab. Der Laserspot-Durchmesser wird mit Werten zwischen 50 und 100  $\mu\text{m}$  ebenfalls im niedrigen Bereich gehalten, weil angenommen wird, dass das Verkippen des Schmelzbades dadurch stärker ausfällt. Bei der Belichtung der Flächen wird die Kamera

mit der CL-Hard- und Software verarbeitet. Bei der Belichtung der Einzelspuren werden die Rohdaten des Kamerasignals aufgezeichnet und mittels Schwellwert-Methode ausgewertet.

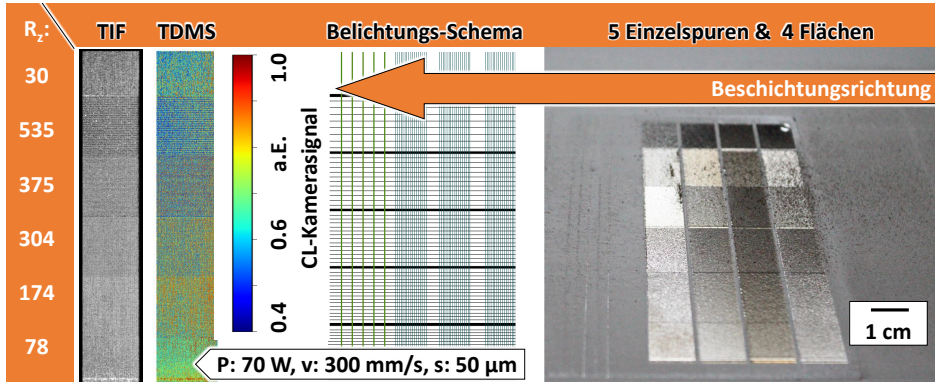


Bild 37: Versuchsschema mit horizontalen Rauheits-Streifen. Rechts: Plattform nach dem Versuch.

### 3.5.2 Auswertungs-Algorithmen

Zur Auswertung der direkt aufgezeichneten Kamerabilder der koaxialen Schmelzbad-Überwachung werden mehrere Algorithmen entwickelt und verwendet. Implementierungen für Analysezwecke in Python sind bewusst nicht bezüglich der Laufzeit optimiert oder für eine spätere Anwendung ausgelegt. Mit der Software LabVIEW (National Instruments) wird eine FPGA-Software für die in der M<sub>2</sub> Anlage verbaute Schnittstelle entwickelt, welche die Implementierung von verschiedenen Algorithmen zulässt, was jedoch aufgrund der Garantie-Restriktionen des Kooperations-Partners nicht auf der NI-FPGA-Architektur der Anlage zum Einsatz kommt.

#### 3.5.2.1 Flächenauswertung

Wie in Bild 32 dargestellt, ist der Algorithmus der CL-Software in vier Schritten konzipiert [122]: 1) Aufnahme, 2) Schwellwert-Anwendung, 3) Flächenberechnung, 4) Scanner-Positions-Zuordnung. Dadurch ist die Auswertung bezüglich der Richtung unabhängig. Dieser Algorithmus wird nachgebildet und zur Auswertung der Einzelspur-Versuche herangezogen. Zur Berechnung der Fläche in µm werden Pixel mit dem Flächenfaktor  $(6,7 \mu\text{m})^2$  aus der Messung zum Abbildungsmaßstab 3.4.2 multipliziert.

### 3.5.2.2 Bild-Daten-Klassifizierung und Unterscheidung

Weil die Auswertung mittels Flächenbewertung des koaxial detektierten Bildes Informationen verliert, wird eine Bild-Daten-Klassifizierung erstellt. Ziel ist es zu untersuchen, ob die Bild-Daten einzelner Versuchs-Klassen unterscheidbar sind, um dadurch bei der Auswertung von Volumen-Daten die Eindeutigkeit von Signaturen abschätzen zu können. Als Klasse werden hier Einflüsse auf das Schmelzbad-Emissionsverhalten durch Variation der kontrollierbaren Prozess-Parameter oder der physikalischen Umgebung bezeichnet. Es werden zwei Methoden verwendet:

**Hauptkomponenten-Analyse der zentralen Momente:** In der Bildverarbeitung werden zentrale Momente verwendet, weil diese für schwarz-weiß-Bilder kostengünstig zu berechnen und translationsinvariant sind, was Vorteile in der Bilderkennung liefert. Sie werden anhand gewichteter Mittelwerte der Helligkeiten einzelner Pixel berechnet und können die Fläche, den Schwerpunkt einer Intensitätsverteilung oder eine Orientierung, oder die Exzentrizität beschreiben:

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy \quad (17)$$

Mit Hilfe der Funktion *moments* der OpenCV Bibliothek werden die zentralen Momente bis zur dritten Ordnung für die ausgewählte Rohbild-Daten berechnet, wodurch jedes Schmelzbad-Bild von einem Vektor mit 24 Einträgen beschrieben wird. Für jedes Experiment werden 10.000 Einzelbilder für die Auswertung herangezogen. Zuerst werden alle Einträge normiert, was mit der Funktion *StandardScaler* aus der Python-scikit-learn Bibliothek (PSKL) umgesetzt wird:  $z = (x - u)/s$ , mit  $z$  dem normierten Wert,  $x$  dem Eingangswert,  $u$  dem Mittelwert und  $s$  der Standard-Abweichung. Danach werden die Daten mittels Hauptkomponenten-Analyse auf zwei Dimensionen projiziert. Hierfür wird ebenfalls die PSKL verwendet (`class sklearn.decomposition.PCA, ncomponent = 2`). Dadurch werden die Informationen größter Varianz aus allen zentralen Momenten auf zwei Achsen sichtbar gemacht. Diese Methode erlaubt es die detektierte Schmelzbad-Emission unterschiedlicher experimenteller Randbedingungen zu vergleichen, wodurch eine Aussage zur Kapazität der Sensorik möglich ist, Einflüsse auf die Schmelzbademission unterscheiden zu können.

**Bild-Klassifizierung mittels Neuronaler Netze:** Für die Klassifizierung werden zwei Netzwerke für unterschiedliche Schmelzbad-Bild-Cluster angewandt. Dafür werden Gruppen von Parameter-Variationen definiert, in denen

nur ein Parameter variiert wurde, oder die Gruppen werden miteinander vermischt.

**A) Klassifizierung mittels Fully-Connected Neural Network (FCN):**

Die Auswahl der Netzwerk-Architektur wurde durch Versuche mit unterschiedlicher Anzahl an Schichten und Knoten bestimmt, wobei eine möglichst hohe Genauigkeit als Zielgröße definiert wurde. Das Roh-Bild mit  $80 \times 80$  px bestimmt durch seine Größe das Input-Layer ( $80 \times 80 = 3600$  Knoten) und die Klassifizierung erfolgt entsprechend der verwendeten Versuchsreihe mit 7 unterschiedlichen Parametersätzen. Hierfür wurde die Variation des Laserspot-Durchmessers gewählt. Dabei wurde eine feste Zahl von 100 Epochen als ausreichend bestimmt und ausgewählt, sowie stets eine gleichbleibende Knotenzahl für alle Schichten festgelegt. Die Lernrate wurde mit einem Startwert von 0.001 definiert und über kleine Schritte ( $1 \times 10^{-5}$ ) reduziert. Als Aktivierungsfunktion werden wieder die Relu-Funktion in den versteckten Schichten / Hidden-Layers und die Softmax-Funktion für die letzte Schicht zur Klassifikation verwendet. Dabei wird der Funktions-Typ Kategorische Kreuzentropie als Verlust-Funktion verwendet. Bild 38 zeigt das Ergebnis dieses Auswahl-Prozesses. Die Genauigkeit ist von der Anzahl an Knoten bei dieser Schmelzbad-Bildstruktur nach einer Schichtzahl von mehr als acht unabhängig. Das beste Ergebnis wird mit 8 Schichten und jeweils 36 Knoten mit einer Genauigkeit von 93,4 % erzielt.

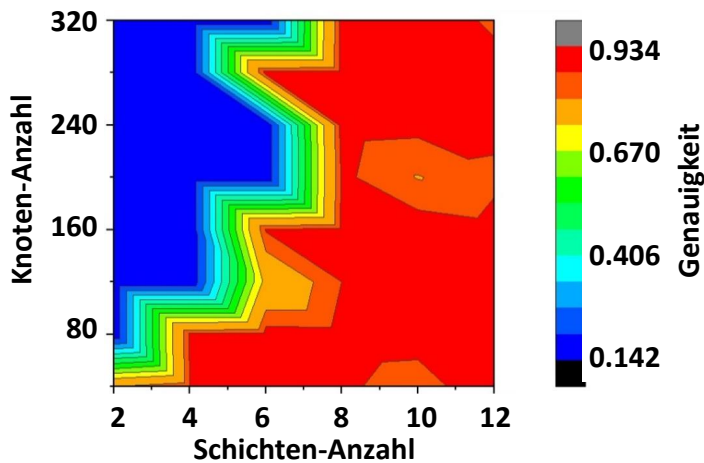


Bild 38: Die Architektur des Fully-Connected-Neural-Networks wurde durch eine Variation der Knoten und Schichten bestimmt, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erhalten. Lernrate: 0.001, Epochenzahl: 100, Eingangs-Knotenanzahl: 3600, Ausgangsknotenanzahl: 7.

**B) Klassifizierung mittels Faltungsbasiertem Neuronalem Netz (FNN):**

Für eine einfache Vergleichbarkeit wurde die obige Auswahl des FCNs durch

eine Faltungsschicht erweitert, wodurch eine niedrigere Epochenzahl, 60 anstatt der zuvor notwendigen 78 benötigt. Die Genauigkeit konnte auf 94.7 gesteigert werden.

### 3.6 Volumenkörper-Untersuchungen mittels koaxialer Prozessüberwachung

Nun werden Volumenkörper mittels KSBÜ mit den Werkstoffen 1.4057, 1.4542, 1.2709 und AlSi10Mg unter Variation von Prozess-Parametern und deren Auswirkung auf das entstehende Gefüge untersucht. Zusätzlich wird der Einfluss der PGV bei AlSi10Mg betrachtet.

**Variation von kontrollierbaren Laserparametern:** Um den Einfluss von Prozess-Parameter-Variationen auf das koaxial detektierbare Schmelzbad zu untersuchen werden Testkörper unter Variation der Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichthöhe und Spotgröße aufgebaut. Die Auswahl beschränkt sich damit auf kontrollierbare Prozess-Parameter. Durch die Variation der resultierenden Energiedichte sind durch zu niedrigen Energieeintrag poröse Strukturen zu erwarten. Bei zu hohem Energieeintrag sind eine erhöhte Anzahl an Spritzern, Keyhole-Signaturen und deutliche Größenänderungen zu erwarten. Entsprechend der von der eingestrahelten Energie abhängigen Schmelzbad-Emission sind abhängig von den Prozess-Parametern variierende Mittelwerte zu erwarten. Die verwendeten Parameter-Fenster sind im Anhang in Tabelle 11 dargestellt. Für die Untersuchungen mit dem **Edelstahl 1.4542** werden produktionsnahe Parameter verwendet und deren Kontur- und Flächen-Parameter unabhängig voneinander variiert. Dafür werden die Leistung um  $\pm 35\%$  (95-230 W), die Scangeschwindigkeit um  $\pm 30\%$  (700-1300 mm/s), und der Laserspot-Durchmesser um  $\pm 20\%$  (100-150  $\mu\text{m}$ ) separat variiert. Die mittels Schmelzbad-Überwachung aufgezeichneten Schichtbilder werden mit der oben vorgestellten Vorgehensweise ausgewertet, um eine mögliche Korrelationen zwischen Helligkeit, Textur und Bauteildichte zu prüfen. Ziel ist es hier die als Qualitätsgrenze festgelegte relative Dichte von 99,5 nicht zu stark wie bei [161] zu unterschreiten, damit diese minimalen Abweichungen, wie sie in einem nahezu stabilen Prozess notwendig sind, untersuchen zu können. Für die Untersuchungen mit dem **Edelstahl 1.4057** hingegen werden weite Bereiche des Parameter-Fensters getestet, um deutliche Abweichungen und resultierende Signaturen untersuchen zu können, denn dies ist der Zielsetzung eines Fehlerkatalogs dienlich. Um dabei die Positionsabhängigkeit ausschließen zu können werden Parameter-Kombinationen in unterschiedlichen Segmenten der Bauplattform, hier als Schutzgas-Zonen bezeichnet, wiederholt generiert.

Für den **Werkzeugstahl 1.2709** wird eine auf Mittelwerten basierende Analyse durchgeführt, um die Streuung und positionsabhängige Signalintensität zu untersuchen. Dafür werden Würfel mit einer Inselstrategie aufgebaut und deren generierte Schichtbilder mittels Profilmessung untersucht. Die Würfel werden wieder in einem Raster angeordnet und ebenfalls als Säule zu je dreien gestapelt. Durch eine prozentuale Variation des Drehzahl-Werts der Pumpenleistung der Prozessgas Strömung, welcher ausgehend des empfohlenen Standardwerts des Anlagenherstellers von 79 % über den Mittelwert von 88 % und den Maximalwert von 97 % je Würfelhöhe reicht, wird somit der Einfluss der Prozessgasströmung untersucht.

**Einfluss der Partikelgrößenverteilung:** Weil die Aluminiumlegierung  $AlSi10Mg$  die höchste Wärmeleitfähigkeit der in dieser Arbeit ausgewählten Materialien zeigt, wird eine Untersuchung des Einflusses der Partikelgrößenverteilung (PGV) auf das koaxial detektierbare Schmelzbad-Signal vorgenommen. Weiter kann die Änderung der PGV eine Auswirkung auf die Prozessstabilität oder die Qualität und mechanischen Kennwerte von Testbauteilen haben, so dass die Messbarkeit durch die KSBÜ brauchbar ist, falls Pulverwerkstoffe aus unterschiedlichen Chargen oder Recycling-Zuständen gemischt werden. Dafür werden mittels Siebung drei Fraktionen von Pulverchargen hergestellt (Bild 39) und bei gleichzeitiger Variation der Prozessparameter in drei Baujobs verarbeitet.

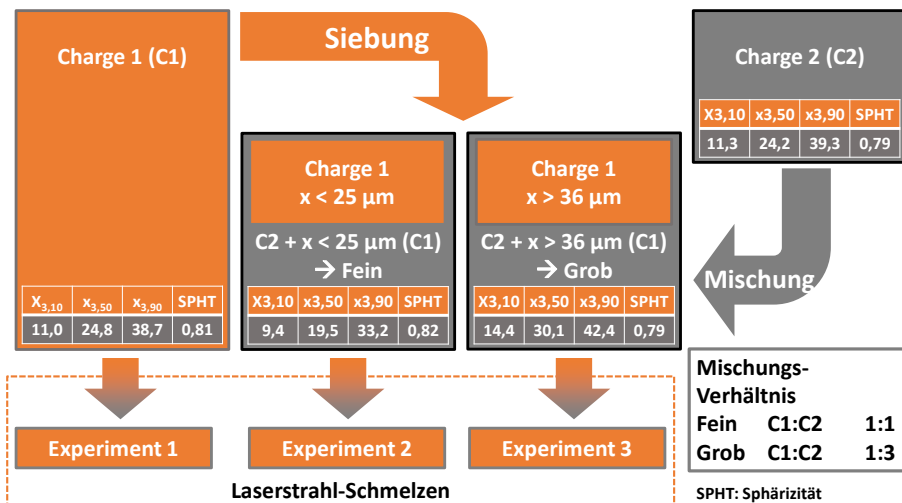


Bild 39: Siebung und Mischung von drei Pulverfraktionen.

Neben der Untersuchung der Materialeigenschaften erfolgt die Untersuchung der KSBÜ im Zentrum der Bauteile die jeweils an der gleichen Position

und dem gleichen Lasersystem aufgebaut wurden. Dadurch wird die Positionsabhängigkeit des Signals sowie die Einflüsse durch teilweise erhöhte Randbereiche eliminiert. Lediglich die PGV wurde in den drei Experimenten variiert. Das Ausgangsmaterial wird in einer Siebturm-Anlage in einer Arinertisierten Glovebox fraktioniert. Die variierten Prozess-Parameter Laserleistung und Laserspot-Durchmesser sind im Anhang, Tabelle 9, dargestellt. Dazu wird ein 10 kg Gebinde von Charge 1 verwendet um 3 PGV-Fractionen zu trennen. Im Anschluss wird ein 10 kg Gebinde von Charge 2 untergemischt, um die für den Anlagenbetrieb notwendige Pulvermenge zu erhalten.

**Bauplatzform-Untersuchung:** Die Prozessstabilität wird abhängig von der Position auf der Bauplatzform durch die verwendete Prozessgas-Strömung beeinflusst, weil insbesondere bei hohen Füllfaktoren der Bauplatzform entstehende Spritzer in den folgenden Schichten das Aufschmelz-Verhalten beeinflussen. Die oben untersuchte Richtungs- und Positions-Abhängigkeit des Schmelzbades ist auch bei Volumenkörpern zu prüfen. Für die Untersuchung werden über der gesamten Bauplatzform Würfel mit Kantenlängen unter 10 mm in regelmäßigen Abständen von 8 mm aufgebaut. Um die Beschichterlippe nicht durch eine gemeinsame senkrecht zur Beschichtungs-Richtung auftretende Würfel-Wand zu stören, werden die Würfel jeweils um 5 Grad eingedreht.

### 3.7 Anwendungs-Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung

Die Ergebnisse der Fehleranalyse mittels lateraler Prozessüberwachung haben die gezeigt, dass es notwendig ist die Oberflächenrauheit zu evaluieren. Außerdem sind Methoden zur statistischen Prozesskontrolle und Notausfunktionen gewinnbringend. Zur Untersuchung dieser Zielsetzungen werden hier Methoden beschrieben.

#### 3.7.1 Statistische Prozesskontrolle durch Schichtmittelwerte

Um die Anfälligkeit der statistischen Prozesskontrolle mittels Schichtmittelwert wie sie in Abschnitt 3.4.3.1 beschrieben ist zu untersuchen werden Serienbauteile betrachtet. Ziele der Untersuchungen sind die Vergleichbarkeit von schichtabhängigen Mittelwerten zu untersuchen, die systembedingten Signalunterschiede zu quantifizieren und die Auflösung und daher Verwendbarkeit einer derartigen Prüfung zu untersuchen. Als Bauteil dienen wieder die bei der Fehleranalyse verwendeten Baujobs diesmal unter Verwendung der KSBÜ-Datensätze.

### 3.7.2 Untersuchungen zu Kanalbauteilen

Obwohl die Gestaltungsfreiheit als bedeutsamer Vorteil für die additive Fertigung angesehen wird, gelten für das LSS materialabhängige Einschränkungen bezüglich der Fertigung von Überhängen und Kanalbauteilen. Ungestützte Überhänge, Kavitäten oder Hinterschnitte werden mit material- und parameterabhängigen Fachkenntnissen oder Konstruktionsempfehlungen ausgelegt. Hier wird ein Merkmal, die Signaturliefe eingeführt, welches die koaxiale Schmelzbad-Überwachung für die Optimierung von Überhang-Parametern und die Qualifizierung von generierten Kavitäten verwendet. Die Signaturliefe basiert auf den von der Topographie abhängigen thermischen Emissionen die mittels KSBÜ detektiert werden und betrachtet die Bereiche von Überhängen in den rekonstruierten Schichtbildern.

**Definition 5** *Tritt bei der Analyse der KSBÜ (Koaxiale Schmelzbad-Überwachungs)-Daten in einem aufgeschmolzenen Bereich oberhalb eines Kanals oder Überhangs eine verstärkte Varianz ( 50%) im Vergleich zu den typischen Prozess-Parameter-Einstellung auf, wird diese Schicht für die Zählung der **Signaturliefe** berücksichtigt. Die Zählung wird schichtweise fortgeführt, bis die erste Schicht unterhalb dieses Varianzwertes bleibt und den Gesamtwert der Signaturliefe bildet.*

Wie bei allen Fertigungsprozessen werden beim Laserstrahl-Schmelzen in wissenschaftlichen Arbeiten [162], bei Standardisierungs- und Zertifizierungsverfahren, bei Anlagenabnahmeprozessen und der Parameter-Optimierung Test-, Einstell- und Abnahmeteile zur Prüfung von definierten Merkmalen gefertigt [41]. In der additiven Fertigung werden üblicherweise mehrere Prüfungen in ein Bauteil integriert, wie das von der NIST vorgeschlagene Test-Artefakt [41] zeigt. Dieses Vorgehen wird hier reduziert, um die Effizienz der Anlagen- und Parameter-Tests zu verbessern, indem die Testteile klein gestaltet werden. Ziele sind dabei eine Reduktion der Aufbauzeit und eine Senkung des Materialbedarfs. Dies ermöglicht es die Testteile parallel zum Produktionsprozess und an allen Bauplattform-Positionen, also bei unterschiedlichen Randbedingungen zu generieren. Sobald die gewünschte Qualitätsstufe der Parameter-Entwicklung erreicht ist, werden normgerechte Testteile für statische und dynamische Tests aufgebaut (graue Kästen in Bild 40). Diese Testverfahren sind für Zertifizierungsverfahren notwendig und ebenfalls für Qualitäts- oder Freigabe-Prozesse verwendbar. Die durchgeführten Untersuchungen beinhalten den Aufbau von Kanalgeometrien welche in unterschiedlichen Orientierungen aufgebaut werden. Im Anschluss erfolgen Analysen der Gestaltabweichungen (vgl. Tropfen-Effekt 3) und der Porosität anhand zerstörender (Schliffbild-Untersuchung) und nicht-zerstörender

Prüfungen (CT, Lichtmikroskopie). Diese werden mit den Daten der KSBÜ verglichen die bezüglich der Signaturliefe betrachtet werden.

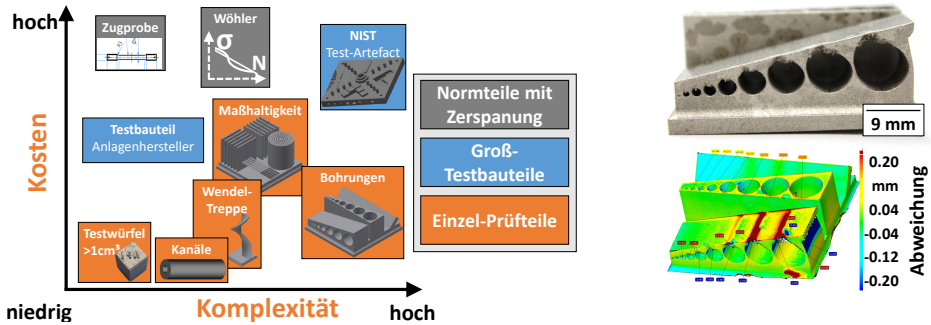


Bild 40: Effizientes Testkörperdesign (orange) senkt die Kosten gegenüber Groß-Testbauteilen (blau) [41] bei der Parameter-Optimierung. Zur Zertifizierung werden Normbauteile (grau) geprüft.

### 3.7.3 Spritzer-Signaturen

Die Spritzerbildung ist eine bekannte Ursache für Defekte und verminderte Bauteilqualität. Daher ist eine Detektion dieser Spritzer notwendig, um in einem nächsten Schritt Gegenmaßnahmen gesteuert einsetzen zu können, damit Defekte noch im Bauprozess verhindert werden. Die durchgeführten Untersuchungen betreffen das lokale Auftreten von Spritzern auf der Bauplattform und in Abhängigkeit der Prozessgasströmung, die Signaturen in Schichtbildern der Schmelzbad-Überwachung und die Auswirkungen auf die Bauteilqualität in Form der relativen Dichte und bei der Defektausprägung von Poren in Schlibfbildern.

Um den Einfluss von im Pulverbett liegenden Spritzern zu validieren werden Testwürfel aus dem Edelstahl 1.4404, mit einer Kantenlänge von 10 mm, bei gleichen Parametern und durch das gleiche Lasersystem aufgebaut. Der Füllfaktor der Bauteilfläche beträgt 50 %. Die Testwürfel werden mit einer einfachen Streifenbelichtung und Konturparametern gefertigt. Die Belichtungsvektoren wechseln schichtweise die Richtung zwischen -45 und +45 Grad, um die Richtungsabhängigkeit zu untersuchen. In einem Wiederholungsexperiment wird die Würfelgröße auf 75 % verringert, die Testwürfel-Anzahl erhöht und bei gleichem Füllfaktor (50 %) beide Lasersysteme für die Herstellung von jeweils 90 Würfeln verwendet.

### 3.7.4 Detektion und Laserpolieren von Oberflächen-Rauheit

Aufgrund der Bedeutung von Oberflächen-Fehlern des Pulverbett-basierten Laserstrahl-Schmelz-Prozesses werden Untersuchungen mit Parametervariation zu absichtlichen Erzeugung von Oberflächenrauheit, zum Laserpolieren und zur Anwendung von Algorithmen auf den oben untersuchten Datensatz der Serienbauteile durchgeführt.

#### 3.7.4.1 Vorversuche und Korrelation

Zuerst werden Untersuchungen mit Parametervariationen (Tabelle 7.4.7 im Anhang) vorgenommen und ein Algorithmus vorgestellt der für eine Korrelationsanalyse herangezogen wird. Zur Verdeutlichung der Methode dient Bild 41. Zuerst wird eine Filteroperation ausgeführt, bei der ein 6x6 Kernel verwendet wird um das Bild zu glätten. Um eine variable Bezugsgröße zu schaffen wird für den evaluierten Bereich der Umgebungs-Mittelwert berechnet, der zusätzlich von einem Toleranzbereich mit definierter Unter- und Obergrenze festgelegt ist. Bei der folgenden Binarisierung werden nun Pixelwerte ober- und unterhalb von diesem Toleranzbereich mit dem Maximalwert belegt, und Pixel innerhalb des Toleranzbereichs als Nullwert fortgeführt. Im Anschluss wird eine sog. *connected-component labeling* oder Umgebungsanalyse durchgeführt, um die Pixel-Inseln aus 0- und 1-Werten als geschlossene Einheiten zusammenzufassen [163]. Die nun entstandenen Pixelgruppen werden zusätzlich durch eine Flächen-Untergrenze gefiltert, um einzelne Pixelwert-Ausreißer zu eliminieren. Zuletzt erfolgt eine Zähloperation zur Quantifizierung der Anzahl und Größe der Pixel außerhalb der Toleranz. Zum Vergleich derart evaluierter Oberflächen-Werte wird bei verschiedenen Testreihen eine taktile oder optische Prüfung der Oberflächen vorgenommen.

#### 3.7.4.2 Anwendung auf Serienbauteil-Analyse

Weiter werden die bereits mittels lateraler PÜ untersuchten Serien-Baujobs mit dem in Abschnitt 3.3.5 gezeigten Bauteil nun mittels Schmelzbad-Überwachungs-Daten hinsichtlich der Rauheit untersucht. Dabei wird der Blob-Detektions-Algorithmus aus Abschnitt 3.3.3 angepasst und angewendet. Dadurch ist es möglich eine prozentuale Abschätzung zur von Rauheit betroffenen Fläche zu berechnen.

#### 3.7.4.3 Grundlagenversuche zum Laserpolieren

Das Laserpolieren von metallischen Werkstücken ist eine etablierte Methode zur Reduktion der Oberflächenrauheit, der Verbesserung der Mikrohärtigkeit, oder der Korrosionsbeständigkeit [164]. Hirsch und Demir *et al.* zeigen in [165,

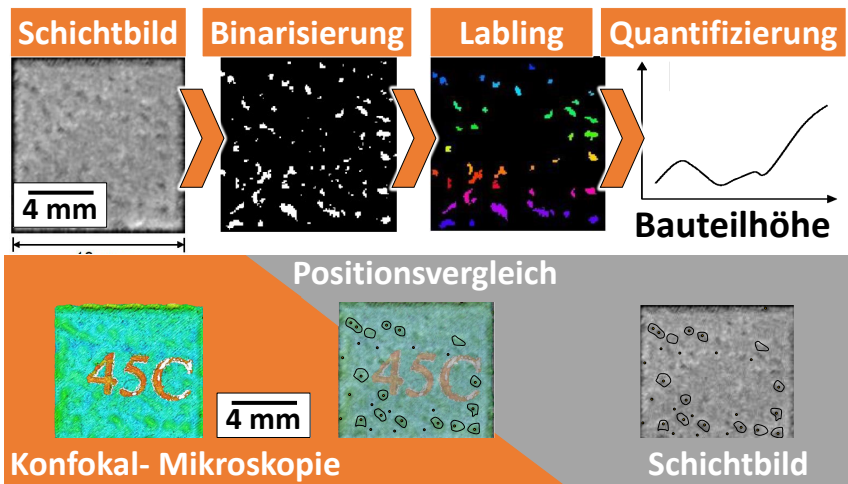


Bild 41: a) Vorgehen zur Evaluierung der Oberflächenrauheit. b) Deckungsgleiche Erhebungen in der Konfokal-Mikroskopie und den Schichtbild-Kontrasten.

166], dass die Porosität durch eine Doppeltbelichtung reduziert wird. Kruth *et al.* [164, 167] konnten zeigen, dass der Energieeintrag mit vergrößertem Laserspot-Durchmesser zu einer Rauheits-Reduktion von bis zu 75 % führen kann, wobei ein zu großer Energieeintrag die Oberflächenbeschaffenheit ebenfalls verschlechtert. Kiedrowski [168] zeigte, dass die Mikrostruktur von laserpolierten Oberflächen homogenisiert und die Korngröße des Gefüges verringert wird.

Um Parameter für die Mehrfachbelichtung zu erarbeiten werden mit dem Edelstahl 1.4404 quadratische und 3 mm hohe Block-Stützstrukturen mit 15 mm Kantenlänge aufgebaut, weil diese im Übergangsbereich Rauheit erzeugen. Im Anschluss werden zehn 25 µm-Schichten aufgebaut und poliert. Im Gegensatz zur Bearbeitung lokaler Defekte mit der Bearbeitung von geschliffenen Proben [165], wird die Hälfte der Probekörper an der gesamten Oberfläche je zwei mal belichtet. Der verwendete Parametersatz wendet eine geringe Fluenz, mit einem großen Laserspot-Durchmesser und einer langen Einwirkzeit an:  $P=80 \text{ W}$ ,  $v=200 \text{ mm/s}$ ,  $s=250 \text{ µm}$ ,  $h=150 \text{ µm}$ .

## 4 Ergebnisse

Nachdem die Methoden, Algorithmen und das Vorgehen im vorherigen Kapitel dargelegt wurden, werden in diesem Kapitel entsprechend der auf Bild 42 gezeigten Struktur die Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt und diskutiert.

5) Ergebnisse	
5.1) Fehleranalyse mittels Lateraler Prozessüberwachung	5.1.1)-6) Betrachtung und Signifikanz von Prozessfehlern bei einem Serienbauteil und im Prototypenbau.
5.2)-3) Untersuchungen zum Signalverständnis der koaxialen Prozessüberwachung	5.2) Entwicklung von Signalverständnis mittels Einzelspuren und Variation der physikalischen Randbedingungen 5.3.2)-3) Materialabhängige Defekterzeugung 5.3.3) Einfluss der Partikelgrößenverteilung
5.4) Prozess-Fehlerbilder zur koaxialen Schmelzbad-Überwachung	5.4) Fehlerkatalog zur elf Signaturen auf Schichtbildern des koaxialen Prozess-Überwachungs-Systems
5.5) Nutzbarmachung	5.5.1) Statistische Prozesskontrolle 5.5.2) Scan-Strategie- / Überhang-Parameter-Optimierung 5.5.3) Spritzer-Signaturen und Topographie Überwachung 5.5.4) Laserpolieren

Bild 42: Struktogramm des Kapitels Ergebnisse.

### 4.1 Fehleranalyse und laterale Prozessüberwachung

Hier werden die Ergebnisse der Fehler-Analyse vorgestellt, deren Ziel es ist die Häufigkeit und Art von Fehlerbildern zu erfassen, um eine Entscheidungsgrundlage für die Untersuchungen zur KSBÜ zu erarbeiten. Durch diese Prozesscharakterisierung ist der Handlungsbedarf für die reale Fertigung im Serenumfeld möglich. Zuerst werden die auftretenden Fehlerbilder qualitativ und quantitativ vorgestellt. Weiter wird der vorgestellte Klassifizierungs-Algorithmus (siehe Abschnitt 3.3.3) verwendet um Schichtbilder der lateralen PÜ zu untersuchen. Die untersuchten Baujobs wurden bewusst ohne Einschränkung und aus dem Prototypenbau gewählt, um eine Übersicht der Fehlerbilder und deren Verteilung zu erhalten. Die im Bauteil- und Stützstrukturdesign unterschiedlichen Einflüsse werden bewusst nicht diskutiert.

#### 4.1.1 Porosität und Härte

Die Porosität wurde für diese Analyse anhand von 26 Baujobs, bei jeweils vier Testkörpern ( $n = 104$ ), sowohl mittels Jolly-Waage, als auch mittels

Schliffbildanalyse für den Werkstoff 1.4404 untersucht. Dabei wurde archimedisch eine mittlere Dichte von  $7,8(1) \text{ g/cm}^3$  und metallographisch eine mittlere relative Dichte von 99,8 % ermittelt (Bild 44). Eine Auswahl der größten Fehlstellen die dabei aufgenommen wurden, ist auf Bild 43 gezeigt. Die Fehlstellen zeigen eine unregelmäßige Form und sind einem zu geringen Energieeintrag zuzuordnen [13]. Weil Prozessparameter und Schichtstärken konstant verwendet wurden folgen vier mögliche Ursachen: **1) Oberflächenrauheit** sowie **2) fehlerhafte Beschichtung** und in Folge dessen zu hohe Schichtstärke, **3) unaufgeschmolzene Spritzer** auf dem Bauteil und **4) Anlagenfehler**.

Weiter wurde auch die Vickers-Härte mit Prüfkraft 1 kp bei allen Proben untersucht und mittels halbautomatischer Messung an jeweils 16 Stellen geprüft (DIN EN ISO 6508):  $222.6 \text{ HV}_1$  ( $n = 16 \cdot 56 = 896$ ). Der Wert entspricht dem Literaturwert ( $\text{HV } 245 \pm 21$  (wie gebaut), 155 (konventionell) [169]) und dem Datenblatt des Lieferanten [144]. Werden die unteren (UGW) und oberen Grenzwerte (OGW) für die Dichte von 99 bis 100 % und für die Härte von 160 bis 260  $\text{HV}_1$  angenommen, wird der Prozess hier als fähig betrachtet, weil mit diesen Grenzwerten  $C_{pK}$ -Werte von über 1.66 erreicht werden.

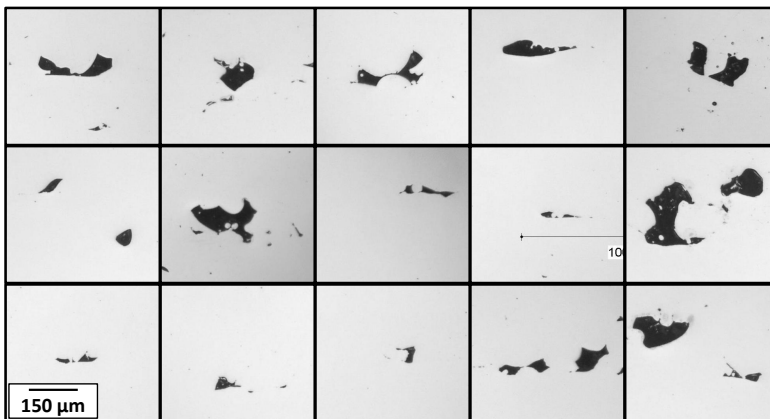


Bild 43: Eine Auswahl der größten entdeckten Poren die bei einer 1.4404 Studie aufgenommen wurden und mit Spritzern und Beschichtungsfehlern in Verbindung gebracht werden können.

#### 4.1.2 Oberflächenrauheit

Aufgrund prozesstypischer Anhaftungen von Pulvermaterial an vertikalen sowie nach unten gerichteten Bauteil-Flächen und von Spritzern behaftete und welligen horizontale Oberfläche, zeigt sich eine von der verwendeten

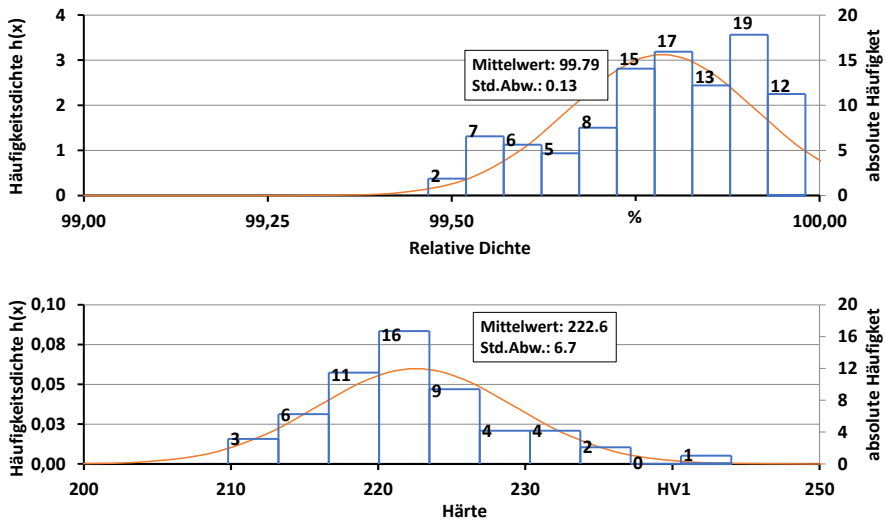


Bild 44: Gemessene relative Dichte und Härte von 104 Probekörpern des Edelstahl 1.4404. Die Härte wurde an 56 Testkörpern an je 16 Stellen mit der Prüfkraft 1 kP gemessen.

Partikelgrößenverteilung abhängige Oberflächenrauheit. Für die mittlere Partikelgröße  $d_{3,50} = 29.3\mu\text{m}$  ergeben sich wie auf Bild 45 gezeigte Oberflächen. Die Oberflächenrauheit auf horizontalen Flächen, im oder auf dem Bauteil, nimmt aufgrund der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Einflüsse Werte an die oberhalb der effektiven Schichtstärke liegen und dadurch die Prozessstabilität beeinflussen. Die Ergebnisse der taktilen Messungen zur Rautiefe  $R_z$  an vertikalen Oberflächen zeigen einen Mittelwert von  $45.85\mu\text{m}$  und eine Standardabweichung von  $14.87\mu\text{m}$ .

Die Rautiefe auf horizontalen Oberflächen zeigt aufgrund der verwendeten Schachbrett-Scanstrategie und auftretender Prozessfehler größere Schwankungen. Weiter tragen auf Bauteilen landende Spritzer in Abhängigkeit der Bauteile-Position und Prozessgasströmung auf der Bauplattform zur Rauheit bei. Bei 32,2 % aller Baujobs wurden Streifen auf mindestens einem Bauteil durch die Beschädigung des Beschichters festgestellt (vgl. Bild 49 c)). Seltener wurden Fälle beobachtet bei denen sich die Streifenbildung nach 20-50 Schichten auflöste. Hier haften Pulver-Agglomerate an Silikon-Beschichterlippen und lösen sich nach dem Abkühlen oder durch Reibung wieder. Streifenbildung führt zu regelmäßiger Porosität was durch Bild 46 bestätigt wird. Hier werden die Porenpositionen zwischen Schliffbild und Schichtbild der lateralen Prozessüberwachung vermessen.

## 4 Ergebnisse

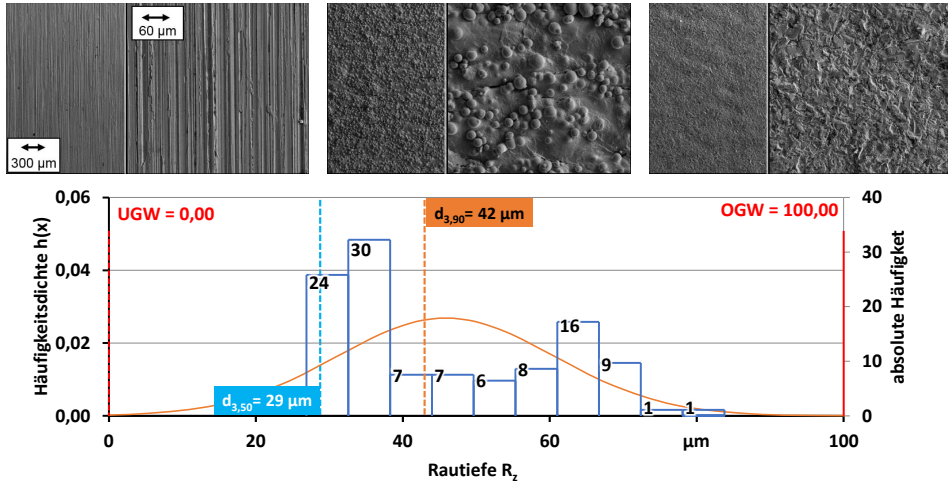


Bild 45: Ergebnisse taktiler Messungen und REM-Vergleich von vertikalen Oberflächen des Edelstahl 1.4404 mit  $R_z/R_{max}$  a) geschliffen; b) wie gebaut; c) gestrahlt (Korund). [ $\mu\text{m}$ ]. d) Rautiefe  $R_z$  von 110 Testkörpern. Material: Edelstahl 1.4404; Parameter siehe Tabelle 15

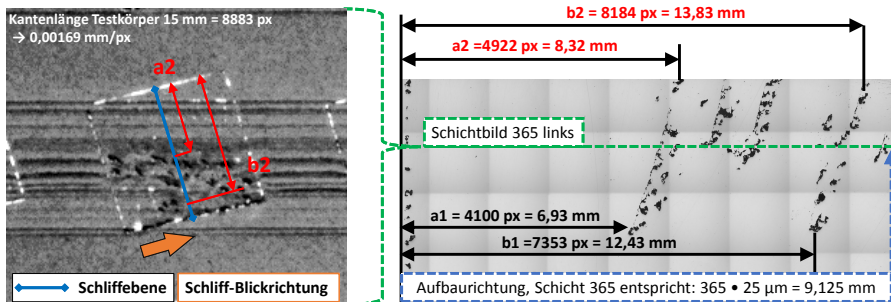


Bild 46: Vergleich der Porenposition im Schliffbild mit der Streifenposition in Schichtbildern der lateralen Prozessüberwachung QM-Coating (Concept Laser GmbH). Im Bild der Prozessüberwachung (links) zeigt die blaue Linie die Position und der orangene Pfeil die Blickrichtung des Schliffs. Die Positionen der Streifen und der Poren in der betrachteten Schicht (grüne Linie rechts) stimmen überein.

### 4.1.3 Scannersystem

Teile der Baujobs zeigen überhitzte Stellen, die sich an Überhängen und in Kernbereichen häufen. Weil während dieser Baujobs die Bauteile gleichzeitig mit zwei Lasersystemen aufgebaut wurden, ist die Ursachenanalyse erleichtert, weil der Prozessfehler nur bei der von Lasersystem 1 belichteten Fläche auftritt. Durch die während des Bauprozesses starke Schmauch- und Spritzerbildung, die Verbrennungserscheinungen und durch das Auslesen der Fehlercodes ist belegt, dass die Teleskop-Optik, des 3D-Scanners (Varios-

can Fa. Scanlabs GmbH) aufgrund einer Funktionsstörung der Laserspot-Durchmesser falsch gesteuert wurde. Die auf einen zu kleinen Laserspotdurchmesser projizierte Leistung erzeugte ein tiefes, turbulentes Schmelzbad, Spritzer und verdampftes sowie überhitztes Material. Bild 47 zeigt eine Bauplattform mit diesem Fehler. Der Füllfaktor bei diesem Baujob beträgt über 65 %.

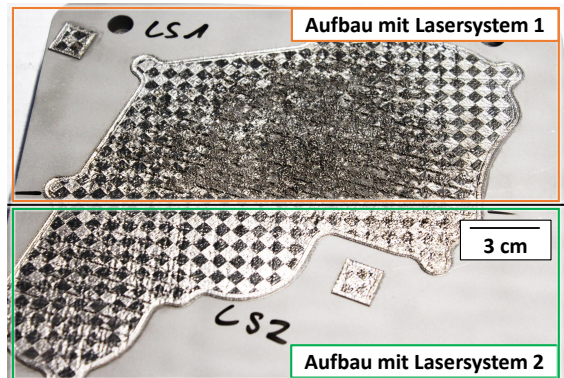


Bild 47: Zu großer Energieeintrag durch eine Fehlfunktion des Laserspot-Durchmesser-Teleskops eines 3D-Scanners des Lasersystems 1 (oben). Die untere Hälfte der Bauplattform wurde hier mit dem zweiten Lasersystem belichtet und zeigt keine erhöhte Rauheit. Der Systemfehler wurde bei einer anschließenden Prüfung bestätigt [S29].

#### 4.1.4 Software-Fehler

Das Slicing und die Auslegung der Scanvektoren werden automatisiert und im Prototypenbau aufgrund des Zeitdrucks, ohne manuelle oder automatisierte Kontrolle der Auslegung durchgeführt. Durch Näherungsverfahren treten Fehler bei der Datenkonvertierung von CAD zu STL-Dateien auf. Diese bleiben mitunter unbemerkt und führen zu **unbelichteten Bereichen** oder zu **zusätzlich belichteten Bereichen**, wie auf Bild 48 dargestellt. Das zur Erklärung bereitgestellte Beispiel mit der zusätzlichen Belichtung zeigt, wie nach der korrekten Belichtung des Bauteils (1) in der Folgeschicht eine freibleibende Fläche in der Bauteilmitte belichtet (2) und im Anschluss vom Beschichter abgekratzt wurde (3). Dies führt zum Prozessabbruch.

#### 4.1.5 Fehlerbild-Klassifizierung mittels Neuronaler Netze

Hier werden die Ergebnisse der Schichtbild-Klassifizierung mittels faltungs-basiertem neuronalem Netz dargestellt, die sich in eine gemischte Baujob-Testreihe aus dem Prototypenbau und eine Serienbauteil-Testreihe gliedern.

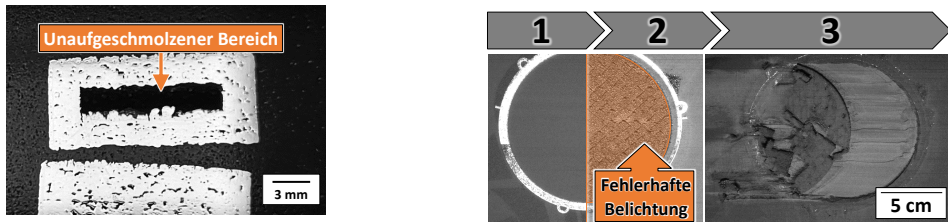


Bild 48: a) Schweißprobe mit unaufgeschmolzenem Bereich eines Testteils b) Zusatzbelichtung von freibleibenden Flächen und Prozessabbruch.

Bei der Untersuchung der Ergebnisse die auf Bild 49 zusammengefasst sind, wird deutlich, dass die Oberflächenrauheit als Fehlerbild dominiert.

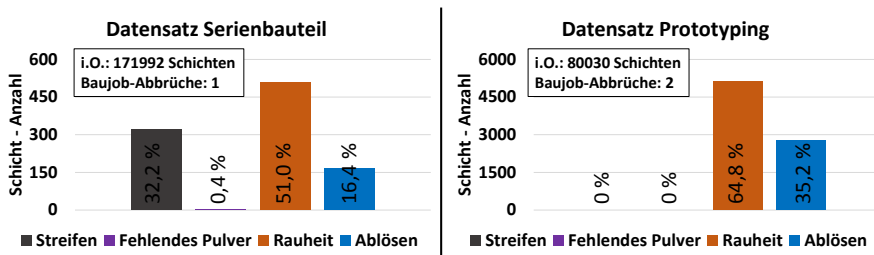


Bild 49: Die Ergebnisse der Fehlerklassifizierung aus der Analyse der Schichtbilder der lateralen PÜ belegen die Relevanz der Oberflächenrauheit. Der Anteil an den Gesamtfehlern ist in Prozent angegeben.

#### 4.1.6 Zusammenfassung zur Fehleranalyse

In der dargestellten Fehler-Analyse ist die Oberflächenrauheit von Bauteilen und der belichteten Flächen während des Prozesses mit über 50 % der am häufigsten beobachtete Prozessfehler. Die separat gelistete Streifenbildung auf Bauteilen unterstreicht dies, weil sie teilweise aus der Oberflächenrauheit resultiert, zu Schäden am Beschichter führt und für tiefe Streifen in der Bauteil-Oberfläche verantwortlich ist. Dazu ist auf Bild 50 ein Beispiel mit 450 µm Streifen-Tiefe auf der Oberfläche des generierten Ausschuss-Bauteils gezeigt. Die ebenfalls häufig beobachteten Abweichungen von der Maßhaltigkeit aufgrund von Verzug können Bedienfehler zurückgeführt werden. Die über Zeiträume von mehr als 16 Monaten untersuchte Dichte von Bauteilen zeigt sowohl bei der archimedischen als auch bei der Schliffbild-Methode Werte von über 99,5 % [S2, S27, S31]. Qualitätsverluste aufgrund von erhöhtem Sauerstoffanteil, Scanner-Funktionsfehlern, Skalierungsfehlern oder Softwarefehlern sind durch eine regelmäßig durchgeführte Anlagenwartung und einen erhöhten Reifegrad vermeidbar. Aufgrund dieser Zwischen-

ergebnisse wird bei den folgenden Untersuchungen zur PÜ die Detektion der Oberflächenrauheit von aufgeschmolzenen Schichten im inneren des Bauteils als besonders relevanter Prozessfehler verfolgt.

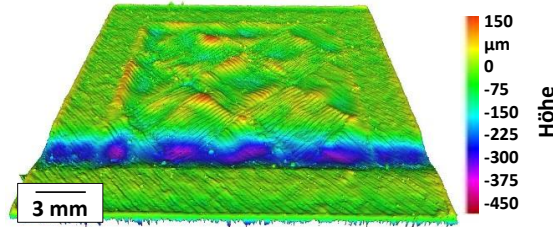


Bild 50: Beschichterstreifen: Die mittels Konfokal-Mikroskopie aufgezeichnete Oberfläche eines Testkörpers zeigt einen 450 µm tiefen Streifen als Folge einer beschädigten Beschichtungsrippe.

## 4.2 Signalverständnis der koaxialen Prozess-Überwachung

Dieses Kapitel untersucht das Emissionsverhalten des Schmelzbades unter kontrollierter Variation der physikalischen Randbedingungen im Hinblick auf die Entwicklung des Signalverständnisses. Dabei wurden sowohl die Prozess-Parameter als auch die Umgebung der Interaktionszone variiert, wie in Abschnitt 3.5 beschrieben. Ziel ist es mit Hilfe des Signalverständnisses eine Basis für spätere Entwicklungen zur Nutzbarmachung des koaxialen Schmelzbad-Überwachungs-Systems zu schaffen.

### 4.2.1 Einzelspur-Untersuchungen

**Leistungsvariation:** Um das Signalverhalten der Rohdaten und der QM-Meltpool-Daten bei unterschiedlichen Leistungen zu untersuchen werden zweimal Einzelspuren mit Laserleistungen zwischen 80 und 280 W erzeugt (konstante Parameter: Scangeschwindigkeit: 500 mm/s, Laserspot-Durchmesser: 70 µm). Zum Vergleich werden zwei Schwellwerte, 50 und 125, für die direkte Kameraauswertung gezeigt. Der Unterschied der gemessenen Schmelzbadfläche ist damit zu erklären, dass die Tiefe des Schmelzbades koaxial nicht direkt detektierbar ist. Abgesehen von der Höhe der mikroskopierten Querschliffe zeigt sich ein proportionales Verhalten. Der Verlauf der Querschliff-Höhe im unteren Leistungsbereich entspricht dem unzureichenden Aufschmelzen, wodurch sich Verwerfungen (sogenanntes Humping [37]) ausbilden (vgl. Bild 51). Die Betrachtung der Standardabweichung, die in Bild 52 als Fehlerbalken angefügt ist, liefert einen Hinweis auf die Stabilität

des Schmelzbad-Signals und der zugrundeliegenden Schmelzspur. Prozessinstabilität resultiert bei Einzelspuren aus einer unzureichenden Anbindung, also einem unzureichenden Aufschmelzen aufgrund eines zu geringen Energieeintrags sowie aufgrund der stochastischen Anordnung von unterschiedlich großen Partikeln an variierenden Positionen relativ zur Interaktionszone.

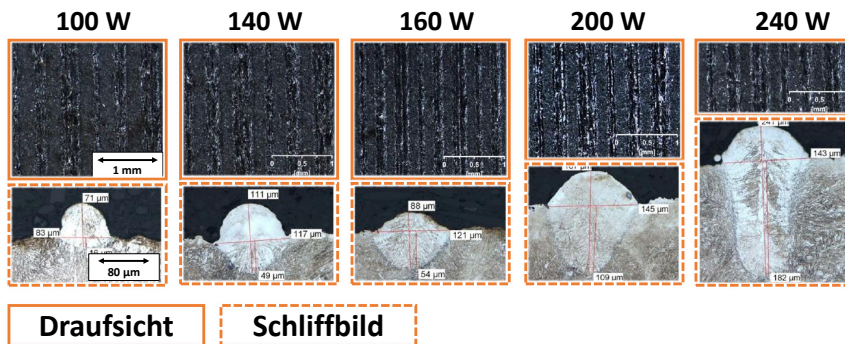


Bild 51: Die Schliffbilder der Einzelspuren unter Variation der Laserleistung zeigen bei einer Leistung von 100 W eine zu geringe Anbindung und in der Draufsicht einen unregelmäßigen Nahtverlauf.

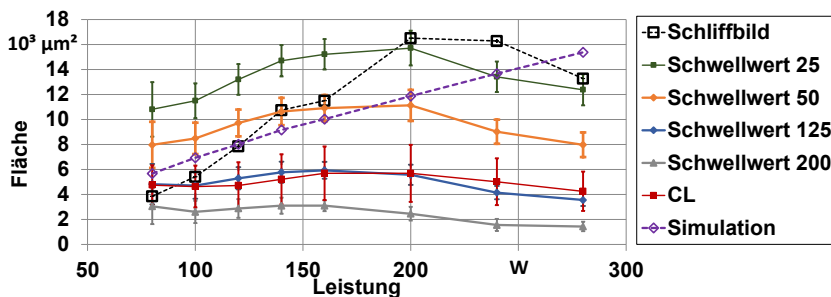


Bild 52: (a) Laserleistungs-Variation: Vergleich von QM-Meltpool und manueller Kameraaufzeichnung von zwei gleichen Spurbelichtungen inkl. Werten der Schliffbild-Mikroskopie. Konstante Werte: Scan-Geschwindigkeit 500 mm/s, Laserspot-Durchmesser 70  $\mu\text{m}$ .

**Variation der Scangeschwindigkeit:** Zur Untersuchung des Signalverhaltens unter Variation der Scangeschwindigkeit wurden Einzelspurversuche mit Geschwindigkeiten zwischen 300 und 1000 mm/s durchgeführt (konstante Parameter:  $P = 140 \text{ W}$ ,  $s = 70 \mu\text{m}$ ). Bild 53 zeigt das Verhalten der Naht-Geometrie zu den Kameradaten. Sowohl bei der Rohdaten- als auch bei der QM-Meltpool Verarbeitung ist keine Korrelation zur Naht feststellbar. Die Beobachtungen zeigen, dass hier eine höhere Aufnahmefrequenz und

räumliche Auflösung durch ein beschränktes Messfeld notwendig ist, um den veränderten Energieeintrag und das resultierende Schmelzbad unterscheiden zu können. Alternativ wäre eine starke Reduktion der Aufnahmefrequenz denkbar, dadurch wird jedoch die räumliche Auflösung reduziert.

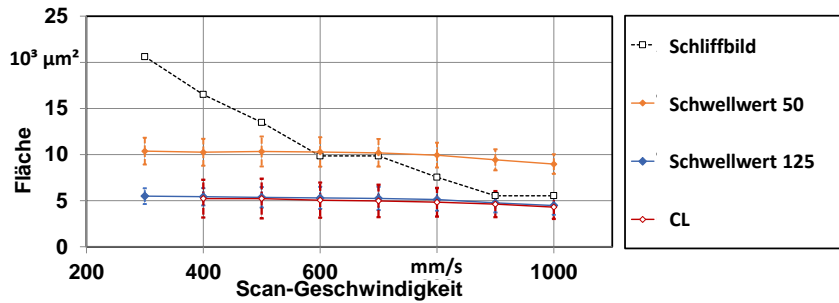


Bild 53: Schmelzbad-Fläche unter Variation der Scan-Geschwindigkeit: Vergleich von QM-Meltpool und Kamerarohdaten-Auswertung von zwei gleichen Spurbelichtungen inkl. Werten der Schliffbild-Mikroskopie. Konstante Werte: Laser-Leistung 140 W, Laserspot-Durchmesser 70 μm.

**Variation des Laserspot-Durchmessers:** Der dritte untersuchte Prozess-Parameter ist der Laserspot-Durchmesser  $s$  (konstante Parameter: Laserleistung  $P_L = 140$  W, Scangeschwindigkeit  $v = 500$  mm/s). In den Schliffbildern ist erkennbar, dass die Tiefe mit steigendem Laserspot-Durchmesser von 87 bis 2 μm ab-, während die Höhe von 32 bis 96 μm zu- und die Breite erst beim auftretenden Balling abnimmt (Bild 54). Das Signal der Photodiode bleibt über den gesamten Bereich konstant. Die Flächenberechnung des Kamerasignals zeigt keine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Schmelzbadbreite. Die Standardabweichung in Bild 54 ist als Signatur für Defekte verwendbar und als Fehlerbalken eingetragen. Zusätzlich sind die Schliffbilder bei 90 μm, dem Standard-Parametersatz, und bei 190 μm, zum Balling, gezeigt. Der in Schliffproben bewährte Standard-Parametersatz weist ein hohes Aspektverhältnis aus Breite zu Tiefe von  $\frac{B}{T} = \frac{114}{35} = 3.26$  auf.

**Thermische Historie:** Das parameterabhängige Verhalten der zuvor gezeigten Einzelspur-Versuche konnte mit Mehrfachspuren reproduziert werden. Die Diagramme sind dazu im Anhang beigefügt (Bild 123), Bild 55 zeigt das Schema, Schliffbilder und die Auswertung der Schichtbilder. Die Schichtbilder der CL-Software zeigen einen Anstieg des Signals mit der Anzahl der Spuren, der in der direkten Aufnahme des Kamera-Signals nicht reproduziert wird. Weil der CL-Algorithmus die Rohdaten innerhalb einer Gitterzelle miteinander verrechnet und den jeweils höchsten Wert in die TIFF-Bilder

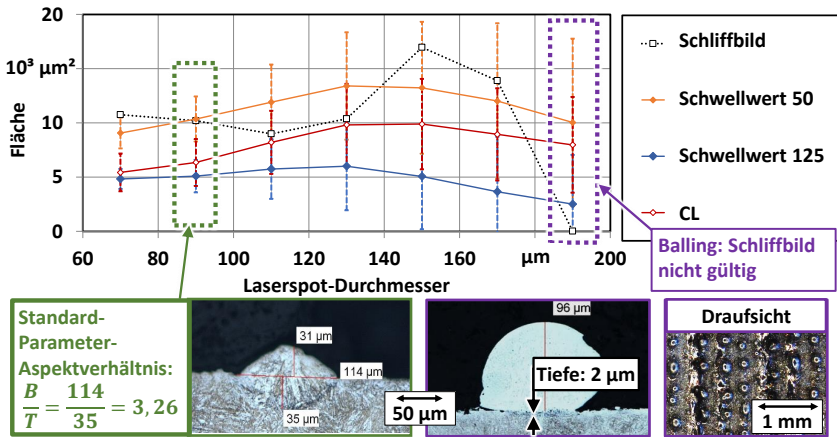


Bild 54: Die Schliffbild-Fläche und die Kamera-Werte in Abhängigkeit des Laserspot-Durchmessers zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem QM-Meltpool Signal. Das Aspektverhältnis bei Standardparametern und der Balling-Effekt bei Laserspot-Durchmesser 190  $\mu\text{m}$  sind im Schliffbild gezeigt. Konstante Werte: Laser-Leistung 140 W, Scan-Geschwindigkeit: 500 mm/s.

speichert, ist dieser Anstieg aufgrund der hohen Varianz der Schmelzbad-Signale nicht eindeutig zuzuordnen. Daher werden ähnliche Versuche auf Testbauteilen durchgeführt, deren Ergebnisse im Abschnitt 4.2.2 gezeigt werden.

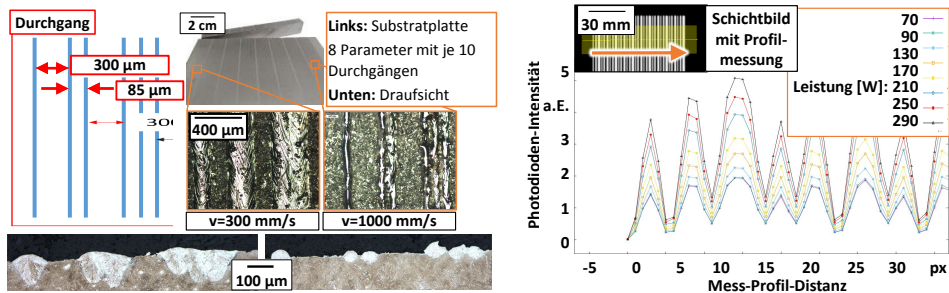


Bild 55: Spurbstand und Mehrfachspuren ( $P=140 \text{ W}$ ,  $s=70 \mu\text{m}$ ): Links: Ein-, Zwei- und Dreifachspur-Durchgang mit Draufsicht und Schliffbildern. Rechts: Profilmessung auf Schichtbildern der CL-Software zeigt zunehmendes Signal.

**Positions- und Richtungsabhängigkeit:** Hier werden die in Abschnitt 3.5.1 erläuterten Einzelspur-Untersuchungen zur Positions- und Richtungsabhängigkeit der KSBÜ gezeigt. Die Signalanalyse der konzentrischen Kreise mittels Schwellwert 50 und Mittelwert-Bildung über den jeweils gesamten Kreis, zeigt die bereits untersuchte Schichtstärken-Abhängigkeit und ein

entsprechend niedriges Signal,  $\sim 80$  px, bei der ersten Belichtung bei  $300 \mu\text{m}$  und  $\sim 120$  px bei der obersten  $25 \mu\text{m}$  hohen Pulverschicht (Bild 56). Weiter wird belegt, dass das gemittelte Signal von einzelnen konzentrischen Kreise innerhalb des untersuchten Bereichs bei gleicher Schichthöhe und Scannerposition keine messbaren Unterschiede aufweisen. Die Signalanalyse

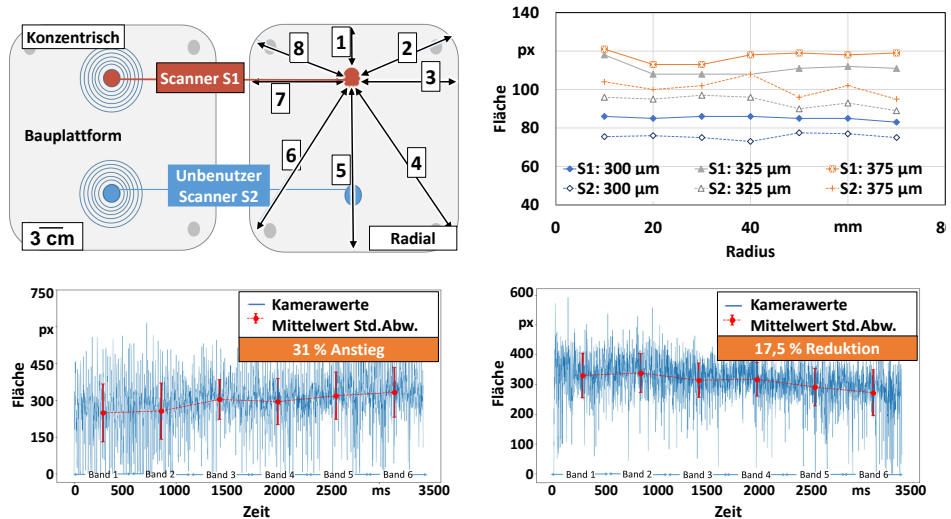


Bild 56: a) Einzelpurexperimente zur Richtungsabhängigkeit (links) und zur Positionsabhängigkeit. b) Signalveränderung innerhalb der sechs Gruppen von konzentrischen Kreisen ist nicht messbar. c) Signalanstieg um 31 % bei Belichtung in Richtung des Scanners. d) Signalreduktion um 17,5 bei Radialbelichtung weg vom Scanner.

der radialen Vektoren zeigt ein mit der Entfernung abfallendes Signal, wobei der gemessene Unterschied mit 17,5 % bei der nach außen laufenden Belichtung geringer ausfällt, als bei der nach Innen laufenden Belichtung mit 31 %. Dies ist mit der Schmelzbad-Form erklärbar. In [60] wird die Schmelzbad-Form nach hinten gekippt beschrieben, was durch den Druck der Dampffackel und die Marangoni-Strömung erklärt wird. Demnach zeigt die Flächennormale des Schmelzbad bei den radialen Vektoren richtungsabhängig zum Scanner oder weg von diesem. Dies entspricht also einer relativ zur optischen Achse der KSBÜ größeren oder kleineren emittierenden Fläche.

**Variation der Schichthöhe:** Bild 57 zeigt die verwendete Opferplatte mit breiten Nuten die Draufsicht auf die gesamte Opferplatte. Das mit durchgezogenen Linien dargestellte Schmelzbad-Signal fällt durch die zunehmende Schichtstärke, die mittels Farbkodierung dargestellt wird, klar ab.

Bild 58 zeigt die beiden verwendeten Opferplatten und das Ergebnis aus der Kamera-Daten-Auswertung. Die Schichthöhe wird durch die Ergebnisse als

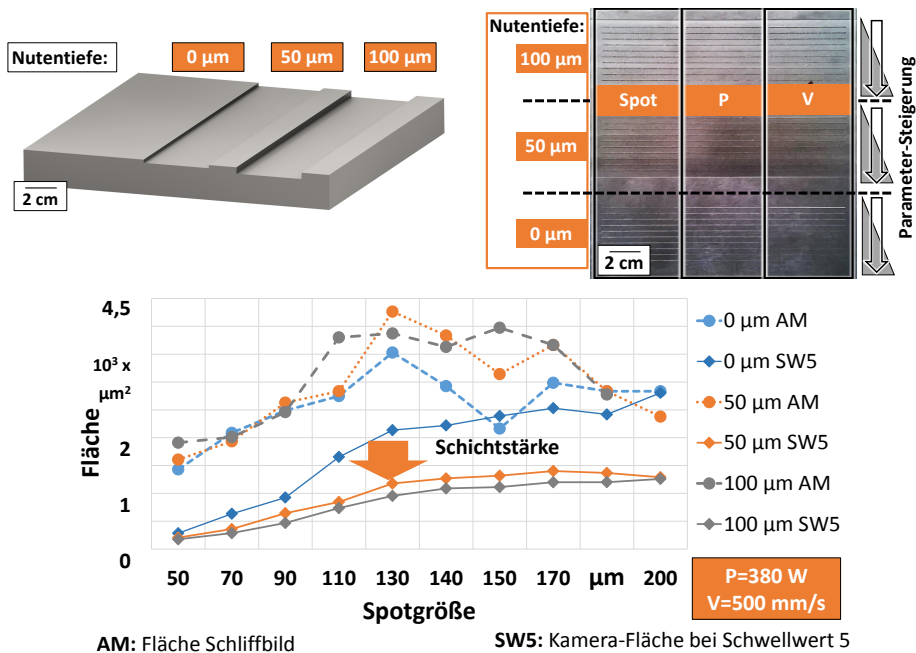


Bild 57: a) Visualisierung der verwendeten Platte mit 4 cm breiten und 50 und 100 μm tiefen Nuten, b) Horizontale Einzelspuren mit spalten- und blockweisen Parameter-Steigerungen der Laserspot-Durchmesser, Leistung (P) und Scan-Geschwindigkeit (V) in Pfeilrichtung innerhalb der Nuten-Flächen. c) Der Signalverlust durch die zunehmende Schichtstärke vergrößert sich bei steigendem Laserspot-Durchmesser.

dominanter Einflussfaktor für die Schmelzbad-Signatur bestätigt, weil das Signal dadurch um bis zu 50 % verringert wird.

**Aluminium Einzelspurversuche:** Das verbreitete Material  $AlSi_{10}Mg$  wurde untersucht um Unterschiede zwischen den Materialien aufgrund der Wärmeleitung, Viskosität oder Dichte feststellen zu können. Dafür werden die Erstsichtbelichtung von Testwürfeln und Einzelspurversuche mit der Opferplatte mit breiten Nuten 57 wiederholt. Bild 59 zeigt mehrere Beispiele für die überhöhte Helligkeit und Varianz der ersten Schicht beim Aufbau von  $AlSi_{10}Mg$ -Bauteilen. Im Histogramm von Photodioden-Schichtbildern wird dieses Verhalten mit dem höher auslaufenden Histogramm aus Schicht 1 quantitativ belegt 59. Die Versuchsreihe mit ausgefrästen Nuten für die Untersuchung der Scan-Parameter-Abhängigkeit in Verbindung mit der Schichtstärke wird wie oben bereits dargestellt für das Material  $AlSi_{10}Mg$  durchgeführt. Hier ist die Varianz der aufgenommenen Rohdatenbilder aufgrund von Spritzern zu groß, so dass eine Verarbeitung unbrauchbar ist. Bild 60 zeigt aufeinanderfolgende Bilder zu diesem Versuch. Die hohe Anzahl an

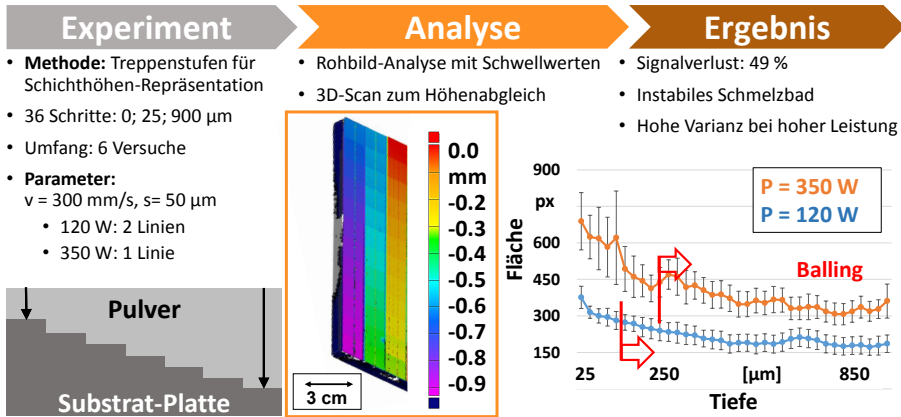


Bild 58: Die Pulver-Schichthöhe wird durch die kontinuierliche Belichtung einer Schmelzspur auf einer Substratplatte mit Treppengeometrie als dominanter Einfluss auf das KSBÜ-Signal bestätigt.

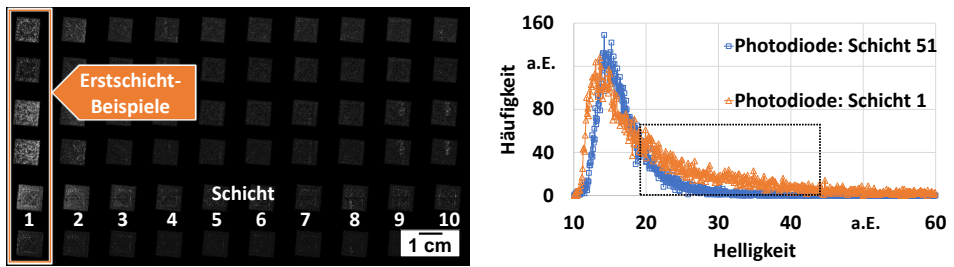


Bild 59: Durch die verstärkte Spritzerbildung in der Erstschicht-Belichtung von AlSi10Mg-Bauteilen kommt es zu einer Erhöhung der Helligkeit und der Varianz im Schichtbild: a) Schichtbild-Serien von links nach rechts. b) Histogramm-Vergleich der mittels Photodioden koaxial detektierten Messpunkte der Schichten 1 und 51 eines Testkörpers.



Bild 60: Einzelspurversuche mit dem Material AlSi10Mg sind aufgrund der starken Spritzerbildung und der hohen Varianz im Signal nicht verwertbar.

Spritzern auf den Bildern 2,3,5 und 6 ist deutlich erkennbar und die Bilder 6-8 zeigen die signifikanten Intensitätsunterschiede einer regelmäßig generierten Schmelzspur. Die Ergebnisse aus den Schlibfbildern der Einzelspurversuche

sind nur im Anhang abgebildet (120), weil Sie nicht sinnvoll mit den Daten der KSBÜ korrelierbar sind.

### 4.2.2 Umgebungsvariation der Interaktionszone

Neben den gezeigten Einflüssen durch die Prozess-Parameter und das verwendete Pulvermaterial wird auch das bereits konsolidierte Material vorheriger Schichten und die Bauteilgeometrie als Einfluss auf das detektierbare Signal untersucht. Der dafür entwickelte Testkörper beinhaltet Ebenen in unterschiedlicher Schichthöhe für das Belichten von Einzelspuren. Im Folgenden werden die signifikanten Beobachtungen dargestellt. Das experimentelle Vorgehen ist im Methodenteil in Bild 36 gezeigt.

**Vergleich von Schliffbild-Spurbreite und Energiedichte:** Die Schmelzspuren der obersten Bauteilebene werden in Schliffbildern untersucht. Dabei werden deren Breite, Höhe, Tiefe und Querschnitts-Fläche mit einem Mikroskop vermessen. Bild 61 zeigt den Vergleich der Schmelzbad-Querschliff-Fläche mit der berechneten Linienenergiedichte. Der erwartete lineare Zusammenhang wird bestätigt.

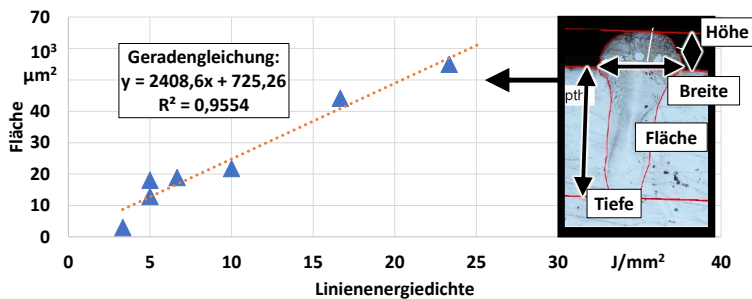


Bild 61: Schmelzbadsignal und Querschnittsfläche

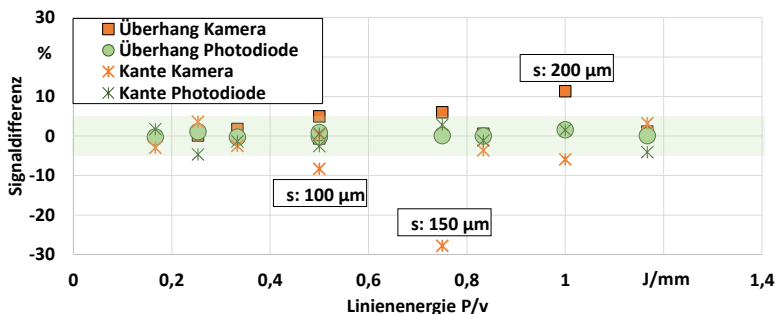


Bild 62: Signaldifferenz zwischen der Kanten- und der Flächenbelichtung.

**Kanten und Überhang-Belichtung:** Im Experiment wird die Annahme eines signifikanten Einflusses auf das detektierbare KSBÜ durch Überhang-Geometrien nur bei großen Laserspot-Durchmessern bestätigt. Der Laserspot-Durchmesser wird hier von 50 bis 200  $\mu\text{m}$  gesteigert. Die Ergebnisse werden auf Bild 62 gezeigt. Hier ist ein 3 % Toleranzband grün eingefärbt. Bei den markierten Punkten mit angegeben Laserspot-Durchmesser beträgt die Differenz zur Referenz-Spur auf der Bauteilfläche 8,3 (100  $\mu\text{m}$ ), -27,8 (150  $\mu\text{m}$ ) und 11,3 (200  $\mu\text{m}$ ) %. Mit zunehmendem Laserspot-Durchmesser verliert sich ein wachsender Teil der eingekoppelten Energie weiter weg von dem dichten und besser wärmeleitenden Testkörper.

**Bauteilhöheneinfluss:** Durch den steigenden Abstand zum Substrat und eine ansteigende Temperatur des Bauteils ist ein Anstieg des Signals zu erwarten. Bild 63 zeigt, dass dies nicht beobachtet wird. Lediglich bei der Analyse der ersten Schichten über der Bauplattform können höhere Intensitäten und Schmelzbad-Flächen gemessen werden. Durch eine zu niedrig eingestellte Beschichtungs-Pulvermenge wurde bei einem Bauteil ein Pulvermangel, also ein unbeschichteter Bereich, während der ersten Schichten (gelbe Markierung) festgestellt. Durch die erneute Beschichtung entsteht an der zuvor unbeschichteten Stelle eine überhöhte Pulverschicht (Schicht 7, rote Markierung, Bild 63).

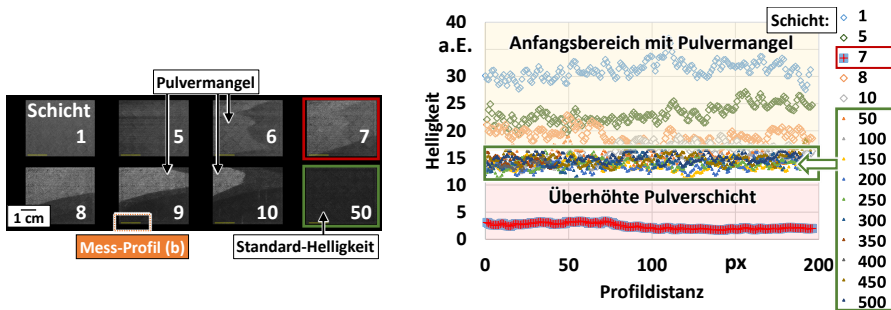


Bild 63: Die Höhe des Bauteils und die dabei angestaute Wärme tragen nicht messbar zum koaxial detektierten Signal bei, nur die Pulverschichthöhe wird vom System detektiert. Das Mess-Profil wird für jede Schicht an der gleichen Position angelegt und bei b) aufgetragen.

Alle weiteren Schichten, 100-500 ( $\equiv 12,5 \text{ mm}$ ), liegen in einem grün markierten 3 % Toleranz-Intervall. Die Annahme einer konstanten Signalstärke wird hier also bestätigt. Bei einstelligen Schichthöhen ist zudem der Einfluss der noch wachsenden effektiven Schichtstärke zu berücksichtigen, der sich auf das resultierende Schmelzbad-Signal auswirkt.

**Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer:** Die Histogramme der erzeugten Schichtbilder der koaxialen Kameraauswertung geben entsprechend der

Helligkeit der einzelnen Pixel Aufschluss über die Fläche des Schmelzbades. Wie auf Bild 64 zu sehen, zeigt das Kamera-Signal keinen signifikanten oder regelmäßigen Unterschied zwischen unterschiedlichen Schichten.

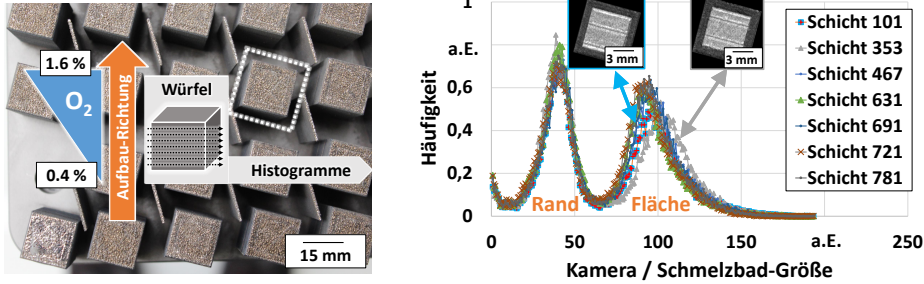


Bild 64: Die Steigerung des Sauerstoffgehalts von 0,4 auf 1,6 % zeigt keinen Effekt auf die Schmelzbad-Größe bei Würfel-Testkörpern (b). Die Graustufenbilder zeigen analysierte Schichtbilder mit den im Vergleich zur inneren Fläche (Fläche) im Histogramm beschrifteten dunkleren Randbereichen (Rand).

**Grundlagenuntersuchung zum Rauheitseinfluss:** Wie in Abschnitt 3.5.1 erläutert, werden Einzelspur-Untersuchungen mit variiertem Substratplatten-Topographie durchgeführt, um diesen Einfluss zu quantifizieren und mit Parameter-Änderungen vergleichen zu können. Bild 37 zeigt das Belichtungsschema und eine Versuchsplatte. Wie auf Bild 65 dargestellt, wird in den Schichtbildern (a) der CL-Software die zunehmende Rauheit der zerspannten Grundplatten durch die koaxiale Überwachung der thermischen Strahlung des Schmelzbades deutlich.

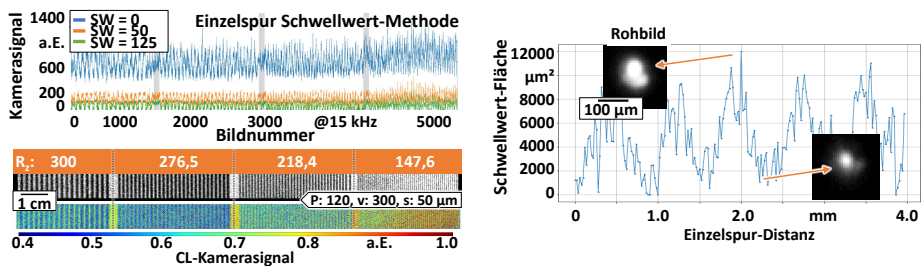


Bild 65: a) b) Unterschiedlich tiefe Nuten dominieren das Kamera-Signal. c) Bei dem verwendeten Schwellwert von 125 fällt das Einzelspur-Signal auf 0, was bei der CL-Auswertung schwarze Streifen erzeugt.

Bild 65 oben zeigt das mit der Schwellwert-Methode ausgewertete Kamera-Signal einer Einzelspur mit den Schwellwerten 0, 50 und 125. Es handelt sich dabei um Rauheitswerte von 300 bis 147,6. Zum Vergleich sind die Schichtbilder der CL-Software beider Versuche nebeneinander und mit den zuvor

taktill gemessenen Rauheitswerten abgebildet. Rechts daneben wird ein Ausschnitt der Einzelspur-Daten aufgelöst und die Rohbilder einer Signal-Spitze ( $\sim 12000 \mu\text{m}^2$ ) und eines Minimal-Wertes ( $\sim 1000 \mu\text{m}^2$ ) eingeblendet. Die Umrechnung der belichteten Kamerafläche zur Schwellwert-Fläche erfolgt wieder mit dem oben gemessenen Abbildungsmaßstab ( $6,7 \mu\text{m} / \text{px}$ , siehe Abschnitt 3.4.2). Außerdem ist erkennbar, dass die verwendeten Prozess-Parameter Einfluss ausüben, denn die bei 65 sichtbare Signalvarianz mit 70 W fällt bei dem vergleichbaren Rauheitswerten von 300 und 304 schwächer aus als bei der Leistung von 120 W 65.

### 4.2.3 Aufbau dünner Wände

Bei der Signalanalyse nach dem Aufbau von dünnen Wänden, wird das jeweilige Histogramm zur Schmelzbad-Fläche und insbesondere die Parameterabhängigkeit und die Schichtabhängigkeit untersucht. Bei der Auswertung der einzelnen Histogramme sind Maxima an regelmäßigen Positionen erkennbar, die auf eine Winkelabhängigkeit und eine Bauteilabhängigkeit in Verbindung mit dem FPGA-Algorithmus zurückzuführen sind. Die Position der ersten beiden lokalen Maxima wird durch Gauss-Fits bestimmt und über die Laserleistung dargestellt (Bild 66). Fünf Experimente mit den Edelmetallen 1.4404, 1.4542, sowie der Legierung AlSi10Mg und den im Anhang dargestellten Parametern (Tabelle 8) bestätigen den linearen Zusammenhang des von der Software ausgegebenen Signals. Bei keinem der ausgewerteten Experimente wird eine Schichthöhenabhängigkeit des Signals aufgrund der thermischen Leitfähigkeit des umgebenden Pulvers festgestellt. Diese ist also entweder vom System nicht messbar, oder deren Ausprägung ist nicht signifikant.

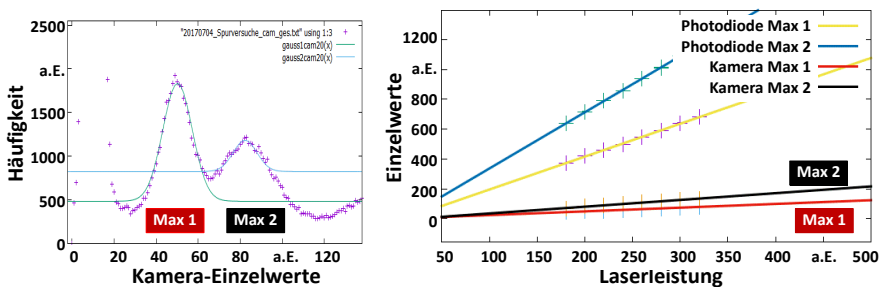


Bild 66: Links: Die Bestimmung von Maxima-Positionen im Helligkeits-Histogramm der KSBÜ-Daten zu generierten Wänden wird mittels Gauss-Fit an zwei lokalen Maxima durchgeführt. Das von der QM-Meltpool 3D Software ausgegebene Signal verhält sich linear zur variierten Laserleistung.

#### 4.2.4 Unterscheidbarkeit aufgenommener Kamerabilder

Durch die oben durchgeführten Experimente steht ein Datensatz zur Verfügung der es ermöglicht Methoden des maschinellen Lernens und der statistischen Bildverarbeitung einzusetzen, um die Unterscheidbarkeit von Rohbild-Daten zu untersuchen. Wenn Prozess-Parameter-Einstellungen und physikalische Randbedingungen klar unterscheidbar sind und sich der Ereignishorizont nicht überlappt, ist eine Prozess-Überwachung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Störungs-Einflüssen ermöglicht.

##### 4.2.4.1 Klassifizierung mittels Neuronaler Netze

Wie in Abschnitt 3.5.2.2 beschrieben, wurden zwei Netzwerke, ein Fully Connected Network (FCN) und ein Faltungsbasiertes Neuronales Netzwerk (FNN), ausgewählt, trainiert und getestet, um die Klassifizierung von Rohbild-Daten durchzuführen. Bei der Klassifizierung der Laserspot-Größenvariation konnte für beide Netzwerke die höchste Genauigkeit (FCN / FNN: 93 / 94 %) erzielt werden, hingegen wurde bei der Klassifizierung der Scan-Geschwindigkeit eine niedrige Genauigkeit festgestellt (FCN / FNN: 67 / 67 %). Dieses Ergebnis bestätigt die vorher gezeigten Ergebnisse aus der Auswertung mittels Schwellwertmethode. Bezüglich der Bilddaten der untersuchten Rauheits-Strecken ergibt die Auswertung mittels trainierter Modelle keine erfolgreiche Klassifizierung (FCN / FNN: 54 / 55 %). Obwohl die bisherigen Ergebnisse keine ausreichende Klassifizierungs-Genauigkeit ermöglichen, werden die Datensätze in 4 Gruppen kombiniert und das FNN jeweils erneut trainiert. Die Vorhersage-Genauigkeit für die vier Gruppen ergibt:

**Laserspot-Durchmesser / Scangeschwindigkeit / Rauheit: 68 %**

**Scangeschwindigkeit / Rauheit: 62 %**

**Laserspot-Durchmesser / Scangeschwindigkeit: 74 %**

**Laserspot-Durchmesser / Rauheit: 73 %**

##### 4.2.4.2 Unterscheidung mittels Hauptkomponentenanalyse

Eine andere Möglichkeit die Unterscheidbarkeit der Schmelzbad-Überwachungsbilder zu untersuchen ist die Hauptkomponenten-Analyse (PCA), welche mit den gleichen Rohdaten durchgeführt wurde. Bei dieser Betrachtung wurde ein Zwischenschritt, die Beschreibung der Rohbilddaten mittels zentraler Momente, eingefügt. Der Vorteil der PCA liegt in der Visualisierungs-Möglichkeit, siehe Bild 67 und Bild 68, der Ergebnisse, besonders bei der Dimensions-Reduktion auf zwei Achsen bzw. Komponenten. Wie in Bild 67 zu sehen, zeigt die Analyse des Laserspot-Durchmesser-Datensatzes eine Abstufung zwischen einzelnen Parameter-Einstellungen. Zwar zeigt auch die Betrachtung des Rauheits-Datensatzes deutliche Häufungen,

jedoch überlagern sich alle Datenpunkte deutlich, was eine Unterscheidung erschwert. Die Betrachtung des vermischten Datensatzes mit jeweils 10.000 Bild-Rohdaten, ergibt eine weite Streuung der auf zwei Hauptkomponenten reduzierten Datensatz-Varianz. Damit wird deutlich, dass anhand von einzelnen Kamera-Bildern der KSBÜ keine direkte Fallunterscheidung der Einflüsse möglich ist.

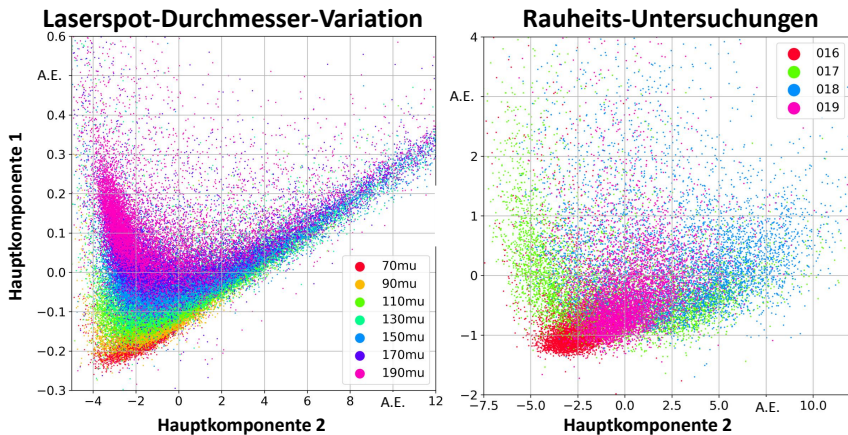


Bild 67: **Links:** Die Unterscheidbarkeit von Datenpunkten aus der Variation des Laserspot-Durchmessers ist möglich. **Rechts:** Unterschiedliche Rauheits-Experimente erzeugen eine breite sich überlappende Streuung von Datenpunkten.

#### 4.2.5 Zusammenfassung zur Signalanalyse

Die gezeigten Untersuchungen geben Auskunft über die Sensitivität des Systems und bilden die Grundlage für weitere Untersuchungen zu Anwendungsmöglichkeiten der koaxialen Schmelzbad-Überwachung für den Serienbetrieb.

**Unterschied zwischen Photodiode und Kamera:** Die Ergebnisse zeigen, dass die Photodiode und die Kamera ein zur eingestrahlt Energie proportionales Signal ausgeben. Wegen dem geringeren Messfeld der Kamera und der zusätzlichen 2d-Information sind die Signale stärker von der umgebenden konsolidierten Materie abhängig, was sich bei der Belichtung von Kanten zeigt. Durch die Variation der Partikelgrößenverteilung (PGV) wird bei der Kamera eine stärkere Signalvariation beobachtet (8 %) als bei der Photodiode (< 1%), was auf die höhere Wärmeleitfähigkeit bei einem Pulverbett mit kleinerer PGV zurückzuführen ist. Während die Helligkeitsverteilung der Photodioden-Daten diskrete Peaks aufweist, zeigen die vorverarbeiteten Kamera-Flächen-Werte eine breite Verteilung. Dieses Verhalten wird später

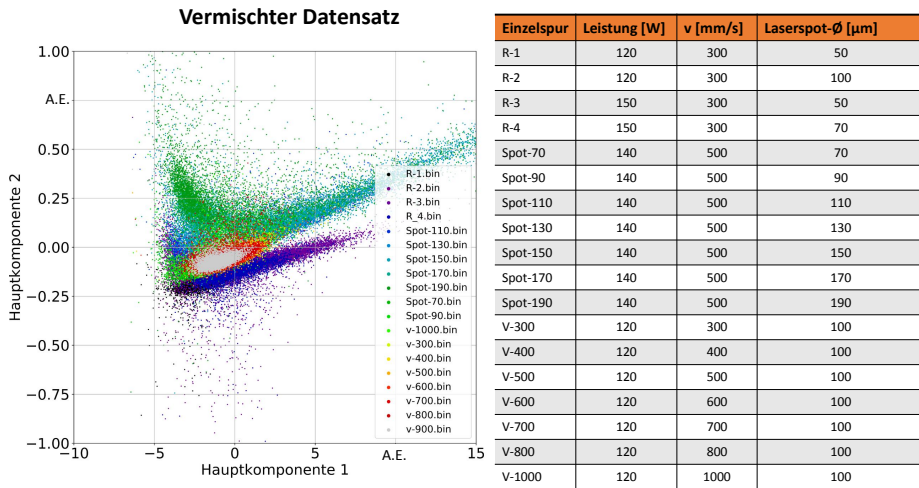


Bild 68: Hauptkomponenten-Darstellung des gemischten Datensatzes mit verwendeten Prozess-Parametern zeigt eine Überlagerung des Ergebnisraumes. Die unterschiedlich erzeugten Schmelzbad-Kamerabilder verhalten sich bzgl. der zentralen Momente ähnlich.

bei der Volumenkörper-Generierung genauer untersucht (siehe Abschnitt 70).

**Thermische Historie:** Einzel-, Doppel- und Dreifachspuren werden vom System nicht unterschiedlich wahrgenommen und der thermische Einfluss durch nah nebeneinander liegende Vektoren ist durch das verwendete System nicht detektierbar (Bild 55).

**Fehlerdetektion:** Unregelmäßiges Aufschmelzverhalten bei Einzelspuren kann durch hohe Varianz-Werte erfasst werden. Dies geht aus den Daten des QM-Meltpool Systems aufgrund interpolierter Rohdaten schwächer, als mit dem selbst programmierten Algorithmus (Bild 52) hervor, weil dieser keine Glättungsfunktionen enthält.

**Balling:** Das Balling tritt nur in den Randbereichen des Prozessfensters auf (Bild 54). Diese können im niederenergetischen Fall mitunter an auslaufenden Scanpfaden auftreten, was bei der Auslegung der Scanstrategie zu vermeiden ist.

**Detektionsgrenzen:** Eine Variation der Scangeschwindigkeit ist bei Einzelspurversuchen mittels der Photodiode nicht und mit der Kamera nicht signifikant unterscheidbar (Bild 53). Die hohe Aufnahmefrequenz der Photodiode in Verbindung mit dem großen Messfeld von 4 mm<sup>2</sup> führt zu einem konstanten Signal, bei dem über einen größeren Bereich gemittelt wird. Die Prozess-Parameter-Variationen der Laserleistung und des Laserspot-Durchmessers können mit unterschieden werden.

**Kalibrierung:** Die Ergebnisse zur Material-, Parameter-, Richtungs-, Positions-, Schichthöhen-, und Lasersystem-Abhängigkeiten verdeutlichen, dass eine Kalibrierung notwendig ist. Diese ist nur in Verbindung mit dem Zugriff auf Anlagen- und Scanner-Software, über Look-Up Tabellen oder variabel einstellbare Funktionen sinnvoll umsetzbar.

**Spritzerbildung:** Bei der Rohbild-Analyse sind Signaturen aus der Spritzerbildung feststellbar (Bild 113). Somit sind theoretisch Optimierungspfade möglich, um Prozess-Parameter zu entwickeln, welche die Spritzerbildung minimieren.

**Pulverschicht-Einfluss:** Höhere Pulver-Schichtstärken führen bei dem verwendeten Überwachungs-System zu einem abnehmenden Signal. Der Signalverlust beträgt mehr als 50 % und zählt unter Normalbedingungen zu den einflussreichsten.

**Rauheits-Einfluss:** Durch die vergleichende Datenanalyse aus den unterschiedlichen Einzelspur-Experimenten mittels Hauptkomponentenanalyse und Klassifizierungs-Algorithmen geht hervor, dass mit der vorgestellten Methode zur Auswertung von Einzelbildern der Kamera des KSBÜ nicht zwischen Einflussgrößen der Prozess-Parameter oder der Rauheit unterschieden werden kann. Zusammen mit den Ergebnissen der Richtungs- und Positions-Abhängigkeit wurde gezeigt, dass die Ausrichtung, das Verkippen oder Verlaufen des Schmelzbades unter Berücksichtigung von dessen Flächennormalen relativ zur optischen Achse der KSBÜ die detektierbare Strahlung dominant beeinflusst.

## 4.3 Prozess-Parameter-Variationen an Volumenkörpern

Nachdem die grundlegenden Einflüsse auf das Signal untersucht wurden, werden im folgenden Abschnitt Beobachtungen an Volumenkörpern quantifiziert und mit Qualitätskennwerten verglichen die nach dem Aufbau gemessen werden. Dabei werden durch kontrollierbare Prozess-Parameter-Variationen Defekte generiert und resultierende Signaturen der KSBÜ-Daten untersucht.

### 4.3.1 Ergebnisse aus Schichtbild-Daten

Wie im Abschnitt 3.4.3.1 dargestellt ermöglicht die Hersteller-Software die Ausgabe von Schichtbildern und Schicht-Mittelwert-Tabellen zu beiden koaxialen Sensoren. Die Ergebnisse zur Untersuchung dieser Methode werden hier für unterschiedliche Materialien und Bedingungen analysiert.

Ein Beispiel für ein Schichtbild mit einer Anomalie zeigt Bild 69. Die Anomalie wird mittels einer Profilmessung (gelb) in der Software ImageJ [170] quan-

tifiziert. Die Signatur des Defekts übersteigt dabei die durch den Überlapp der Scanvektoren (rot) bei der verwendeten Streifenbelichtung entstehende Verdunklung um das vierfache. Die Scanvektoren sind durch die roten Pfeile im linken Bildausschnitt visualisiert.

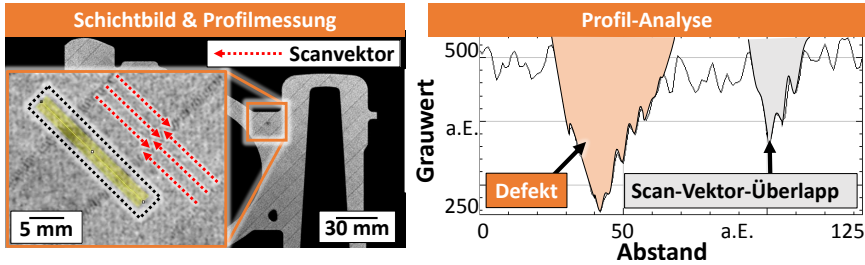


Bild 69: Manuelle Schichtbild-Auswertung: Links: Profilmessung (20 px Breite) entlang Auffälligkeit; Rechts: Vergleich des Grauwert-Einbruchs durch den Defekt und durch den Scan-Vektor-Überlapp.

Für eine weitere Analyse werden Histogramme der Grauwerte aus den Schichtbildern (vgl. Abschnitt 3.4.3.1) gebildet. Dabei wird auf der Abszisse die Schmelzbad-Fläche des Kamera- bzw. der Intensitätswert des Photodioden-Schichtbildes aufgetragen und die Häufigkeit des jeweiligen Wertes auf der Ordinate aufgetragen (Bild 70 b)). Die Intensitätswerte des Photodioden-Schichtbildes weisen schmale Verteilungen, die Kamerawerte eine breite Verteilung auf. Wie oben beschrieben werden für den Rand- und Konturbereich unterschiedliche Prozess-Parameter verwendet, was im Histogramm zugeordnet werden kann.

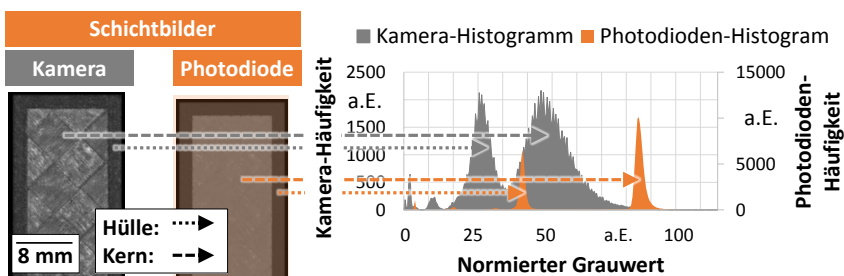


Bild 70: Helligkeits-Histogramm-Analyse von Schichtbildern: Links: Kamera- und Photodioden-Schichtbild; Rechts: Breites Kamera- und diskreteres Photodioden-Histogramm mit parameterabhängigen Verteilungen die durch Pfeile mit dem Schichtbild verbunden sind.

Bild 71 zeigt ein Beispiel bei dem vier von zwei unterschiedlichen Lasersystemen gefertigte Würfel bezüglich der Schichtmittelwerte verglichen werden. Die Sensoriken der Lasersysteme zeigen aufgrund fehlender Kalibrierung und

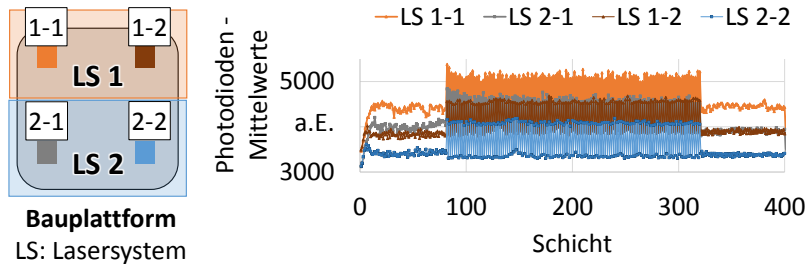


Bild 71: Schicht-Mittelwerte (vgl. Abschnitt 3.4.3.1) von 4 Testkörpern: Die Absolutwerte der Schmelzbad-Überwachung skalieren mit der Position und variieren zwischen Lasersystemen.

der Positionsabhängigkeit unterschiedliche Absolutwerte. Weiter erscheint das Signal verrauscht, was jedoch aus der Hülle-Kern-Belichtungs-Strategie resultiert. Die ersten und letzten 100 alle Randbereiche wurden mit  $P=180$  W der Kernbereich stets mit  $P=370$  W belichtet. Zur Verdeutlichung dieses Einflusses zeigt Bild 72 drei ausgewählte Schichtbilder und das Diagramm der Schichtmittelwerte (vgl. Abschnitt 3.4.3.1). Hier wurden die geraden Hüll- (blau) und die ungeraden Kernschichten (orange) farblich separiert.

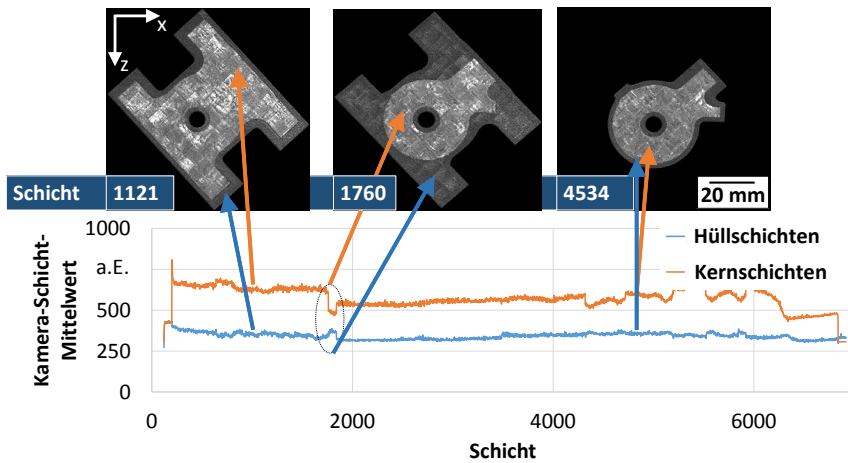


Bild 72: In der Schichtbild-Mittelwertanalyse (vgl. Abschnitt 3.4.3.1) treten durch die schichtweise alternierende Volumenenergiedichte zwischen Kern- (orange) und Hüll-Schichten (blau) Signalsprünge auf. Der Signalverlauf ist geometrieabhängig und variiert relativ zur Bauteilposition.

### 4.3.2 Schmelzbad-Überwachung und Defekt-Generation

Um das Prozessfenster abzutasten und das Verhalten des Schmelzbad-Überwachungssystems zu untersuchen werden Prozess-Parameterstudien mit den Werkstoffen 1.4542, 1.4057 und 1.2709 erstellt und hier vorgestellt.

**Edelstahl 1.4542:** Wie auf Bild 73 dargestellt werden für den martensitischen Edelstahl 1.4542 64 Parameterkombinationen verwendet, um das Prozessfenster abzutasten. Durch die geringe Schichtdicke wird das Pulvermaterial stets aufgeschmolzen, so dass bei der Schichtbild-Analyse nur bei geringen Laser-Leistungswerten relative Dichte-Werte unterhalb des Qualitäts-Ziels von 99,5 % gemessen werden. Im Diagramm 74 wird deutlich, dass die Betrachtung der aus Histogrammen abgeleiteten Schicht-Mittelwerte (siehe 3.4.3.1) keine Aussage über die Porosität zulässt. Die Auswertungsmethode ist für Probewürfel mit  $1 \text{ cm}^3$  Größe daher nicht geeignet die Dichte zu bestimmen.

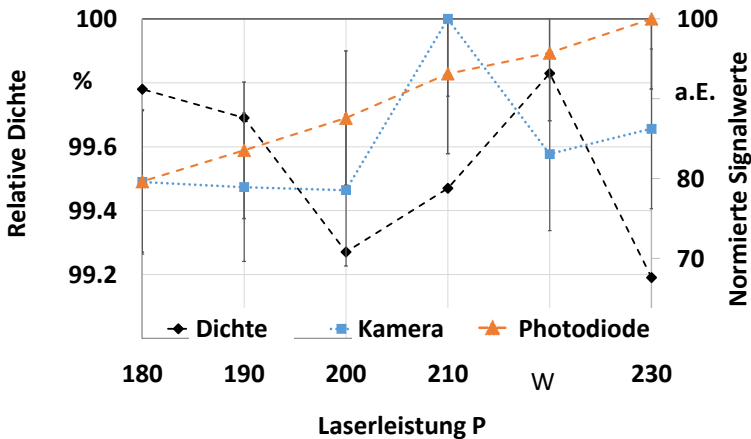


Bild 73: Das Photodioden-Signal steigt wie erwartet linear mit der Laser-Leistung, das Kamerasingnal wird durch die hohe Welligkeit der Insel-Strategie beeinflusst

**Edelstahl 1.4057:** Bild 75 bestätigt das Ergebnis des Edelstahls 1.4542, denn die Schichtbild-Textur von Testkörpern zeigt Ähnlichkeiten bei unterschiedlichen Parametereinstellungen. Durch den Vergleich mit der Dichte-Auswertung ergibt sich jedoch keine Korrelation. Beispielhaft ist die relative Dichte des Parametersatzes 6 von unter 94 %, welcher die gleiche Schichtbild-Textur zeigt wie das Schichtbild der Parameters 1, mit einem Dichtewert von über 99 %. Die Ähnlichkeit der farblich umrahmten Schichtbilder bei Wiederholungen von Parameterwerten an unterschiedlichen Positionen zeigt eine qualitative Reproduzierbarkeit. Weiter geben die Schichtbilder des Parametersatzes 4 und 5, Bild 75, einen qualitativen Eindruck von Gestaltabweichungen.

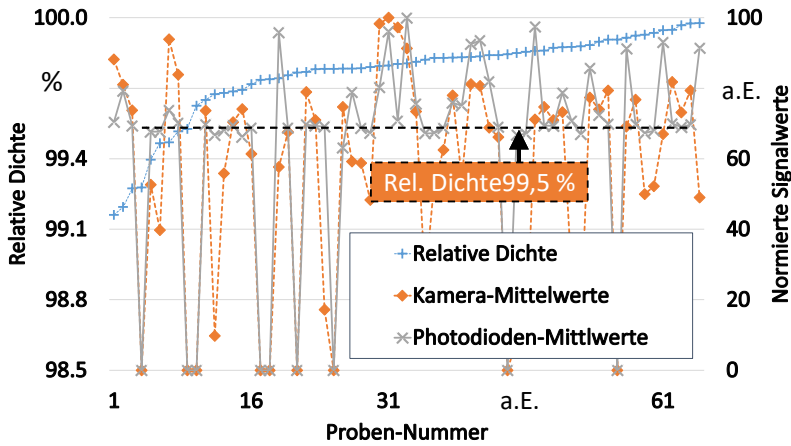


Bild 74: Die Übersicht der Histogramm-Mittelwerte der Photodiode oder Kamera aller getesteten Parameter zeigt keine Korrelation zur relativen Dichte (blau).

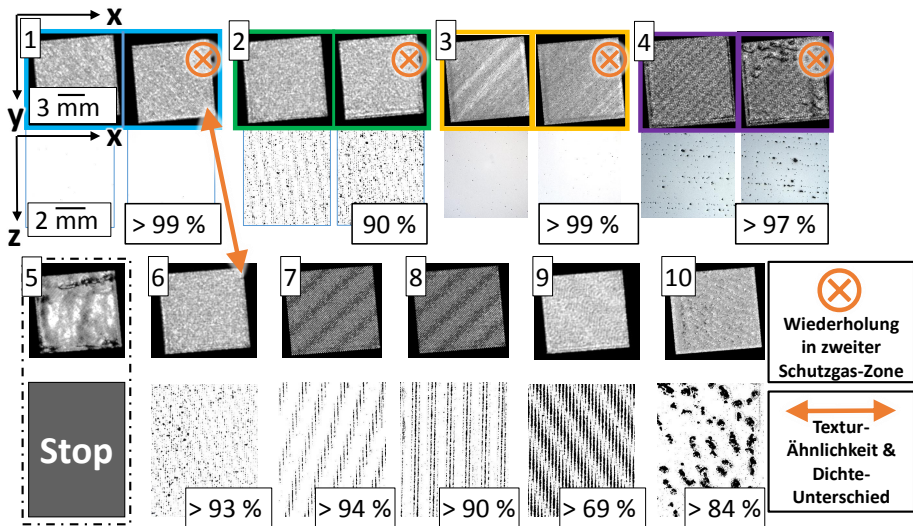


Bild 75: Die Textur der aus KSBÜ-Daten generierten Schichtbilder zeigt keine direkte Korrelation zur mittels Schlibfbild ermittelten relativen Dichte von Testkörpern [P<sub>3</sub>]

Dieser führte bei Parametersatz 5 zum Abbruch während dem Bauprozess. Parametersatz 4 zeigt mit 97 % eine deutliche Reduktion der relativen Dichte. Bei der Auswahl der finalen Parameter Bild 76, zeigen sich deutliche Unterschiede in der Helligkeit und der Textur der unbearbeiteten Schichtbilder der Kamera.

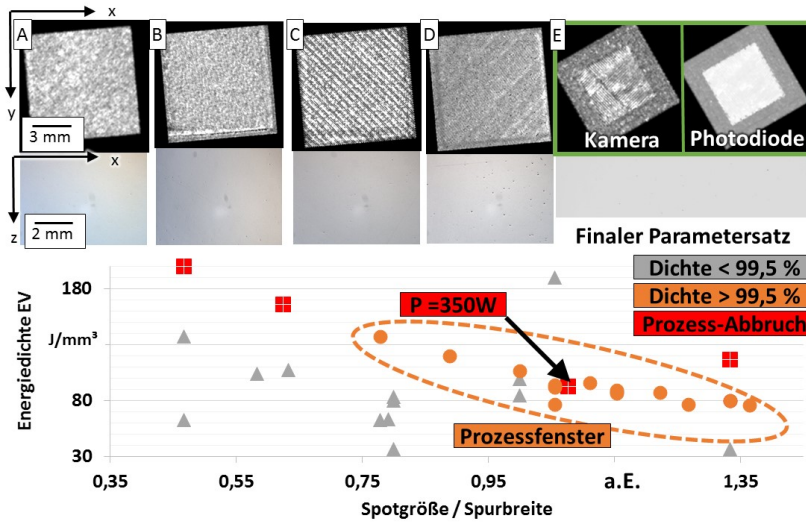


Bild 76: Die Schichtbild-Textur von Prozess-Parametern im Prozessfenster (Dichte > 99,5 %) ermöglicht keine direkte Aussage zur Bauteilqualität [P3].

**Werkzeugstahl 1.2709:** Wie auf Bild 77 dargestellt, wurde eine 50 Pixel breite und 200 Pixel lange Profilmessung auf 10 Würfeln durchgeführt, um die Vergleichbarkeit zu untersuchen. Es geht deutlich hervor, dass die vollzogene Profilmessung eine hohe Varianz aufweist, die auf einen instabilen Prozess oder sogar eine verminderte Bauteilqualität hinweist. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Schwankung zwischen einzelnen Proben am selben Messpunkt, als auch die Schwankung innerhalb der Fläche Werte über 20 % betragen. Weil alle Proben bei einer nachgelagerten Dichte-Prüfung mittels Schlibfbild-Analyse Werte über 99,5 % aufweisen, ist darauf zu schließen, dass aufgrund der starken Signalvarianz keine gezielten Aussagen zur Bauteilqualität möglich sind. Die hohe Varianz wird auf die Oberflächenrauheit zurück geführt, die bei der verwendeten Insel-Belichtungs-Strategie stark ausgeprägt ist. In einer weiteren Versuchsreihe mit 3 Prozessgas-Strömungs-Geschwindigkeiten A, B und C in übereinander gestapelten Testwürfeln, wird die vom Hersteller empfohlene Prozessgas-Strömungs-Drehzahl-Einstellung von 79 % bei A, linear zum Maximalwert von 99,7 % gesteigert. Erst bei der Maximaldrehzahl werden relative Dichte-Werte von 99,5 % und mehr erreicht. Bild 78 zeigt die Würfel-Säule und Beispielschliffbilder zu den drei Schichtbereichen die mit unterschiedlicher Prozessgas-Strömung aufgebaut wurden. Auf 78 werden EDX-Messungen an vier Fehlstellen mit Ausdehnung größer als 100 µm gezeigt die auf Spritzer zurückzuführen sind. Die im Vergleich zur umgebenden Matrix erhöhten Sauerstoff-, Titan- und Eisen-Anteile (Bild 77) und

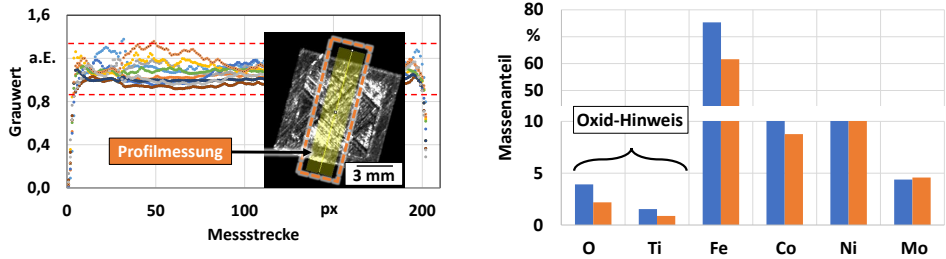


Bild 77: a) Die Profilmessung wird für alle Testkörper in Schicht 177 an der gleichen Position mit 50 Pixeln Breite durchgeführt. b) Unterschiede der Element-Massenanteile von O im EDX deuten auf Oxidbildung hin (REM-Bild 127 im Anhang).

die Agglomerate im REM-Bild der Schliffe (Bild 127 im Anhang) bestätigen diese Theorie.

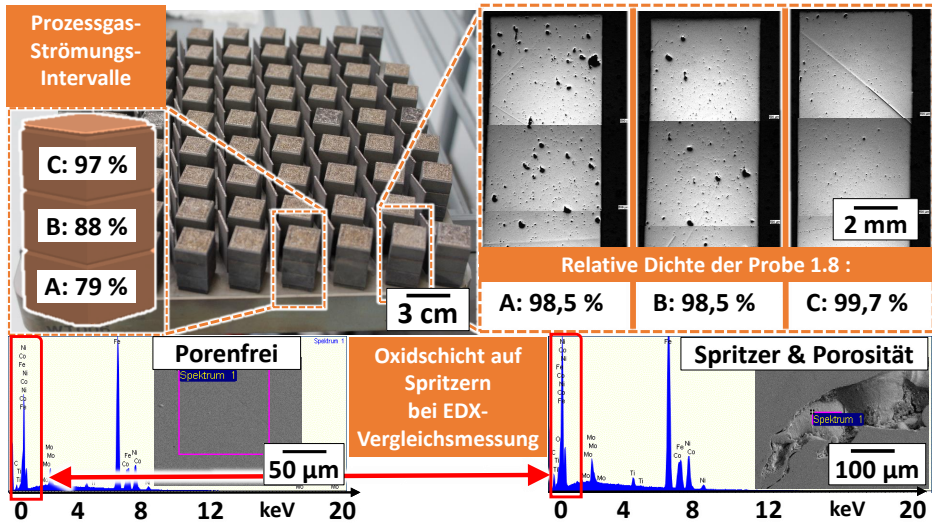


Bild 78: Durch die Steigerung der einstellbaren Prozessgas-Strömungs-Geschwindigkeit werden Spritzer besser abgesaugt. Dadurch wird die relative Dichte von untersuchten Proben erhöht. Spritzer zeigen einen höheren Oxid-Anteil in der EDX-Vergleichsmessung.

Bei der Analyse der KSBÜ-Daten wird die jeweilige Varianz über die Schichtbereiche 70-170, Bereich A und 420-520, Bereich B, der einzelnen Testwürfel betrachtet. Die Varianzwerte zeigen für den Bereich A mit niedriger Prozessgas-Strömungs-Geschwindigkeit sowohl für die Kamera als auch für die Photodiode stets höhere Werte auf. Die Differenz der Varianz wird auf Bild 79 als normierter Differenzwert der Schichtbereiche pro Testwürfel neben den Porositätswerten aus der Schliffbild-Analyse dargestellt, um eine Vergleich-

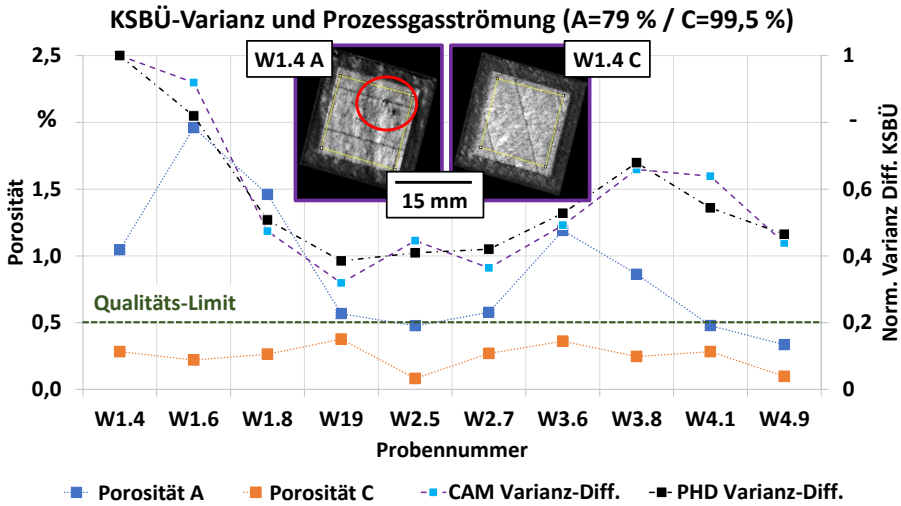


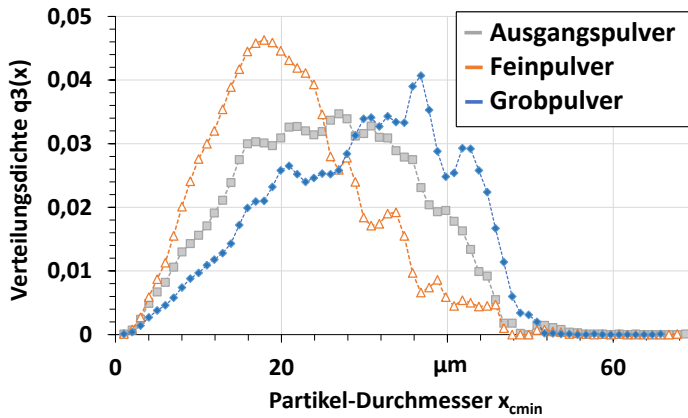
Bild 79: Analyse der KSBÜ-Daten mit der Porosität aus Testwürfeln der prozessgasströmungsabhängigen Versuchsreihe mit dem Werkstoff 1.2709; Korrelation aus Porosität der Schichtbereiche A (blau) und C (orange) mit der normierten Varianz-Differenz der KSBÜ-Daten der betrachteten Volumina für die Kamera (lila) und die Photodiode (schwarz). Die Kamera-Schichtbilder der Bereiche A und C zeigen für die niedrige Prozessgas-Strömung deutliche Fehlstellen (linkes Bild).

barkeit aus Kamera- und Photodioden-Daten zu ermöglichen. Dabei zeigt sich eine Korrelation zwischen Varianz-Differenz und Porosität des Bereichs A. Die Schichtbilder der Kamera zeigen Beispielbilder der Probe W1.4 aus den beiden betrachteten Bereichen mit einer deutlichen Auffälligkeit für Bereich A (linkes Bild).

### 4.3.3 Einfluss der Partikelgrößenverteilung

Hier folgt die Darstellung der Ergebnisse aus den Untersuchungen des Einflusses der Partikelgrößenverteilung von AlSi10Mg Pulver-Fractionen auf die koaxial detektierbare thermische Strahlung des Schmelzbades. Bild 80 zeigt die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilungs-Messungen die mittels dynamischer Bildanalyse vermessen wurden (Camsizer X2, Fa. Retsch Technologies). Dadurch wird ebenfalls die Beurteilung der Sphärizität ermöglicht. Sie unterscheidet sich für die betrachteten drei AlSi10Mg-Fractionen nur geringfügig wie auf Bild 39 dargestellt.

Die gemessenen PGVn sind als Verteilungsdichte  $q_3(x)$  über den Minimalradius der Projektion,  $x_{cmin}$  in  $\mu\text{m}$ , aufgetragen, siehe Bild 80, und zeigen deutliche Konzentrationsunterschiede bei der Partikelgrößenfraktion größer



Analyse der Helligkeitsverteilung mit PGV-Variation:

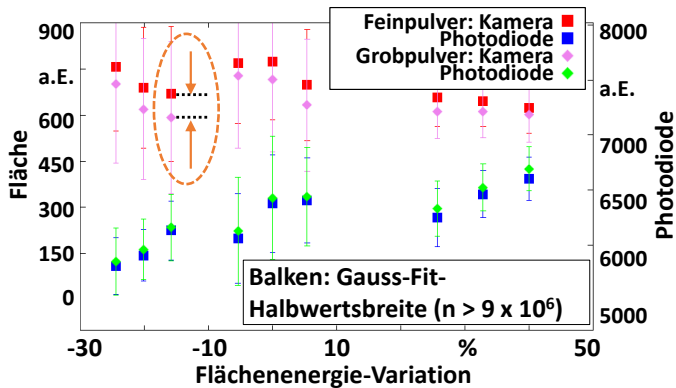
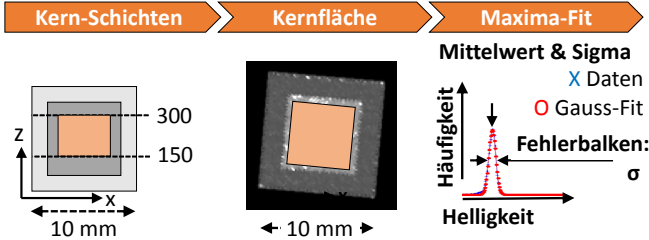


Bild 80: Unterschiede in der Verteilungsdichte  $q_3(x)$  bei großen Partikeln (a) beeinflussen den Arithmetischer Mittenrauwert  $S_a$  (Details siehe Bild 125 im Anhang. Das Vorgehen zur Analyse Schmelzbad-Helligkeits-Daten ist auf Bild (b) gezeigt. Die Position und Breite (Fehlerbalken) der Verteilung der zeigt im Mittel ein 8 % niedrigeres Kamera-Signal, aber kaum veränderte Photodioden-Werte (c).

35  $\mu\text{m}$ . REM-Aufnahmen zeigen die signifikant unterschiedliche Morphologie der groben Fraktion auf Bild 124 im Anhang. Die drei Fraktionen werden verwendet um zu jeder der 9 Prozess-Parameter-Kombinationen jeweils drei

Zugproben und 2 Testwürfel aufzubauen, welche für Materialtests herangezogen werden. Weil die Oberflächenrauheit ein für die Prozessstabilität bedeutsamer Einfluss ist, wird die arithmetische Mittenrautiefe  $S_a$  mittels Konfokal-Mikroskop vermessen (Alicona Infinite Focus). Die großen Partikel wirken sich negativ auf die Oberflächenrauheit aus, weil diese nicht komplett aufgeschmolzen werden. Bei der Dichteanalyse nach Archimedischem Prinzip wird eine starke Abhängigkeit von der PGV deutlich (Bild 125 im Anhang), was auch in den Schliffbildern sichtbar ist. Das feine Pulver zeigt eine höhere absolute Dichte und bei höheren Energiedichten sinkt die Dichte des groben und des Ausgangspulvers ab. Die Untersuchung zur statischen Festigkeit mittels zylindrischer Zugproben unterstreicht die bereits durch die Dichte identifizierte Steigerung der Bauteilqualität bei kleiner PGV (Bild 125 im Anhang). Das feine Pulver erreicht eine Zugfestigkeits-Steigerung um 10 %. Die Versuche wurden mit der koaxialen Schmelzbad-Überwachung aufgezzeichnet um die Detektierbarkeit unterschiedlicher PGV und die Detektion von Fehlstellen untersuchen zu können. Zur Analyse werden die Daten des Kernvolumens als Histogramm aufgetragen und durch einen Gauss-Fit wird die Position und Breite der Verteilung genähert. Wie auf Bild 80 erkennbar liegen die Werte der Photodioden über alle Parameter hinweg gut übereinander. Bei den Kameradaten ist eine Verschiebung der Kamera-Flächenwerte erkennbar. Die detektierte Schmelzbad-Fläche bei grobem Pulver erscheint im Mittel um 8 % kleiner, die Halbwertsbreite der gefitteten Gauss-Funktionen ist als Fehlerbalken eingetragen. Die höhere Absorption durch das feine Pulver, die höhere Wärmeleitfähigkeit durch eine größere Packungsdichte und die geringere Oberflächenrauheit erhöhen die Werte der koaxial detektierten thermischen Strahlung durch die Kamera. Die stärker von der Temperatur abhängige Photodioden-Signale mit dem größeren Messfeld zeigen hingegen ein von der PGV unabhängiges Signal. Dies zeigt, dass das räumliche Auflösungsvermögen der Kamera bezüglich der Schmelzbad-Größe eine höhere Sensitivität als die Photodioden-Daten aufweist.

#### 4.3.4 Erkenntnisse der Untersuchungen an Volumenkörpern

Bei den gezeigten Untersuchungen zu Volumenkörpern ergeben sich bei der Betrachtung von Schicht- oder Bauteil-Mittelwerten sowie der Schichtbild-Textur keine Möglichkeiten zur direkten Korrelation mit der Bauteil-Porosität (Bild 75). Positiv zu bemerken ist die Beobachtung von einzelnen Defektstellen in Schichtbildern in der manuellen Bildanalyse (Bilder 69 und 79). Auffällig ist die hohe Varianz bei der Betrachtung von Schichtbild-Daten anhand von Profilmessungen die bereits auf Prozess-Instabilitäten hinweisen (Bild 77). Dieses Verhalten bestätigt sich für die Versuchsreihe mit dem Werkstoff 1.2709 bei einer variierten Prozessgas-Strömungs-Geschwindigkeit,

weil sich die Porositäts-Werte mit der Varianz der KSBÜ-Daten korrelieren lassen (Bild 79). Dabei liefert die höher auflösende Datenbasis der Kamera (Bild 70) jedoch keinen Mehrwert gegenüber der Photodiode. Dieser zeigt sich bei dem Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf das KSBÜ-Signal (Bild 80).

#### 4.4 Fehler-Klassifizierung aus der manuellen Bildstapel-Analyse

Durch die Analyse von mehr als 80 TByte an Schichtbild-Daten aus mehr als 500 Baujobs wurde eine Fehlerklassifizierung für die verwendete Schmelzbad-Überwachung erstellt. Im folgenden Abschnitt werden die Fehlerbilder dargestellt.

**Stützstruktur-Übergangsbereich:** Der Übergangsbereich zwischen Stützstruktur und Bauteil zeigt stets eine hohe Varianz, weil das Schmelzbad an ungestützten Bereichen einsinkt und die Wärme nicht abgeleitet wird. Verstärkt durch thermisch induzierten Verzug bilden sich raue Oberflächen die aus dem Pulverbett ragen und den Beschichter beschädigen können (Bild 81).

**Beschichter-Streifen:** Durch das Auftreten des in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Beschichter-Streifen-Effekts wird, wie auf Abbildung 81 dargestellt, Pulver uneben und unter Bildung von Streifen aufgetragen. Weil keine Unterbrechung des Prozesses stattfinden soll, um den Temperaturhaushalt des Prozesses nicht zu stören, muss der Bauprozess abgebrochen oder Streifen auf der Oberseite des Bauteils akzeptiert werden. Die Beschichterstreifen lassen sich durch das gesamte Bauteil hindurch erkennen (Bild 81 rechts) und können von Algorithmen erfasst werden, um Bauteile automatisiert auszusortieren.

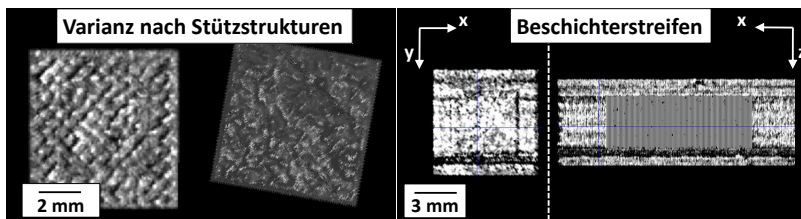


Bild 81: Links: Im Übergangsbereich zwischen Stützstruktur und Bauteil wird eine hohe Varianz beobachtet. Rechts: Im Schichtbild sichtbarer Streifen aufgrund eines Beschichterschadens.

**Scan-Strategie- und -Pfad-Fehler:** Bei der Datenvorbereitung und an Software-Schnittstellen zwischen Datenformaten und Programmen treten

Fehler durch die fehlerhafte Auslegung von Belichtungsvektoren auf. Mitunter werden Grenzzonen zwischen Parameter-Bereichen nicht belichtet. Kritisch ist die Belichtung von Bereichen außerhalb des Bauteils, weil dies bei großen Flächen wie auf Bild 82 zum Abbruch führt. Hier ist durch die plötzliche Flächenbelichtung im Pulverbett und die Beschädigung der Beschichtertlippe ein Baujobstopp unvermeidbar. Die drei linken Bilder der lateralen PÜ verdeutlichen das durch die Schmelzbad-Überwachung detektierte Signal auf der rechten Seite. Hier bietet sich eine Anwendungsmöglichkeit für die

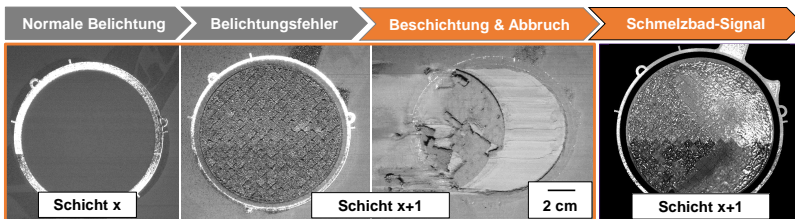


Bild 82: Slicing-Fehler bei der Datenvorbereitung bewirken fehlerhafte Belichtung von ungestützten Bereichen außerhalb des Bauteils.

KSBÜ, weil alle belichteten und unbelichteten Bereiche in den Schichtbildern sichtbar werden. Die linke Seite von 83 oben zeigt eine zu kurz gewählte Verzögerungszeit beim Einschalten des Lasers, die rechte Seite eine zu lang gewählte Verzögerungszeit und resultierende Lücken in der belichteten Fläche. Bild 83 unten zeigt größere unbelichtete, zerklüfteten Schichtbilder. Ein Prozessabbruch durch das Einkoppeln der Strahlung nach mehreren unbelichteten Schichten ist hier möglich. Durch eine automatisierte Prüfung der seriellen Daten sind diese Fehler vermeidbar. Somit ist die Schmelzbad-Überwachung zur Prozess-Parameter-Optimierung und zur Identifikation von Belichtungsfehlern bei Serienbauteilen einsetzbar.

**Fehlendes Pulver:** Durch agglomeriertes Pulver, falsch eingestellte Beschichter-Kassetten-Systeme und unzureichende Verdichtung des Pulvervorrats entstehen Luftpolster mit geringer Schüttdichte. Aufeinander folgende Schichten werden unzureichend beschichtet und im Anschluss entstehen mehrere Schichten starke Pulverschichten (siehe Abbildung 84). Die starke Kontraständerungen entlang der Beschichtungskante ist von geeigneten Bildverarbeitungs-Systemen einfach detektierbar.

**Spritzerflecken:** Spritzer, Agglomerate oder Erhebungen konsolidierten Materials lenken die Position des Schmelzbades ab und verringern dadurch indirekt die koaxial detektierbare Intensität. Dadurch entstehen mehrere Pixel große diskrete Flecken auf den rekonstruierten Schichtbildern (Bild 85). Weitere Untersuchungen zu diesem Phänomen werden bei 4.5.4 gezeigt.

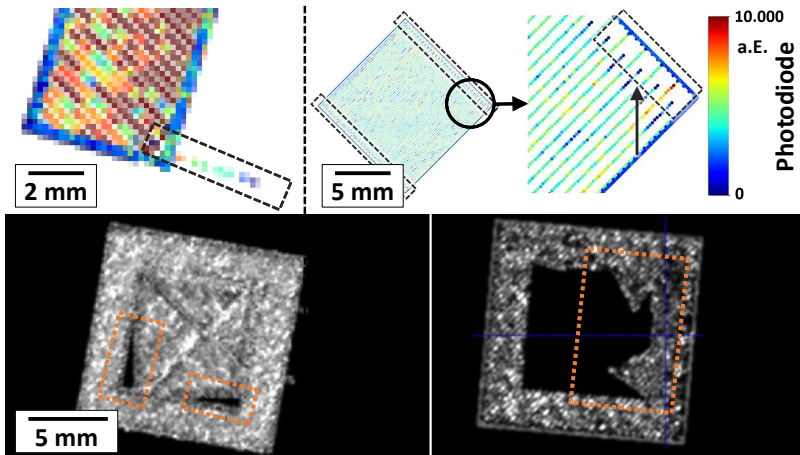


Bild 83: Oben: Abbildung von Verzögerungszeiten, Unten: Detektierbare Belichtungsfehler

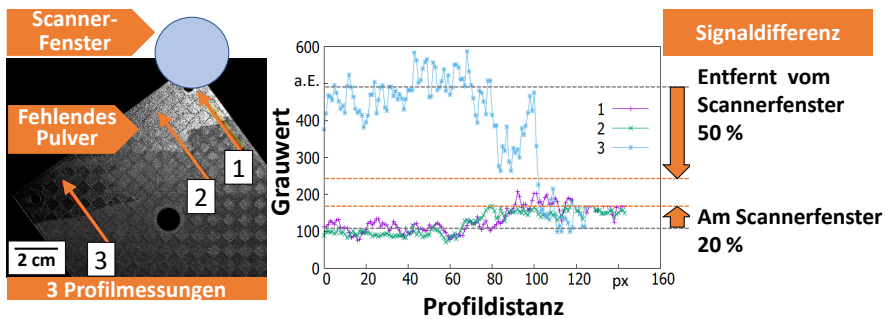


Bild 84: Beschichtungsfehler durch fehlendes Pulver zeigen relativ zum Scannerfenster einen 20-50 % positionsabhängigen Kontrast.

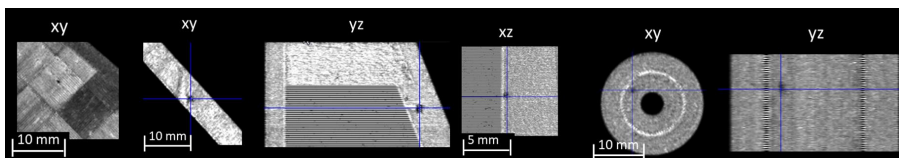


Bild 85: Spritzer-Signaturen in Schmelzbad-Schichtbildern [S9].

**Beschichter-Sprünge:** Aufgrund der flexiblen Silikon-Beschichterlippen zeigt sich ein Relaxations-Effekt, wenn diese an leicht erhöhten Kanten, Welligkeiten oder Spritzern zurückgehalten wird und dann bei der Weiterbewegung des Beschichters relaxiert (Bild 86). Dieser Effekt wird durch die Verwendung von Karbon-Bürsten an Stelle der flexiblen Silikonlippen ver-

hindert, weil die kleinen Erhöhungen das starre Beschichterlippen-Material weniger auslenken [171].

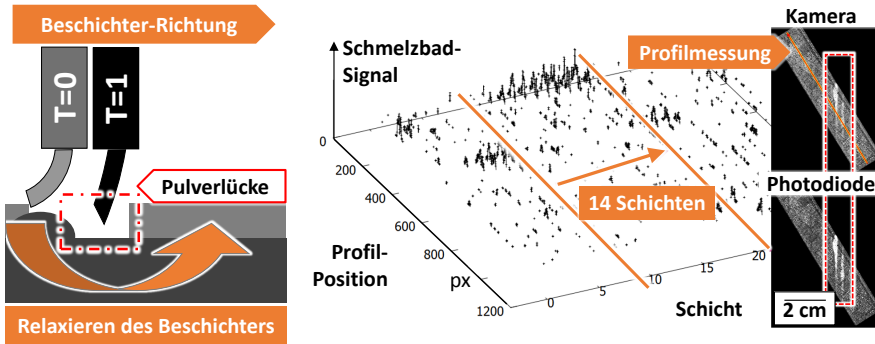


Bild 86: Aufgrund von Oberflächenrauheit oder -Welligkeit wird die Silikon-Lippe des Beschichters ausgelenkt, bevor sie nach entsprechender Wegstrecke relaxiert und Pulvermaterial abträgt. Die mittels Profilmessung von Schichtbildern der Schmelzbad-Überwachung detektierten hellen Signaturen zeigen sich abhängig von der Stärke des Effekts über bis zu 14 Schichten.

**Überhang-Fehler:** Parameter-Sätze ohne Überhang-Belichtungs-Einstellungen generieren bei nach unten weisenden Flächen ab 45 Grad Fehlstellen. Sobald sich eine Kavität schließt und Schichten oberhalb des Grenzwinkels von 45 Grad gefertigt werden, sind diese durch die darunterliegenden Schichten nicht ausreichend gestützt, so dass während des Abkühlens Bauteilverzug einsetzt, welcher in der folgenden Beschichtung zu einer dünneren Pulverschicht-Stelle führt. Einsacken der flüssigen Schmelze bei dünnwandiger Bauteilgeometrie oder Kanälen generieren Anhaftungen (vgl. Dross-Effekt) was durch den Kapillareffekt und die Gravitation verstärkt wird. Dies führt zur Verjüngung und dem kompletten Verschluss von dünnen Kanälen. Die Bereiche oberhalb von Kavitäten bilden über mehrere Schichten sichtbare Fehlstellen (Bild 87 und [P5]).

**Verzogene Kanten:** Thermisch induzierter Verzug und Kantenerhöhung sind mit der koaxialen Schmelzbad-Überwachung aufgrund der lokal dünneren Pulverschicht durch hellere Bereiche detektierbar (Bild 88).

**Photodioden-Fleck:** Direkt unter dem Scannerfenster, in einem  $2 \text{ cm}^2$  großen Kreis, werden durch die Photodiode hohe Intensitäten detektiert, weil die thermische Strahlungsquelle nah und von der größtmöglichen Spiegelfläche der Galvanometer-Scanner auf die Sensorik reflektiert wird. Dieser Effekt wird durch das große Messfeld der Photodiode,  $4 \text{ mm}^2$ , unterstützt, welches direkt unter dem Scanner-Fenster die von der Gasfackel gestreute Strahlung detektiert. Dadurch sind in diesem übersättigten Bereich keine Aussagen zum Schmelzverhalten möglich.

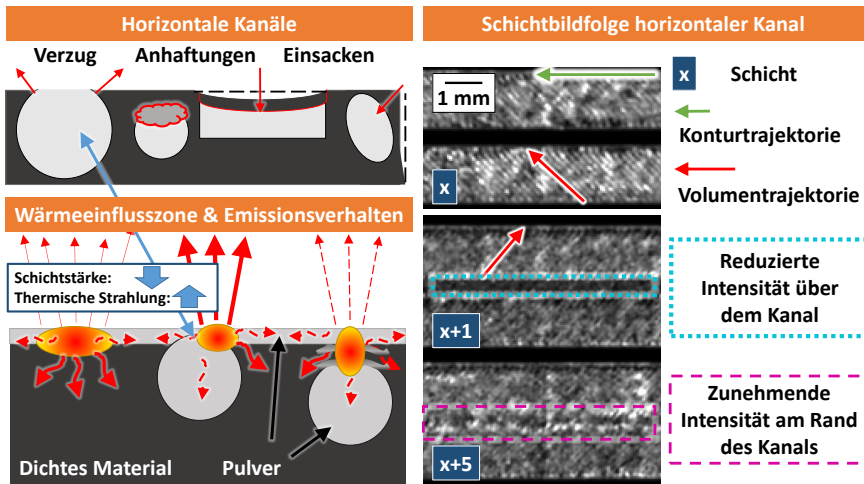


Bild 87: **Links oben:** Phänomene Verzug, Anhaftungen und Einsacken bei stützstrukturfreien Überhängen. Darunter: Schema zur Wärmeeinflusszone auf solidem Material, am Rand einer Kavität, über einer Kavität. **Rechts:** Schichtbilder der Schmelzbad-Überwachung mit im Schema dargestellten Intensitäts-Schwankungen.

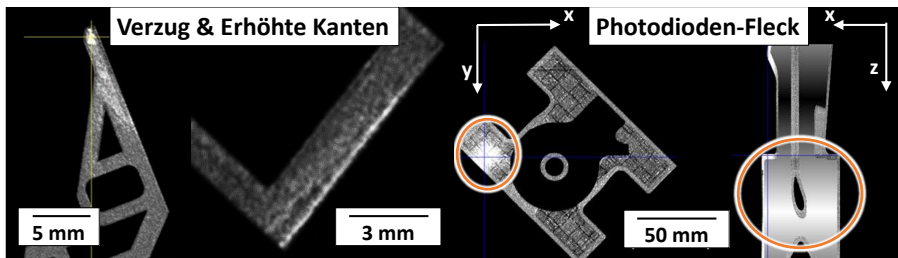


Bild 88: Links: Verzug und erhöhte Kanten. Rechts: Unter dem Scanner-Fenster tritt ein Sättigungs-Effekt auf, weil die thermische Strahlung der gesamten Interaktionszone von dem  $4 \text{ mm}^2$  großen Messbereich der Photodiode aufgezeichnet wird.

**Anfangsschichten-Helligkeit:** In den ersten Schichten von Bauteilen ist eine erhöhte Helligkeit erkennbar. Abbildung 89 zeigt links in der 3D-Ansicht die in der Mitte verglichenen Schichtbilder. Das rot umrandete, rechte Bild davon zeigt Daten im niedrigen Wertebereich aus Schicht 1600, das blau umrahmte, linke Bild entsprechend Schicht 1. Zur Verdeutlichung sind unten die kumulativen Histogramme der Kamera und der Photodiode gezeigt, also Helligkeits-Histogramme mit einer wachsenden Zahl an berücksichtigten Schichten. Für beide Sensoren verschieben sich die Maxima des Histogramms mit steigender Schichtzahl nach links, hin zu niedrigeren Werten. Für die ersten fünf Schichten lässt sich das Verhalten durch die effektive Pulver-

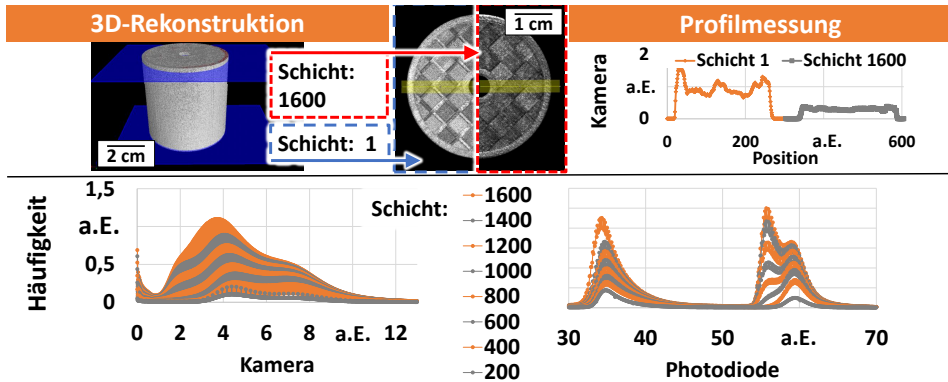


Bild 89: Die Helligkeit von Schichtbildern der Schmelzbad-Überwachung fällt mit zunehmender Aufbau-Höhe für beide Sensoren ab.

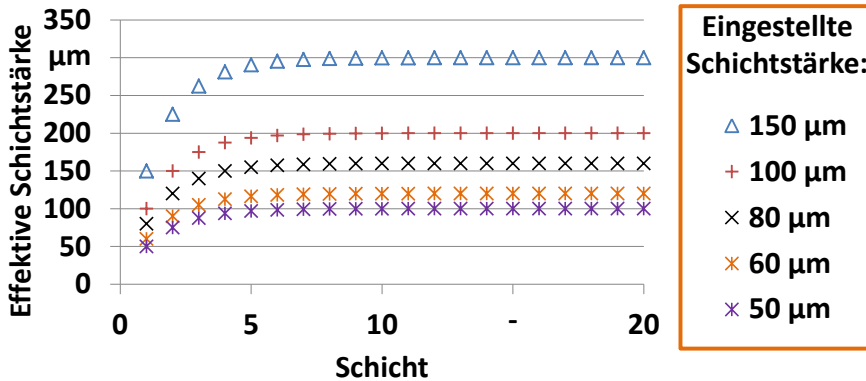


Bild 90: Die effektive Schichthöhe erklärt das höhere Signal in den ersten 5 Schichten.

schicht erklären, die durch die Materialverdichtung aufgrund der Differenz der Materialdichte und der Pulverschüttdichte im Verhältnis von  $\sim 2:1$  auf das doppelte des eingestellten Wertes ansteigt. Die tatsächlich belichtete, *effektive Schichtstärke*  $s_{eff}$  berechnet sich für die  $n$ -te Schicht nach der rekursiven Formel:  $s_{eff} = s_{n-1} \cdot \rho_{Pulverbett} + s_{Parameter}$ , mit  $n$  der Schicht-Nummer,  $\rho_{Pulverbett}$  der Schüttdichte im Pulverbett die bei  $\sim 0.55 \rho_{Fest}$  [S5] liegt und  $s_{Parameter}$ , der im Parametersatz eingestellten Schichtstärke.

**Bildraten-Fehler:** Durch Softwarefehler der FPGA-Auswertung wechselt die Aufnahme­frequenz auf einen unbestimmten und niedrigen Wert. Dadurch entstehen in den Schichtbildern positionsbezogen homogene Bereiche, weil das Schmelzbad-Signal in diesen Bereichen gemittelt und mit einem Wert für alle überfahrenen Punkte dargestellt wird (Bild 91).

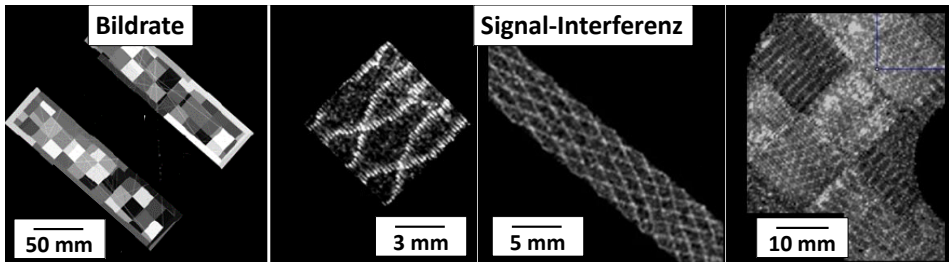


Bild 91: Links: Durch eine reduzierte Bildrate werden Schicht-Bereichen gleiche Werte zugeordnet. Rechts: Signal-Interferenz: Durch eine unverstandene Überlagerung im Bildverarbeitungssystem entstehen Interferenz-Muster.

**Signal-Interferenz:** Durch Interferenzeffekte bei der Zuordnung der schichtweisen Positionsdaten werden in den Schichtbildern regelmäßige Muster generiert. Diese Muster bedecken das gesamte Bauteil und stören eine automatisierte Auswertung aufgrund des hohen Kontrasts.

## 4.5 Ergebnisse zur Nutzbarmachung

Auf Basis der oben gezeigten experimentellen Ergebnisse zu Einflüssen auf das Schmelzbad-Verhalten, werden hier konkrete Anwendungsmöglichkeiten der KSBÜ dargestellt und für den Serienbetrieb diskutiert. Zuerst werden Ergebnisse für die statistische Prozesskontrolle mittels der Analyse von Schichtmittelwerten gezeigt. Danach belegen Untersuchungs-Ergebnisse die Korrelation von KSBÜ-Daten zu Fehlstellen bei ungestützten Bauteil-Überhängen mittels einer eingeführten Größe, der Signaturliefe. Zuletzt werden mit der Detektion von Spritzer-Signaturen auf konsolidierten Bauteil-Schichten und für den flächigen Übergangsbereich zwischen Gitter-Stützstruktur und Bauteil, Ergebnisse der prozessrelevanten Oberflächen-Topographie-Auswertung mittels KSBÜ dargestellt. Die aus der Literatur bekannte Methode des Laserpolierens (*eng.: Remelting*) wird abschließend erfolgreich zur Rauheits-Reduktion von Stützstruktur-Bauteil-Übergangsbereichen eingesetzt.

### 4.5.1 Statistische Prozesskontrolle

Eine Betrachtung der Schichtmittel-Werte als Vergleich von Serienbauteilen soll eine vergleichende Aussage zur Bauteil-Qualität für das Produktionsumfeld ermöglichen. Das bei den Einzelspur-Untersuchungen gezeigte Bild 56 mit konzentrischen Kreisen und die zu den Schichtmittelwerten gezeigten Beispiele auf Bild 71 belegen die Positionsabhängigkeit des KSBÜ-Signals. Entsprechend zeigt Bild 92 mit den farbkodierten Bauteilmittelwerten aus

der Serienproduktion signifikante Unterschiede. Wie auf Abbildung 92 zu sehen ist, liegen die Schichtmittelwerte (schwarz, orange, violett) bei einem Serienbauteil welches wiederholt an gleicher Position aufgebaut wurde hingegen in einem Band mit weniger als 1 % Varianz. Um die Qualität der Bauteile zu verifizieren wird die relative Dichte mittels Schlibbildanalyse untersucht, wobei gleichbleibend hohe Werte über 99,5 % gemessen werden. Ein weiteres Beispiel für die statistische Prozessanalyse mit einem Toleranzband und dem Vergleich von 10 Bauteilen (siehe Abschnitt 24) wird in Bild 93 gezeigt. Dabei ist der bei der Fehleranalyse (Abschnitt 4.1.5) erwähnte Prozessabbruch deutlich erkennbar (rot). Das pink dargestellte Bauteil (20190102) verlässt bei der Pfeilmarkierung (Schicht 4500) das hier das Toleranzband von 5 %.

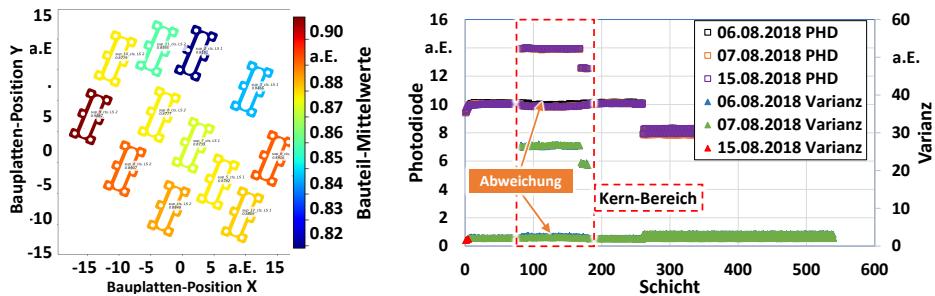


Bild 92: Statistische Prozessanalyse: Aufgrund der Positions- und Richtungsabhängigkeit (a) ist nur ein Vergleich unter Berücksichtigung der Anlagen-, des Lasersystem-, der Positions- und der Bauteilgleichheit möglich. Abbildung (b) zeigt dazu beispielhaft eine deutliche Abweichung im absoluten Signal von Photodiode unterschiedlicher Bauteilpositionen.

Die geringe Schwankung der Schichtmittelwerte von Bauteilen die an festen Positionen und mit gleichen Anlagen generiert wurden ermöglichen die Verwendung der KSBÜ zur statistischen PÜ. Zusätzlich zu einem Toleranzband für den Schichtmittelwert, sind Toleranzbänder für die Varianz der Schichtwerte pro Bauteil definierbar.

#### 4.5.2 Signartiefe bei der Analyse von Kanaltestkörpern

Hier werden verschiedene Kanal-Testgeometrien generiert und die KSBÜ-Daten mit den Prüfverfahren Flächenvergleich mittels 3D-Scan, Schlibbild-Analyse, Computer-Tomographie und Lichtmikroskopie verglichen. Zusätzlich wird die Entpulverung von dünnen Kanalgeometrien getestet. Dafür wird die **Signartiefe** eingeführt, welche die Anzahl an Schichten in denen pro untersuchter Region, Überhangbereich oder Kavität eine Anomalie erkennbar ist.

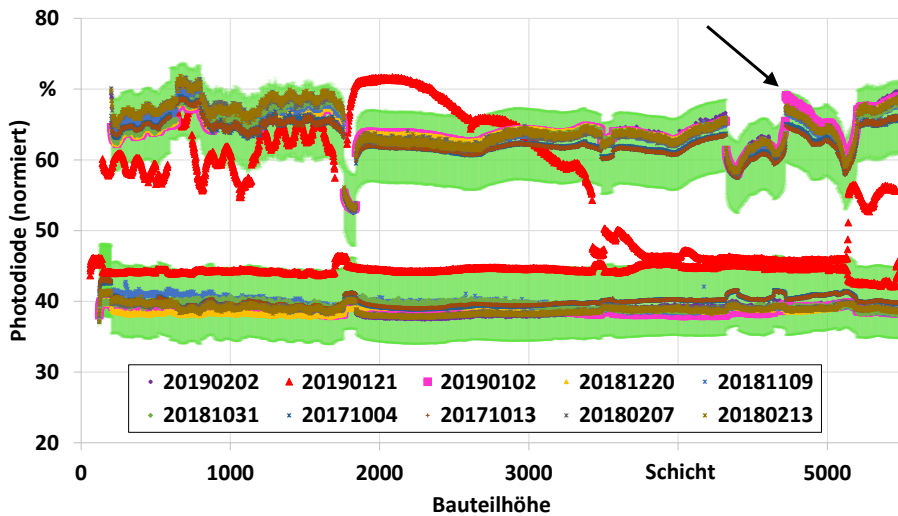


Bild 93: Vergleich von 10 an verschiedenen Tagen gebauten Bauteilen mit grünem Toleranzband ( $\pm 5\%$ ). Das Bauteil vom 21.01.2019 (rot) zeigt deutliche Abweichungen. Das Bauteil vom 02.01.2019 (pink) liegt bei Schicht 4900 an den Grenzen des Toleranzbereichs.

Der erste Kavitäten-Testteil wurde im Rahmen von Parameter-Optimierungen [P3, P5] mit unterschiedlichen Energiedichten aufgebaut. Der 3D-Scan-Flächenvergleich mittels Streifenlichtprojektion zeigt Anhaftungen bei allen Kanaldurchmessern in der Horizontal-Ansicht. Bei Kanaldurchmessern größer 3 mm führt das einsackende Material zu ovalen Kanalquerschnitten. Zusätzlich werden auf der schiefen Oberfläche oberhalb der Durchmesser 6, 7 und 9 mm Verwerfungen erzeugt, die auf thermisch induzierten Verzug zurückzuführen sind und bei dieser Ausprägung zur Beschädigung der Beschichterlippe führten. Bild 94 zeigt das Diagramm zur Auswertung der Signaturliefe in Abhängigkeit des Durchmessers der jeweils betrachteten Kavität. Im Fall der gezeigten stützstrukturfreien Überhänge werden Signaturliefen von bis zu 35 Schichten erfasst, die wegen dem keilförmigen Testbauteil nach oben begrenzt waren.

Bild 95 zeigt eine Gegenüberstellung von mittels 3D-Scan gemessener Abweichung und der Signaturliefe für die horizontalen Kavitäten mit 8 mm Durchmesser. Mittels Röntgen-Computer-Tomographie (CT) Strahlungsenergien größer 200 kV wird für die gezeigten Stahlbauteile eine Untersuchung möglich und Poren mit einer Größe über 50  $\mu\text{m}$  automatisch detektierbar [172]. Im Diagramm ist die untersuchte Kavität des Testkörpers rot umrahmt, dessen Prozess-Parameter-Energiedichte unter 10  $\text{J}/\text{mm}^3$  liegt. Die grüne Einfärbung im CT-Bild zeigt, dass die Kavitäts-Oberseite stark porös ist. Ebenso zeigt die

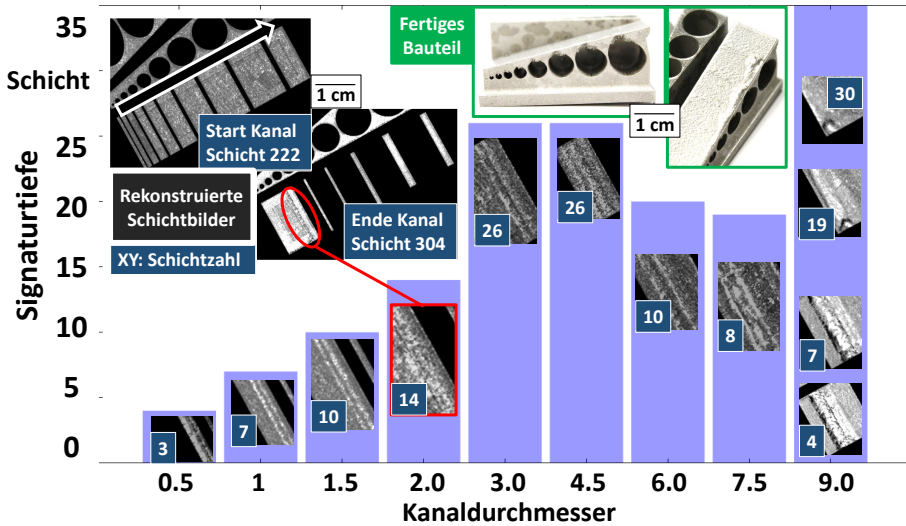


Bild 94: Links oben: Ausschnitt des rekonstruierten Schichtbildes zur gleichzeitigen Startschicht 222 der horizontalen Kanäle und der Endsicht des 2 mm Kanals in Schicht 304. Das Balkendiagramm zeigt die Signaturtiefe der einzelnen Kanäle über deren Kanaldurchmesser. Der grüne Ausschnitt enthält Aufnahmen des fertigen Bauteils.

Signaturtiefe einen erhöhten Wert, wobei der 3D-Scan kaum Abweichungen feststellt. Die Signaturtiefe und die 3D-Scan-Abweichung sind ab einer Energie von  $50 \text{ J/mm}^3$  auf einem reduzierten Wert (20 bzw. 0,2 mm) der ebenfalls eine verringerte Porosität zeigt.

Weitere Testkörper werden in der manuellen Analyse von Schmelzbad-Überwachungs-Daten, der CT- und der Schliffbild-Analyse gegenübergestellt. Bild 96 zeigt einen Testkörper in der 3D-Ansicht der Röntgen CT-Daten (GE Phoenix vto me x m,  $U_{max} = 300 \text{ keV}$ ) der Software VG-Studio Max [173]. Ein-gezeichnet ist auch die Beschichtungsrichtung, weil sich die rot markierte Porosität auf dieser häuft. Bild 96 zeigt einen Horizontalschnitt in der Bau-plattformebene auf Höhe des Kavitätenoberseite. Deutlich erkennbar sind die Stellen mit Porosität, welche auf den Bildern der Schmelzbad-Überwachung und der lateralen PÜ durch helle Bereiche erkennbar sind. Das Horizontal-schliffbild auf Bild 96 zeigt mehrere Poren entlang der Kanalrichtung. Bei der manuellen Analyse der Schmelzbad-Daten wird auf Bild 96 die Varianz des Kanalverschlusses untersucht. Sie lässt die Anomalien im Anfangsbereich des Kanalverschlusses zwischen Schicht 520 und 535, Signaturtiefe 15, deutlich über das grün hinterlegte Toleranzband steigen.

Zur Untersuchung der Fertigbarkeit von Kanaldurchmessern werden Test-teile mit Kavitäten-Durchmessern zwischen 0.5 und 2 mm und mit Längen

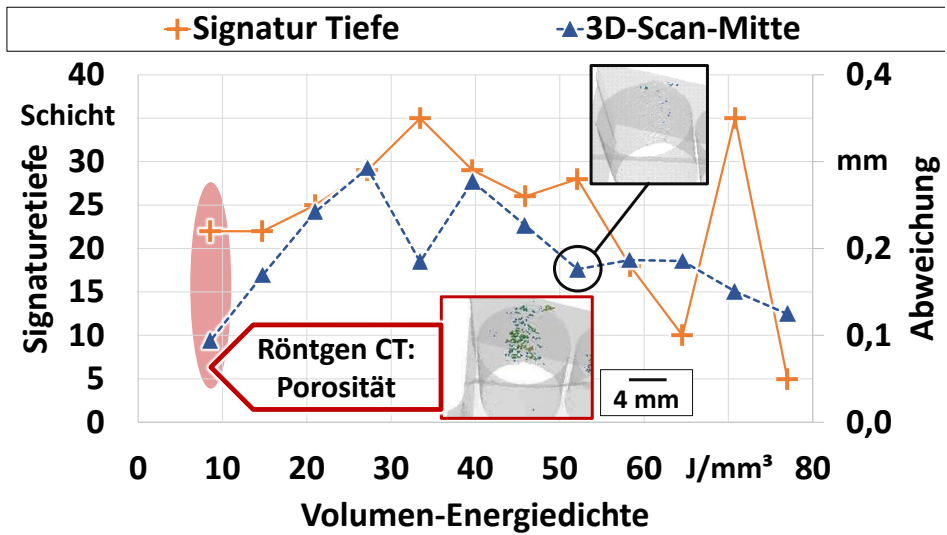


Bild 95: Vergleich der Signaturreiefe und der im 3D-Scan vermessenen Abweichung bei einem Überhangparameterstest mit variiertener Volumen-Energiedichte. Die eingebildeten Bilder zeigen Röntgen-CT-Aufnahmen der angezeigten Überhänge mit grün dargestellter Porosität.

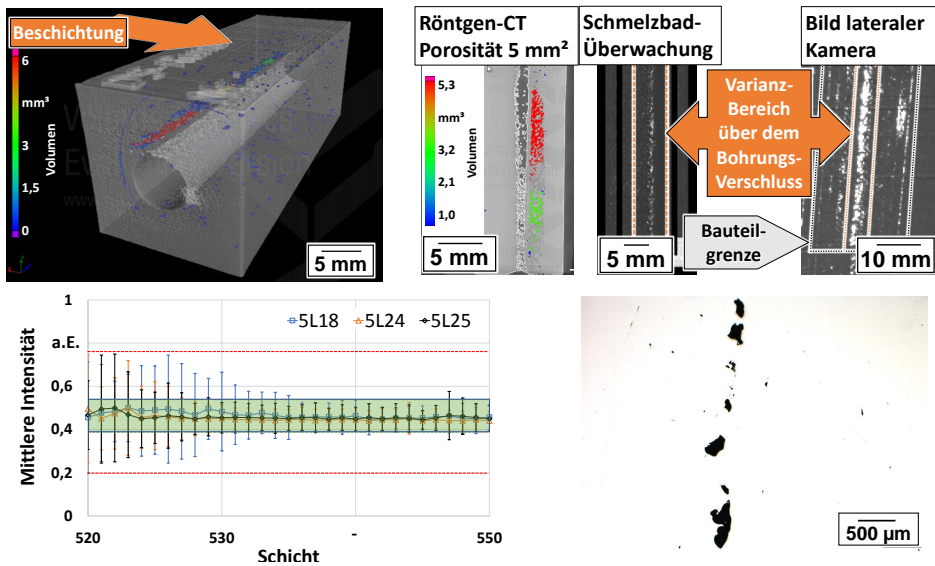


Bild 96: a) CT-Ansicht mit Beschichtungsrichtung senkrecht zum ungestützten Kanal b) Vergleich der Untersuchungsmethoden c) Varianz im Schmelzbad-Überwachungssignal bei drei gleichen Bauteilen d) Schliffbild mit Porosität am Kanalverschluss.

von 20 bis 50 mm mit den Werkstoffen AlSi10Mg und 1.4542, siehe Bild 112

im Anhang, generiert. Dabei wurde das Strömungsverhalten der Kanal-Testteile untersucht [P5]. Um die Ergebnisse abzugleichen wurden Messungen zum minimalen Innendurchmesser durchgeführt und mit der Signaturtiefe verglichen [97]. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist gut, so dass die Signaturtiefe als Qualitätsmerkmal zur Beurteilung von Kanalverschlüssen herangezogen werden kann.

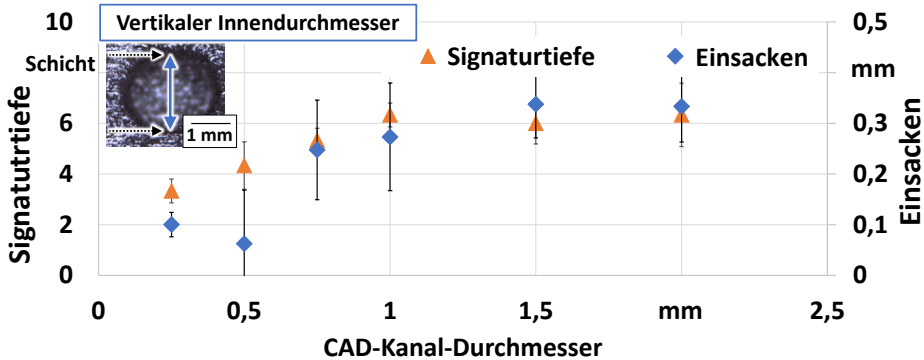


Bild 97: Der Vergleich von Signaturtiefe und Einsacken, der Differenz aus CAD-Durchmesser zu vertikalen Kanal-Innendurchmesser, zeigt eine gute Übereinstimmung.

Durch die Dargestellten Auswertungen und Vergleiche aus potentiell in-situ durchführbarer KSBÜ und ex-situ durchgeführten zerstörenden und nicht-zerstörenden Prüfungen wurde gezeigt, dass die Qualität von mittels LSS gefertigten Kanalgeometrien anhand der detektierten thermischen Strahlung des Schmelzbades an Kanal-Oberseiten möglich ist. Dies kann sowohl zu Parameter-Optimierung wie im zweiten Beispiel oder zur zerstörungsfreien Qualitätssicherung genutzt werden.

### 4.5.3 Spritzer-Signaturen

Der Einfluss von Spritzern die bei hohen Aufbauraten und Energiedichten, sowie nah nebeneinander positionierten oder hohen Füllfaktoren, also dem Verhältnis von Bauteil- zu Bauplattform-Fläche, die relative Dichte und damit die mechanischen Eigenschaften von generierten Bauteilen verringern wird hier bezüglich der KSBÜ untersucht. Wie bereits im Fehlerkatalog in Abschnitt 4.4 gezeigt, sind Spritzersignaturen im Schmelzbad detektierbar, was hier anhand von Experimenten mit hoher Fülldichte, Prozessgas-Strömung und durch Zugabe von Überkorn-Partikeln dargestellt werden soll.

Bild 98 zeigt eine Bauplattform mit Testwürfeln und der verwendeten Scan-Strategie. Die relative Dichte der Probenwürfel wird nach der Generierung archimedisch und stichprobenweise metallographisch ermittelt, wobei stets

Werte über 98,9 % gemessen werden. Eine Häufung von niedrigeren Werten in der rechten Bauplattenhälfte, rot markiertes Feld, verschiebt sich in Abhängigkeit der Prozessgasströmung die mit dem Standardwert 79 % und im Wiederholungs-Experiment mit 97 % der Absaugleistung der Anlage eingestellt ist. Bild 98 b) zeigt die Würfelposition mit der archimedisch bestimmten und mittels Farbskala skalierten Dichte. Der blaue Kreis in der Mitte der unteren Hälfte markiert das Scannerfenster des verwendeten Lasersystems.

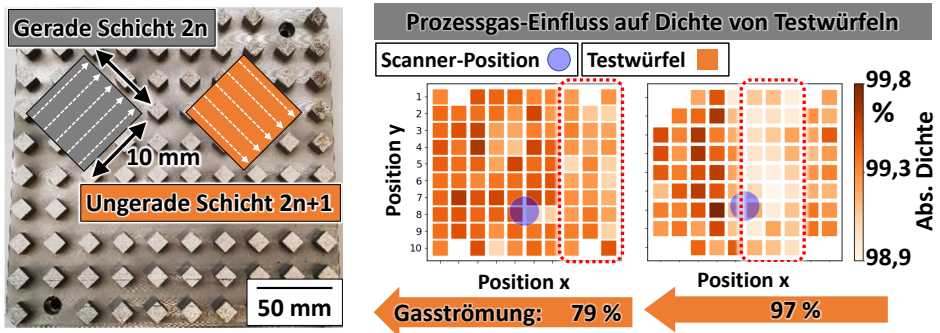
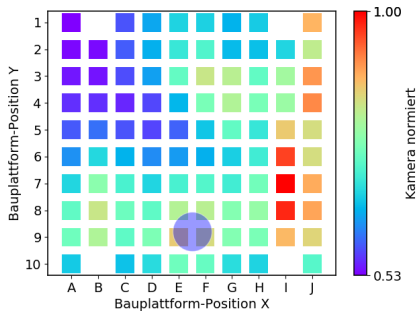


Bild 98: a) Würfel-Bauplattform mit 79 % Prozessgas-Strömung und Darstellung der Scanstrategie; b) Vergleich der archimedisch bestimmten und positionsabhängigen Dichte bei zwei Würfel-Bauplattformen mit 79 und 97 % Prozessgas-Strömungs-Drehzahl.

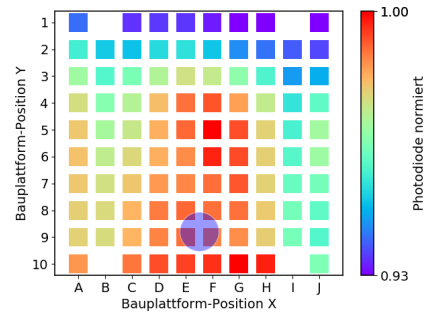
Zur Analyse der Schmelzbad-Daten werden zuerst wieder die Schicht-Mittelwerte der Bauteile verwendet (vgl. Abschnitt 3.4.3.1), um das positionsabhängige Signalverhalten darzustellen. Mit steigender Entfernung und größerem Winkel zum Scannerfenster sinkt das Messsignal der Photodioden um bis zu 9 %. Bei der Kamera des Lasersystems 1 ist dieser Effekt ausgeprägter, hier zeigt sich ein Signalverlust von bis zu 37 %, also ein Wert der weit über dem in Abschnitt 3.4.1 mittels Entfernungseinfluss abgeschätzten Signalverlust in Bild 29 liegt. Bild 99 zeigt die Mittelwert-Analyse der Experimente separat für die Kamera und die Photodioden-Daten. Die Richtungs- und Positionsabhängigkeit wird durch den winkel- und wellenlängenabhängigen Reflexionsindex der Scannerspiegel verstärkt, denn die Galvanometer-Beschichtung ist auf die Wellenlänge des Lasers ausgelegt. Dies wird durch ein Patent des Anlagenherstellers GE, Mutterkonzern von CL, bestätigt, welches eine Variante einer KSBÜ darstellt, bei der dieses von einem separaten Scanner beobachtet wird, wodurch andere Scanner-Beschichtungen verwendet werden können [174]. Weiter beeinflusst die um die Interaktionszone entstehende und von der Prozessgasströmung abgelenkte Gasfackel das koaxial detektierbare Signal.

## 4 Ergebnisse

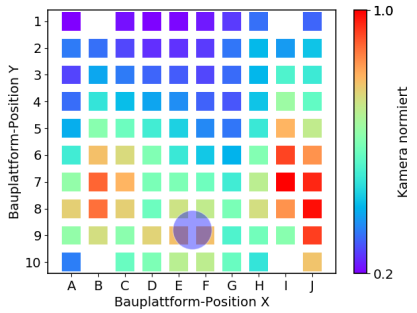
(a) Experiment 1 / Lasersystem 2: Kamera



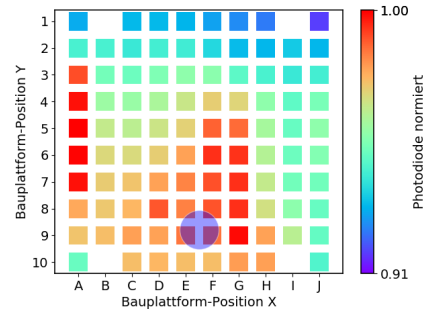
(b) Experiment 1 / Lasersystem 2: Photodiode



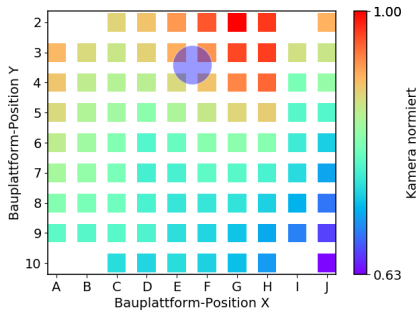
(c) Experiment 2 / Lasersystem 2: Kamera



(d) Experiment 2 / Lasersystem 2: Photodiode



(e) Experiment 2 / Lasersystem 1: Kamera



(f) Experiment 2 / Lasersystem 1: Photodiode

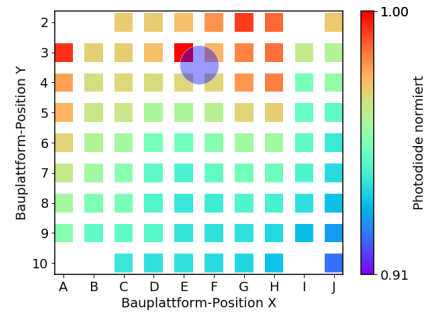


Bild 99: Mittelwert-Analyse: Die Position der Farbfelder entspricht der Würfelposition auf der Bauplattform und die Farbkodierung entspricht den jeweiligen Mittelwerten pro Bauteil durch die koaxiale Schmelzbad-Überwachung detektierten Strahlung. Der blaue Kreis symbolisiert die Position des Scannerfensters des verwendeten Lasersystems. Die Farbskala ist für jedes Bild und jeden Sensor normiert um die Varianz sichtbar zu machen.

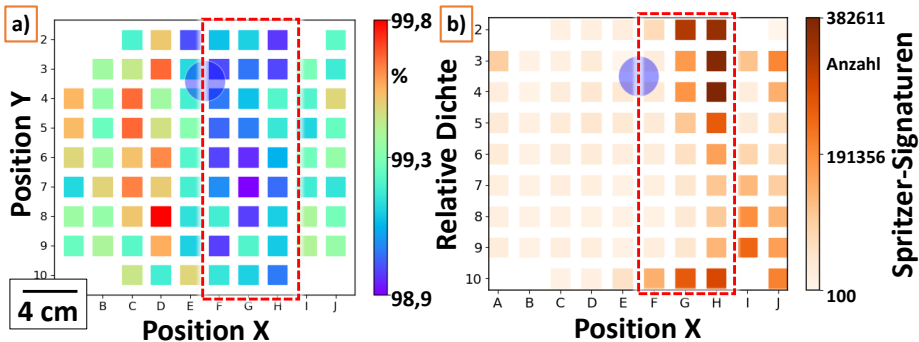


Bild 100: Die archimedisch gemessenen relative Dichte der Testkörper a) korreliert mit der Häufigkeit der detektierten Spritzer-Signaturen b).

Abhängig von der Position auf der Bauplattform wird daher die eintreffende Laser- und die emittierte Strahlung von verdampftem Material gestreut, absorbiert und durch ionisierte Strahlung aus dem Plasma der Fackel überlagert. Dieser Einfluss wird hier nicht quantifiziert, aber die qualitative Aussage dient der Erklärung der gemessenen Mittelwert-Verteilung, die auf Bild 99 dargestellt ist. Diese ist stets nach rechts, entgegen der Prozessgasströmung verschoben. Die Prozessgasströmung beeinflusst neben der Richtung der Gasfackel die Trajektorien der Spritzer die in der Interaktionszone entstehen [175, 30] (Vertiefende Ergebnisse werden auf Bild 128 im Anhang erläutert). Die nach dem Beschichtungsvorgang noch nicht abgetragenen Spritzer und versinterten Pulveragglomerate beeinflussen das Schmelzbad [38], so dass eine Signatur in den Schichtbild-Daten der KSBÜ entsteht. Um diese Signaturen zu verdeutlichen, wird ein Experiment durchgeführt, bei dem gesiebtes Überkorn aus dem Pulverrecycling mit Partikeln größer  $x_{cmin} > 100 \mu\text{m}$  auf eine beschichtete Substratplatte gestreut wird, um eine stark von Spritzern belegte Fläche zu simulieren (Bild 101). Die Signaturen der Spritzer sind deutlich als schwarze runde Flecken erkennbar (Bild 102).

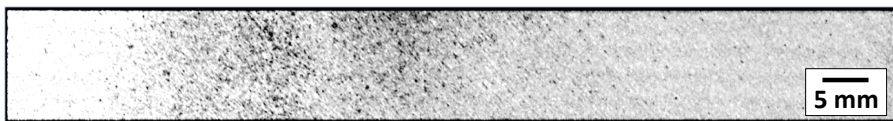


Bild 101: Das Schichtbild eines Spritzer-Simulations-Experiments mit abgesehenen Agglomeraten, Spritzern und Partikeln größer  $x_{cmin} > 100 \mu\text{m}$  zeigt deutliche dunkle Signaturen.

Durch eine Filteroperationen werden diese Artefakte mit einem bis zu 5 Pixel großen Durchmesser erfasst und schichtweise abgefragt. Für das oben

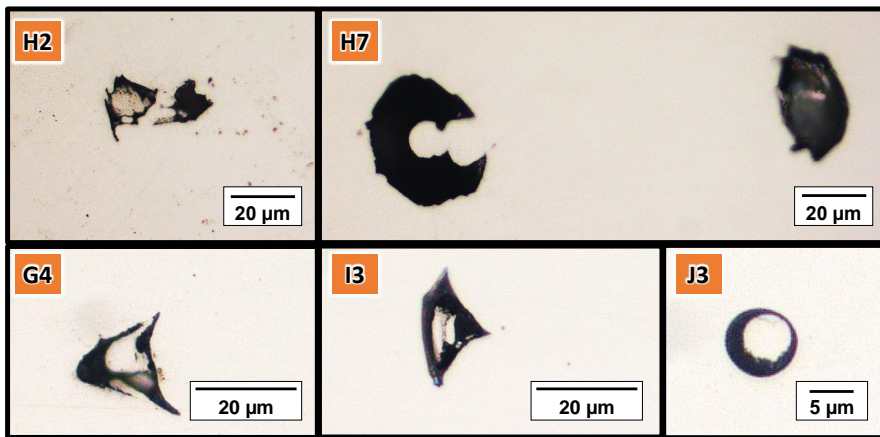


Bild 102: Die Schlichtbildanalyse der einzelnen Würfel ergab eine geringe Anzahl an Fehlstellen, diese wurden bei den abgebildeten Testwürfeln H2, H7, G4, I3 und J3 auf Spritzer zurückgeführt.

durchgeführte Würfelexperiment mit den zwei unterschiedlichen Prozessgas-Strömungs-Werten wird dies angewandt und eine Korrelation zu der verringerten Dichte bestätigt (Bild 100). Bild 102 zeigt zu den Würfeln H2, H7, G4, I3 und J3 Schlichtbilder mit aus Spritzern resultierenden Fehlstellen. Eine statistische Detektion von Spritzern oder agglomerierten Partikeln, welche größer als die effektiven Schichtstärke, also  $\sim 2 \cdot s_{parameter}$  der eingestellten Schichtdicke sind, wird durch die Ergebnisse bestätigt.

#### 4.5.4 Topographie-Evaluierung und Laserpolieren

Durch die bisher gezeigten Untersuchungen konnte ein Signalverständnis für den verwendeten Aufbau der koaxialen Schmelzbad-Überwachung abgeleitet werden, welches eine Anwendung zur Topographie-Evaluierung andeutet. Bild 103 zeigt ein Schema zum Verkippen des Schmelzbades mit resultierender Änderung der Emissionsrichtung, welches anhand der Belichtung von welligen Oberflächen auf Bild 103 verdeutlicht wird.

Auf Basis dieser Topographie-Abhängigkeit wird hier eine Methode entwickelt, um die Oberflächenrauheit während des Prozesses zu evaluieren. In einem zweiten Schritt soll mittels Laserpolieren die Oberflächenrauheit reduziert werden. Zur Evaluierung mittels Bildverarbeitung werden die Schichtbilder der Schmelzbad-Überwachung herangezogen (siehe Bild 65).

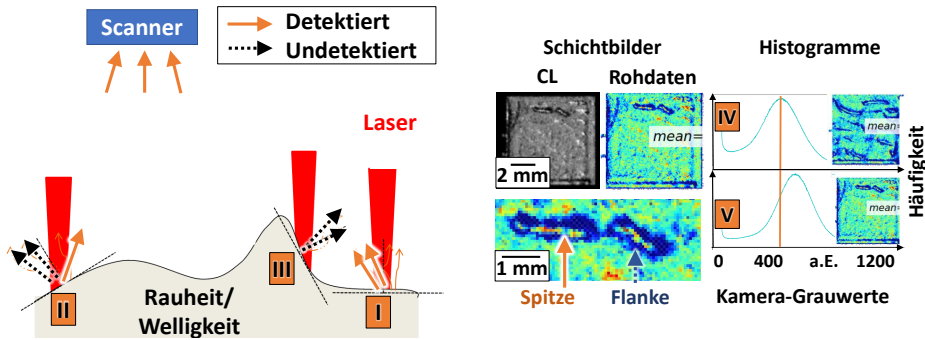


Bild 103: **Verkippen des Schmelzbades:** a) Schema zum Signalverlust aufgrund von Oberflächenrauheit: I>II>III; b) Flanken von Rauheit und Welligkeit verursachen dunkle Bereiche in Schichtbildern; Histogramme mit deutlichem Signalverlust: IV<V.

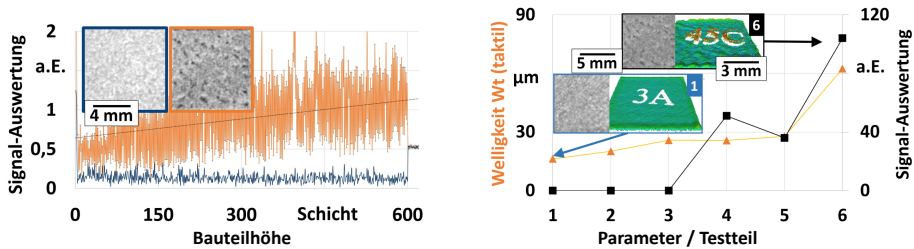


Bild 104: **Links:** Zunehmende Rauheit (orange) und glatter Aufbau (blau) [P4]. **Rechts:** Auswertungsergebnisse mit variierten Prozessparametern.

#### 4.5.4.1 Vorversuche zu einer geregelten Oberflächenrauheit

Abschnitt 3.7.4 erläutert das Vorgehen zur Generierung der hier diskutierten Ergebnisse detailliert, bei dem die Textur von Schichtbildern auf Basis von Helligkeitsunterschieden aus den Signalschwankungen des verkippten Schmelzbades bewertet wird. Die Abbildungen 104 belegen, dass durch diese Methode eine grundlegende Evaluierung der Rauheit möglich ist. Auf dieser Basis erfolgt eine Auswahl der Analyseparameter für diesen Werkstoff, die auf Bild 105 dargestellt ist. Daraus resultiert die für den Algorithmus bestimmte, bestmögliche Unterscheidung zwischen einer glatten und einer rauen Bauteiloberfläche mittels der Parameter für dunkle sogn. Blobs mittels 40. Perzentil zur Umgebungs-Helligkeit und minimaler Blobgröße von 40 px. Für die hellen Blobs wird das Tupel 60. Perzentil und 320 px minimaler Größe gefunden.

## 4 Ergebnisse

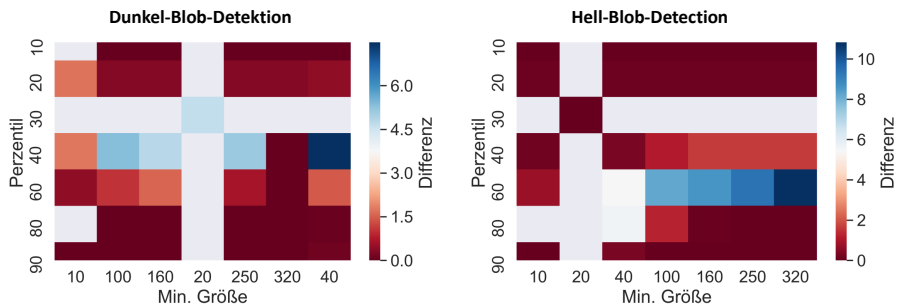


Bild 105: Darstellung der Ergebnisse einer Parameterauswahl des Blob-Detektions-Algorithmus für die hellen und dunklen Flecken der Schichtbilder.

### 4.5.4.2 Auswertung zur Bauteil-Serie

Die Auswertung der Bauteil-Serie mittels Blob-Detektions-Algorithmus anhand der Photodioden-Daten erfolgt mit den beschriebenen Parametern und führt zu keinem brauchbaren Ergebnis. Die Ursachen dafür sind:

**Photodioden-Scanner-Fleck:** Alle Datensätze von Bauteilen die sich während der Fertigung zum Teil direkt unter dem Scannerfenster befinden beinhalten den in Abschnitt 4.4 gezeigten Photodioden-Fleck, eine erhöhte bzw. gesättigte Intensität im Schichtbild. Trotz unterschiedlicher Versuche ist es nicht gelungen einen geeigneten Algorithmus zu entwickeln diesen Scanner-Fleck zu eliminieren.

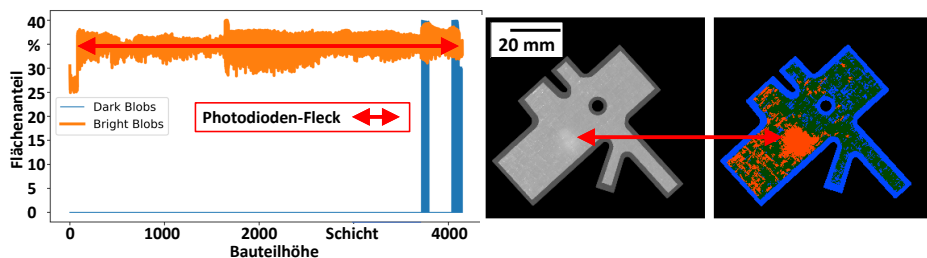


Bild 106: Das Diagramm zeigt den prozentualen Anteil an besonders hellen und dunklen Bereichen an der jeweiligen Gesamtschicht. Das Bild rechts zeigt eine Schicht mit Photodiodenfleck (roter Pfeil) und Rauheits-Signaturen (orange: übermäßig helle Bereiche / blau: übermäßig dunkle Bereiche).

**Ereignis-Anzahl:** Die konstant hohe Anzahl an einzelnen Signaturen würde ein ebenso häufiges Eingreifen einer Regelung auslösen. Daher ist klar, dass die alleinige Detektion von Blob-Signaturen in einzelnen Schichten nicht

ausreicht und eine Art Weiterverarbeitung über mehrere Schichten hinweg notwendig ist.

Durch die Ausarbeitung der Auswertungs-Software ist eine Basis geschaffen, um Prozessanomalien zu detektieren und deren Häufigkeit festzuhalten.

#### 4.5.4.3 Grundlagenversuche zum Laserpolieren

Hier werden die Ergebnisse zum Laserpolieren beim LSS gezeigt. Die Versuchsbeschreibung erfolgte in Abschnitt 3.7.4.3. Die mittlere Rauheit der unpolierten Flächen beträgt  $R_z = 55,7 \pm 8,5 \mu\text{m}$ , die der polierten Flächen  $R_z = 33,2 \pm 12,4 \mu\text{m}$ . Bei einer Schichtstärke von  $25 \mu\text{m}$  ist folglich keine Beschädigung mehr zu befürchten (Bild 107). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Signal-Auswertung zur Rauheit hier keine Unterscheidung der unpolierten Oberflächen erlaubt. Dies wird auf die hohe Rauheit von  $R_z > 40$

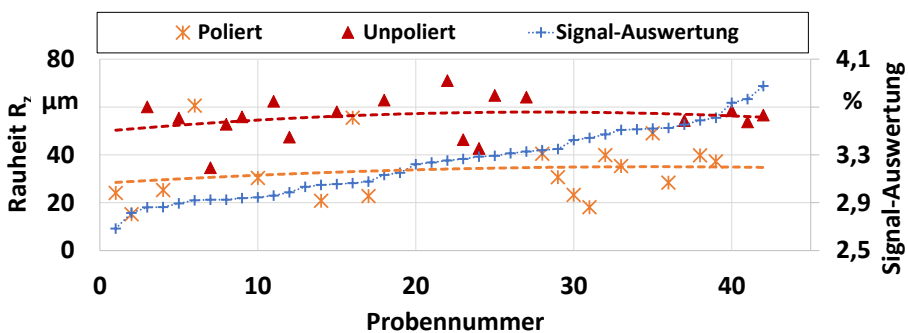


Bild 107: Durch das Laserpolieren wird die Oberflächenrauheit um fast 50 % auf die Größe der Schichtstärke von  $25 \mu\text{m}$  reduziert, um eine Beschädigung des Beschichters zu vermeiden. Die Signalauswertung zeigt keine Korrelation zu den Rauheitswerten was auf den unkalibrierten Umgang mit den laserpolierten Oberflächen zurückführbar ist, welche ein untypisches Signalverhalten aufweisen. Die Anordnung der Probennummern wurde zur Verdeutlichung absichtlich mit der aufsteigenden Signal-Auswertung gewählt.

$\mu\text{m}$  zusammen mit der z-Position direkt nach den Gitter-Stützstrukturen zurückgeführt. Mittels EDX wird die chemische Zusammensetzung untersucht, um verdampfende Anteile in der chemischen Zusammensetzung zu identifizieren. Es wurde keine Veränderung festgestellt (Bild 122 im Anhang). Das Laserpolieren mit dem Faserlaser zeigt eine deutliche Verbesserung der Oberflächenrauheit und kann im Prozess zur Steuerung eingesetzt werden.



## 5 Zusammenfassung

Die laserbasierte additive Fertigung von Metallen, speziell das Laserstrahl-Schmelzen (LSS) haben den Produktentwicklungsprozess und die Serienproduktion von kosten- sowie werkzeugintensiven Erzeugnissen verändert [1]. Vor allem für die Prototypen-Phase liefert sie Vorteile durch Zeitersparnis und kostengünstige Variantenvielfalt.

Hier wurde eine Prozesscharakterisierung für das Verfahren Laserstrahl-Schmelzen von Metallen anhand einer Serienanlage im Hinblick auf die Prozessüberwachung (PÜ) vorgestellt und bestehende Defizite aufgezeigt. Auf Basis einer Prozessfehler-Analyse unter Verwendung einer lateralen Prozessüberwachung wurde die Charakterisierung, die Signalanalyse und die Nutzbarmachung des koaxialen Schmelzbad-Überwachungs (KSBÜ)-Systems der Firma Concept Laser GmbH *QM-Meltpool 3D* erforscht. Folgende Ergebnisse wurden durch die Arbeit erbracht:

### **Voraussetzung für die Untersuchungen:**

**Fehleranalyse:** Bei der quantitativen und qualitativen Analyse auftretender Prozessfehler ist für den Prototypenbau vor allem die Datenvorbereitung als größte Fehlerquelle identifiziert worden. Die manuelle Stützstruktur-Erstellung muss durch optimierte Simulationsmodelle und Software, sowie organisatorische Methoden weiter verbessert werden. Porosität ist aufgrund der Verwendung von ausgereiften Parametern im betrachteten Zeitraum ein untergeordnetes Problem. Die wichtigste Erkenntnis aus der Fehleranalyse ist die Häufigkeit der Oberflächenrauheit von Bauteilbereichen während des Prozesses. Sie dient als Indikator und Ausgangspunkt für fatale Prozessfehler.

**Fehlerkatalog:** Das Ziel einen Fehlerkatalog zur Verfügung zu stellen, welcher als Grundlage für Schulungsmaßnahmen und für die zielgerichtete Fehlersuche verwendet werden kann ist sowohl für die laterale als auch die KSBÜ erfüllt.

### **Ergebnisse der Signalanalyse:**

**Einfluss von Prozessparametern:** Wie erwartet konnte gezeigt werden, dass die Variation der Prozessparameter Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Laserfokusdurchmesser, die Größe des koaxial detektierbaren Schmelzbad beeinflussen. Die dabei detektierte Signalvarianz bei Einzelspuren ist signifikant. Durch Mittelwertbildung bei der Analyse von dünnen Wandstrukturen wurden lineare Zusammenhänge gezeigt [P7].

**Änderungen in der Partikelgrößenverteilung:** Trotz einer geringen Änderung der mittleren Korngrößenverteilung  $d_{3,50}$  von nur 5  $\mu\text{m}$ , wurde bei Untersuchungen mit dem Werkstoff AlSi10Mg in den mittels KSBÜ

erfassten Daten ein Einfluss der Wärmeleitungseigenschaft des Pulverbetts gezeigt.

**Einfluss der Pulver-Schichtstärke:** Es konnte gezeigt werden, dass durch ein Ansteigen der Schichtstärke bei gleichbleibendem Energieeintrag, ein koaxial detektierbarer Signalverlust gemessen wird, das Schmelzbad also an Größe und Intensität verliert [P7].

**Einfluss der Oberflächenrauheit:** Durch die vorliegende Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenrauheit einen dominanten Einfluss auf das Signal dieser KSBÜ ausübt [P3, P5, P4].

**Detektion von Porosität mittels Schichtbild-Analyse:** Trotz umfangreicher Versuche mit den Materialien 1.4404, 1.4542, 1.4057, 1.2709 und AlSi10Mg konnte keine direkte Signatur zur Entstehung von Porosität aus den mittels KSBÜ generierten Schichtbild-Daten identifiziert werden [P3]. Die Entstehung von Poren findet, unter Voraussetzung der Verwendung von ausgereiften Prozess-Parametern, besonders während der Abkühlungszeit der Schmelze und bei Scanvektor-Start- und End-, sowie Wende-Bereichen statt [14]. Eine thermische Signatur dieses Poren-Entstehungs-Prozesses ist mit den angewandten Methoden zu dieser KSBÜ nicht direkt detektierbar.

#### **Demonstrationen zur Nutzbarmachung:**

**Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA):** Erst durch die Kombination aus Daten der Baujob-Vorbereitung und der lateralen sowie insbesondere der der koaxialen Prozessüberwachung ist eine umfassende FMEA und die Identifikation von Fehlerursachen beim LSS möglich. Dabei ist die KSBÜ durch die Auflösung der tatsächlich belichteten Scantrajektorien und der zugehörigen thermischen Signatur eine wertvolle Ergänzung, besonders weil sie im Gegensatz zu lateralen Prozessüberwachungs-Systemen keine schichtweise Aufnahme-Zeit in Anspruch nimmt.

**Parameter-Optimierung:** Am Beispiel stützstrukturfreier Überhänge wurde gezeigt, dass durch den Einsatz der KSBÜ eine Bauteil-Prüfung möglich ist [P5]. Somit können Parameter für einzelne Bauteilbereiche optimiert werden. Die Verwendung der KSBÜ zur Optimierung der Verzögerungszeiten bei der Parameter-Entwicklung [P3] ist als Alleinstellungsmerkmal und Anwendungsmöglichkeit identifiziert worden.

**Detektion von Belichtungsfehlern mittels KSBÜ:** Durch die räumlich und zeitlich hochaufgelöste Detektion der thermischen Emission aus der Prozesszone sind Fehler in der Laser-Belichtungsstrategie oder der Laser-Belichtungs-Steuerung detektierbar. Ohne den Einsatz der koaxialen Schmelzbad-Überwachung ist dies nicht möglich.

**Verwendung zur statistischen Prozessanalyse:** Durch den schichtweisen Vergleich und die Aufzeichnung des gesamten Herstellungs-Prozesses ist es möglich Bauteile in einer Serienfertigung mit definierten Toleranzbän-

dern zu prüfen, um mittels Ober- und Untergrenzen des koaxialen Signals Ausschussteile deklarieren zu können. Die auf Bild 79 gezeigte Korrelation zwischen Porosität und Varianz der KSBÜ-Daten lässt sich besonders bei einer selektiven Betrachtung von Einheitsvolumina für eine weiterentwickelte Analyse nutzen, um Prozessschwankungen zu detektieren. Dadurch ist eine Serienfertigung mit gleichbleibenden Produkteigenschaften abprüfbar [P3].

**Detektion von Spritzern und Oberflächenrauheit:** Durch Bildverarbeitungs-Methoden wurden die aus der Schmelzbad-Überwachung generierten Schichtbilder als Indikator einer relativen Oberflächenrauheit verwendet. Durch das Laserpolieren, also die mehrfache Belichtung von Bauteilbereichen ohne eine Pulverbeschichtung, wurde eine Glättung von rauen oder welligen Oberflächen demonstriert [P4]. Die Spritzerbildung beim Laserstrahl-Schmelzen ist unter wirtschaftlichen Prozess-Parameter-Einstellungen nicht zu verhindern und führt zu Fehlstellen wenn Spritzer oder Agglomerate in Folgeschichten nicht komplett aufgeschmolzen werden [38]. Weil diese ebenfalls die Schmelzbad-Ausrichtung beeinflussen [38], kommt es lokal zu einer Verringerung des koaxial detektierbaren Signals. Diese Signaturen werden in den Schichtbildern lokalisiert, was hier gezeigt wurde. Diese Artefakte sind zur Regelung in Folgeschichten verwendbar, um lokal mit erhöhtem Energieeintrag Spritzer komplett aufzuschmelzen.

**Notausfunktionen:** Weil vor allem bei Großanlagen mehrtägige Aufbauzeiten ein signifikantes monetäres Risiko beinhalten, sind Notausfunktionen notwendig, weil dadurch bei sonst unbemerkten, aber kritischen Prozessfehlern Anlagenkapazität und Materialwerte eingespart werden können, bevor Bauprozesse abgeschlossen werden. Durch KSBÜ-Systeme sind kritische Prozessfehler wie fehlendes Pulver, Delamination, Abreißende Stützstrukturen, für die Bauteilqualität kritisch große Spritzer und Agglomerate größer 150  $\mu\text{m}$ , sowie Belichtungsfehler detektierbar. Diese Fähigkeiten wurden in der Arbeit gezeigt und damit bewiesen, dass verschiedene Notausfunktionen und Überwachungs-Algorithmen implementierbar sind.



## 6 Summary

Laser based metal additive manufacturing processes like Laser Powder Bed Fusion (LPBF) are changing the product development and the serial production of cost intensive products. Especially for prototypes, it provides advantages through time savings and cost-effective variant diversity.

Here the LPBF process was introduced with regard to process monitoring (PM) and existing deficits were pointed out. In order to ensure a targeted development of PM-methods, a process error analysis was carried out on the basis of a lateral camera based monitoring system. With the goal of a deeper understanding of significant process defects, layer images were analysed together with physical component properties of test specimen. On this basis a characterization and signal analysis with the coaxial melt pool monitoring (CMPM) system of the company Concept Laser GmbH *QM-Meltpool 3D* was carried out. To demonstrate the usability of the system different experiments were carried out. The following results were achieved by this work:

### **A prerequisite for investigations:**

**Process flaw analysis:** In the quantitative and qualitative analysis of occurring process errors, data preparation has been identified as the biggest source of error in the manufacturing of prototypes. The manual creation of support structures must be improved by optimized simulation models and software as well as organizational methods. Porosity is a secondary problem due to the use of mature process parameters. The most important finding from the analysis is the frequency of surface roughness of component areas during the process. It serves as an indicator and starting point for fatal process errors.

**Defect catalog:** The goal of providing a defect catalogue which can be used as a basis for training measures and for targeted troubleshooting is fulfilled for both the lateral and the CMPM.

### **Results of the signal analysis:**

**Influence of process parameters:** As expected, it could be shown that the variation of the process parameters laser power, scanning speed, laser focus diameter, influence the signal of the coaxially observed melt pool. The detected signal variance for single tracks is significant, linear relationships can be derived by averaging when analyzing thin wall structures [P7].

**Changes in the particle size distribution:** Despite a small change of 5  $\mu\text{m}$  of the mean particle size distribution  $d_{3,50}$  during the investigation of the material AlSi10Mg, an influence of the heat conduction property of the powder bed was shown in the data collected by CMPM, when using different particle size distributions.

**Influence of powder layer thickness:** Presented results prove that an increase of the powder layer thickness at constant energy input leads to a coaxially detectable signal loss, i.e. the melt pool loses size and intensity [P7].

**Influence of surface roughness:** The present work has shown that the surface roughness has a dominant influence on the signal of this CMPM, when compared to mutual process fluctuations [P3, P5, P4].

**Detection of porosity:** Despite extensive experimental approaches with the materials 1.4404, 1.4542, 1.4057, 1.2709 and AlSi10Mg no direct signature of pores could be identified from the data generated by the CMPM [P3]. The generation of porosity occurs particularly during the cooling period, especially in scan vector start- and end-paths [14]. A thermal signature is therefore not detectable with this CMPM system.

**Demonstration of utilization:**

**Failure Mode and Effects Analysis (FMEA):** Only through the combination of data from data preparation, the lateral and especially the coaxial process monitoring, a comprehensive FMEA and the identification of failure causes in LPBF is possible. Here, the CMPM is indispensable due to the resolution of the actually exposed scan trajectories and the corresponding thermal signatures.

**Parameter optimization:** Using the example of support structure-free overhangs, it was shown that by using the CMPM a component-qualification is possible [P5]. Thus, parameters for individual component areas can be designed precisely. The use of CMPM to optimise delay times in parameter development [P3] has been identified as a unique selling point and important possible application.

**Detection of exposure errors using CMPM:** Due to the high spatial and temporal resolution in the CMPM process-data, errors in the laser exposure strategy or the laser-exposure-control can be detected. Without the use of the CMPM, such process errors cannot be detected because the system software typically does not provide access to the scan paths trajectories used.

**Use for statistical process analysis:** By comparing layers and recording the entire manufacturing process, it is possible to test components in a series production with defined tolerance bands in order to declare rejects by means of upper and lower limits of the coaxial signal. The correlation between porosity and variance of the KSBÜ data shown in figure 79 can be used for advanced analysis, especially when selectively viewing unit volumes, to detect process variations. This ensures a series production with comparable product characteristics [P3].

**Detection of spatter and surface roughness:** By usage of image processing-methods the layer images generated from the CMPM were used as an

indicator of relative surface roughness. By laser polishing, i.e. multiple exposure of component areas without powder coating, a smoothing of rough or wavy surfaces was demonstrated [P4]. Spatter formation during LPBF cannot be prevented under economical process parameter settings and leads to defects if spatter or agglomerates in subsequent layers are not melted completely [38]. Since these also influence the melt pool alignment [38], there is a local reduction of the coaxial detectable signal. These signatures are localized in the images, which was shown here. These artifacts can be used for control in subsequent layers to locally melt spatter completely with increased energy input.

**Emergency stop functions:** Because in some cases, and especially in the case of large scale LPBF systems, build-jobs lasting for days represent a significant value, emergency stop functions are enormously helpful because they allow savings in valuable system capacity and material. CPM systems detect critical process faults such as missing powder, delamination, support structure defects, spatter and agglomerates larger than 150  $\mu\text{m}$  critical to component quality and exposure faults. These capabilities were demonstrated in this thesis and thus proved that emergency stop functions can be implemented.



# 7 Anhang

## 7.1 Arbeitssicherheit

Beim Laserstrahl-Schmelzen treten nicht sichtbare und nicht spürbare Gefahren auf. Die verwendeten Pulverwerkstoffe enthalten krebserzeugende, mutagene und reproduktionstoxikologische (KMR-) Stoffe. Wegen dem enthaltenen Feinstaubanteil mit Partikelgrößen kleiner  $1 \mu\text{m}$ , hohen KMR-Anteilen in verbreiteten Materialien für das Laserstrahl-Schmelzen, sowie spezifischen Gefahren der Anlagen, der Lasertechnik und der Prozesskette werden hier die Symbole und Gebotszeichen im zugangsbeschränkten Arbeitsbereich gezeigt. Wegen fehlender verbindlicher Richtlinien oder gesetzlich vorgeschriebenen Rahmenbedingungen oder gründlicher Angebote seitens der Anlagenhersteller empfiehlt der Autor die intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Arbeitssicherheit beim Betrieb additiver Fertigungsanlagen. Folgende Literaturhinweise sollen weitere Anreize schaffen: [P1, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183]



Bild 108: Symbole und Gebotszeichen im zugangsbeschränkten Arbeitsbereich.

Chemisches Element	Messwert [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	Grenzwerte: A/E [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]
<b>Stationäre Messungen</b>		
Aluminium (E)	0,0017	1,25 / 10
Chrom (E)	0,000096	1,25 / 2
Eisen (E)	0,00062	1,25 / 10

<b>Chemisches Element</b>	<b>Messwert [mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Grenzwerte: A/E [mg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Vorbereitung</b>		
Einatembare Staub	0,92	10 (ASGW)
Eisen (A/E)	0.0024 / 0.052	1,25 / 10
Nickel (A)	0,00073	0,006 / 10
<b>Nacharbeit</b>		
Kupfer (A)	0,0061	0,01 / 10
<b>Reinigung</b>		
Einatembare Staub	5.32	10 (ASGW)
Eisen (E)	1,3	1,25 / 10
Nickel (E)	0,089	0,006 / 10

Tabelle 3: Die Anlagenvorbereitung, -Reinigung und Nacharbeit weisen erhöhte Werte unterhalb der Grenzwerte auf. Werte für einatembaren (E) und alveolengängigen (A) Staub sind unterschieden. ASGW: Allgemeiner Staubgrenzwert; Grenzwerte entnommen aus TRGS 561 [184], TRGS 900 [185], TRGS 910 [186], MAK-Liste der DFG [187]

## 7.2 Grundlagen

### 7.2.1 Gaußsches Strahlprofil

Das Gaußsche Strahlprofil kann folgendermaßen formuliert werden:

$$I(x, y) = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot w^2} \exp\left\{-\frac{2x^2 + 2y^2}{w^2}\right\} \quad (18)$$

### 7.2.2 Numerische Simulation

Für die Simulation des Laserstrahl-Schmelzens eignen sich die Lösungen von Rosenthal [123] und Eagar-Tsai [188] [54]. Die Rosenthal-Gleichung für ein Tophat-Strahlprofil ist gegeben durch

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k R} \exp\left(-\frac{v(w + R)}{2\alpha}\right), \quad (19)$$

wobei  $T$  die positionsabhängige Temperatur,  $T_0$  die Vorheiz-Temperatur,  $q$  die eingebrachte Energie,  $v$  die Scangeschwindigkeit,  $k$  und  $\alpha$  thermische Eigenschaften und  $w$  und  $R$  Orts-Randbedingungen darstellen. Damit beschreibt

die Gleichung die Temperatur in Abhängigkeit zu einer Punkt-Wärmequelle. Das vom Rosenthal-Modell abgeleitete Eagar-Tsai Modell simuliert eine bewegte gaußsche Wärmequelle und wird numerisch gelöst

$$\theta = \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{v^2 t}{2\alpha}} \frac{\tau^{-\frac{1}{2}}}{\tau + u^2} \exp\left(-\frac{\xi^2 + \psi^2 + 2\xi\tau + \tau^2}{2\tau + 2u^2} - \frac{\zeta^2}{2\tau}\right) d\tau. \quad (20)$$

Hier stehen die Variablen  $\theta$  für die dimensionslose Temperatur,  $\xi$ ,  $\psi$  und  $\zeta$  stehen für die dimensionslose Längen in x,y und z. Die dimensionslose Zeit wird durch  $\tau$  gegeben und  $u$  stellt einen dimensionslosen Wärmequelle-Parameter.  $n$  gibt zuletzt einen Prozessparameter an der die Leistung, Geschwindigkeit und thermische Eigenschaften verbindet [54]. Das in [54] aufgestellte Modell ermöglicht die nun die qualitative Beschreibung der Schmelzbad-Größe durch zwei Parameter:

$$B = \frac{E_L}{\rho C T_m} = \frac{\text{Absorbierte Laserenergiedichte}}{\text{Schmelze-Enthalpie}} \quad (21)$$

$$p = \frac{t}{t_D} = \frac{\text{Laser-Verweil-Zeit}}{\text{Thermische Diffusionszeit}} \quad (22)$$

Diese beiden Parameter können zur Darstellung der Schmelzbad-Breite  $w$ , -Tiefe  $s$  und -Länge  $l$  verwendet werden, damit diese in algebraischen Formeln berechnet werden können:

$$\begin{aligned} w(B, p) = \frac{r}{\sqrt{Bp^3}} [ & 0.0021 - 0.047p + 0.34p^2 - 1.9p^3 - 0.33p^4 + B(0.00066 \\ & - 0.0070p - 0.00059p^2 + 2.8p^3 - 0.12p^4) + B^2(-0.00070 \\ & + 0.015p - 0.12p^2 + 0.59p^3 - 0.023p^4) + B^3(0.00001 \\ & - 0.00022p + 0.0020p^2 - 0.0085p^3 + 0.0014p^4) ], \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} s(B, p) = \frac{r}{\sqrt{p}} [ & 0.008 - 0.0048B - 0.047p - 0.099Bp \\ & + (0.32 + 0.015B)p \ln p + \ln B(0.0056 - 0.89p + 0.29 \ln p) ], \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} l(B, p) = \frac{r}{p^2} [ & 0.0053 - 0.21p + 1.3p^2 + (-0.11 - 0.17B)p^2 \ln p \\ & + B(-0.0062 + 3.23p + 0.75p^2) ] \end{aligned} \quad (25)$$

### 7.2.3 Einflussfaktoren beim Laserstrahl-Schmelzen

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Werkstoff</b>		
Härte	-	
Festigkeit	-	
Bruchdehnung	-	
Korngröße	-	
Erstarrungsverhalten	-	
Kompressionsmodul	-	
Dehngrenze	-	
Ermüdung	-	
Dichte	-	
Wärmekapazität	-	
Schmelzenthaplie	-	
Solidus-Temperatur	-	
Liquidus-Temperatur	-	
Siedetemperatur	-	
Viskosität	-	
Oberflächenspannung	-	
<b>Pulver-Herstellung</b>		
Prozessgas-Art	-	
Verfahren	-	
Abkühl-Geschwindigkeit	-	
<b>Pulvereigenschaften</b>		
Partikelgrößenverteilung	x	Siebung
Fließfähigkeit	-	
Feuchtigkeit	x	Trocknung
Chemische Zusammensetzung	-	
Feststoffdichte	-	
Morphologie	-	
Absorptionseigenschaften	-	
Reflexionseigenschaften	-	

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>Beschreibung</b>
Transmissionseigenschaften	-	
Schüttdichte	-	
Eff. Pulverbett-Dichte	-	
Wärmeleitfähigkeit	-	
<b>Lasert</b>		
Pulverbett-Einkopplung	-	
Beugungsmaßzahl	x	Justieren der Optik
Mode	-	
Strahlprofil	-	
Wellenlänge	-	
Leistung	x	Parameter-Einstellungen (Max. 400 Watt)
Kolimation	-	
Rayleighlänge	-	
Fokuslage	x	50-500 $\mu\text{m}$
Divergenz	-	
Faser-Apertur	-	
Positionsabhängige Einkopplung	-	
<b>Galvanometer-Scanner</b>		
Spiegel-Beschichtung	-	
Dynamik	-	
Kalibrierung	x	Scanner-Prüfung
Temperatur	-	
Feldentzerrung	x	Scanner-Prüfung
Teleskop-Steuerung	-	
<b>Prozessgas</b>		
Filterzustand	x	Filteraustausch
Sauerstoffanteil	x	Akzeptierter Maximalgehalt
Restgas-Zusammensetzung	-	
Chem. Zusammensetzung	-	

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>Beschreibung</b>
Temperatur	-	
Strömungsgeschwindigkeit	x	Pumpen- und Absaugungs-Einstellung
Strömungsqualität	-	
Druck	-	
<b>Bauplatzform</b>		
Größe	-	
Ebenheit	x	Vorbereitung, Schleifen
Oberflächenrauheit	x	Strahlen
Welligkeit	x	Zerspanen
Erstschicht-Anbindung	x	Mehrfachbelichtung mit Sichtkontrolle
<b>Bauraum-Heizung</b>		
Bauart (Strahlung, Plattform)	-	
Temperatur	x	Gewählte Einstellung
Eff. schichtabhängige Temperatur	-	
Thermische Historie	-	
<b>Beschichter-System</b>		
Bauart	-	
Lippen-Material	x	Silikon, Stahl, Carbon-Bürste
Geschwindigkeit	x	Gewählte Einstellung
Justierung	x	Sichtkontrolle nach Probebeschichtung
<b>Datenvorbereitung</b>		
Schichthöhe	x	Slicer-Einstellung und Präzisionsvorgaben
Stützstruktur	x	Design, Typ und Stärke
STL-Auflösung	x	CAD-STL Konvertierung
STL-Fehler	x	Automatische oder manuelle Korrektur

<b>Einflussfaktor</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>Beschreibung</b>
Bauteil-Orientierung	x	Baujob-Vorbereitung
Trajektorien-Berechnung	x	Software-Einstellung
Bauteil-Größe	x	-
Bauteil-Masse	x	-
Bauteil-Abstand	x	Spritzerbildung und Wärmeleitung
Überhang-Winkel	x	
<b>Scan-Strategie</b>		
Spurabstand	x	
Geschwindigkeit	x	
Belichtungs-Muster	x	
Drehwinkel	x	
Konturbelichtung	x	
Bereichs-Einteilung	x	
Überhangparameter	x	
Laserpolier-Einstellungen	x	
<b>Nachbehandlung</b>		
Reinigung	x	
Oberflächenbearbeitung	x	
Thermische Nachbehandlung	x	
Vereinzelung	x	
<b>Prozessphänomene</b>		
Spritzerbildung	-	
Gasfackelgröße	-	
Bauteilrauheit	-	

Tabelle 4: Einflussfaktoren beim Laserstrahl-Schmelzen und deren Kontrollierbarkeit auf dem verwendeten Anlagentyp M2, Hersteller Concept Laser GmbH.

## 7.2.4 Koaxiale Detektion: Grenzflächen und Einflüsse

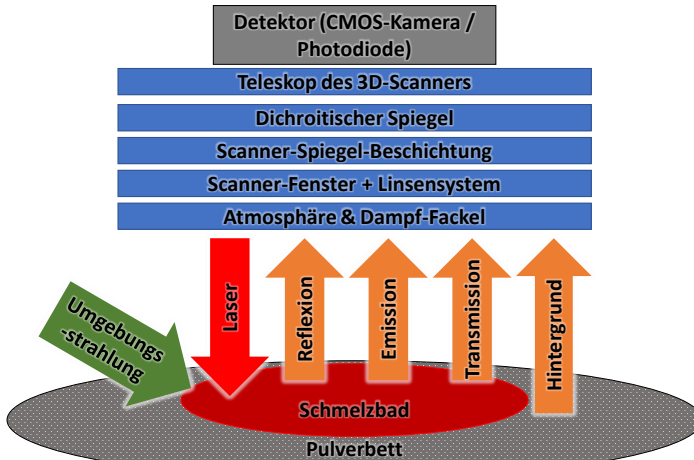


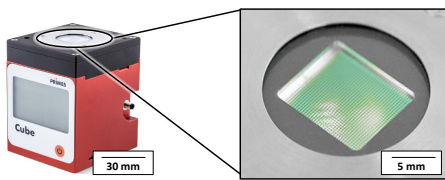
Bild 109: Bei der koaxialen Prozessüberwachung passiert die detektierte Strahlung die dargestellten Grenzflächen und setzt sich aus den gezeigten Strahlungsanteilen zusammen.

## 7.3 Messmittel und Geräte

### 7.3.1 Pulvercharakterisierung

Tabelle 5 zeigt etablierte Verfahren zur Pulvercharakterisierung in der Additiven Fertigung und hebt die verwendeten mittel \* hervor.

### 7.3.2 Laserleistungs-Messgerät



Leistungsbereich	25-1000 Watt
Wellenlängenbereich	1030-1090 nm
Maximaler Einfallswinkel	$\pm 20^\circ$
Messgenauigkeit	$\pm 3\%$ bis $10^\circ$ Einfallswinkel
Wiederholgenauigkeit	$\pm 1\%$

Bild 110: a) Leistungsmessgerät zur Prüfung der Laserleistung in Prozesskammern von LSS-Anlagen. b) Eigenschaften Messgerät [142].

<b>Merkmal</b>	<b>Messverfahren</b>	<b>Quellen</b>
Feststoffdichte	Pyknometrie (flüssig: DIN EN 933-2, Gas: DIN 66137-2*) & Röntgen-CT, He-Pyknometrie	[189]
Partikelgrößen-Verteilung	Statische & dynamische Bildanalyse*, Laserbeugung	[190]
Sphärizität	Statische & dynamische Bildanalyse*	[190]
Schüttdichte	Carney-Trichterverfahren* (DIN ISO 3923 & DIN EN ISO 4490), Dichtebestimmung im Bauprozess	[191]
Feuchtigkeit	Karl-Fischer-Titration & -Coloumetrie*, Thermogravimetrie, Elektrostratisch	[189, 192]
Fließfähigkeit	Bildanalyse*, Hall-Trichter-Verfahren (DIN ISO 4490), Scherzelle	[189, 193, 194, 195, 196]
Morphologie	REM*, Lichtmikroskop	[189]
Chemische Zusammensetzung	ICP-OES*, EDX*, Funkenspektrometer*, Verbrennungsanalyse*	[189]

Tabelle 5: Verwendete Pulvercharakterisierungsmethoden sind mit \* markiert.

### 7.3.3 Laserspot-Monitor

<b>Kategorie</b>	<b>Spezifikation</b>
Wellenlängenbereich	300 - 1100 nm
Pixelgröße / Anzahl	5,3 $\mu\text{m}$ / 1,3 Megapixel
Datenausgabe	10 bit
Messabweichung	< 3 %
Minimaler Fokusbereich	60 $\mu\text{m}$
Abmessungen (BxHxT)	98 x 98 x 65 [mm]

Tabelle 6: Eigenschaften des Laserspot Monitors Focus Beam Profiler der Fa. Cinogy GmbH [140].

### 7.3.4 Handgerät zur Feuchtigkeitsmessung

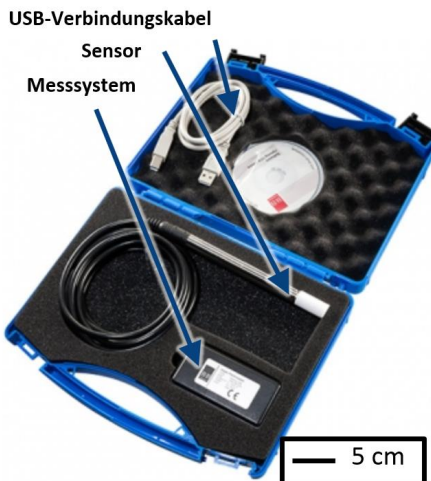


Bild 111: Hytelog Feuchtigkeits-Messgerät, Fa. B+B Thermo-Technik GmbH, Typ: CON-HYTE-LOG-USB, 0 - 100 % relative Feuchtigkeit, Messgenauigkeit 2 %

### 7.3.5 Schmelzbad-Überwachung: CMOS-Kamera

Kategorie	Spezifikation
Hersteller	Mikrotron GmbH
Typ	Eosens CL1362
Sensormgröße	1280 x 1024 Pixel
Vollbild-Aufnahmefrequenz	500 Hz
Pixelgröße	14 $\mu\text{m}$
Verbindung	Camera Link
Datenformat	8 / 10 bit
Farbe	Monochrom
Bajonett	C
Bild-Vorverarbeitung	möglich
Spektrale Antwort	400 - 720 nm
Shutter	Elektronischer freeze shutter
Pixel-Sättigungsverhältnis	30000 $e^-$
Spannungsversorgung	8-24 V
Leistungsaufnahme	5 W

Kategorie	Spezifikation
Gehäusetemperatur	5 - 50° C
Abmessungen (BxHxT)	63 x 63 x 47 mm
Gewicht	300 g

Tabelle 7: Eigenschaften der CMOS Kamera CL1362 (Datenblatt [149]) der Fa. Mikrotron GmbH die in der verwendeten Laserstrahl-Schmelz-Serienanlage M2 der Concept Laser GmbH mit einem reduzierten Bildfeld von 100 x 100 px verwendet wird.

## 7.4 Parameter

Zur besseren Lesbarkeit werden die verwendeten Parametersätze hier im Anhang geschlossen aufgelistet.

### 7.4.1 Signalverhalten beim Aufbau dünner Wände

Material	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$
1.4404	180-340	700	140
1.4404	40 - 180	450 - 900	50 -150
1.4404	120 - 340	450 - 900	50 - 150
1.4542	180	600	120
AlSi10Mg	30 -380	180 - 800	50 -140

Tabelle 8: Verwendete Materialien und Parameter für Wandversuche.

### 7.4.2 Fraktionierte AlSi10Mg Pulver

Parameter	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$	Flächen- Energie- Variation in %
A	350	1400	143	25,7
B	350	1400	190	-5,4
C	350	1400	238	-24,5
D	370	1400	143	32,9

Parameter	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$	Flächen-Energie-Variation in %
E	370	1400	190	0
F	370	1400	237	-20,2
G	390	1400	143	40,0
H	390	1400	143	5,4
I	390	1400	238	-15,9

Tabelle 9: Parameter zur Pulverfraktionierung

### 7.4.3 Umgebungsvariation der Interaktionszone

Block-Nummer	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$	Volumen-Energie-Dichte in $\text{J}/\text{mm}^2$
1	150	0.05	300	$2,55 \cdot 10^{-4}$
2	50	0.05	300	$8,49 \cdot 10^{-5}$
3	250	0.05	300	$4,24 \cdot 10^{-4}$
4	350	0.05	300	$5,94 \cdot 10^{-4}$
5	150	0.1	300	$6,37 \cdot 10^{-5}$
6	225	0.15	300	$4,24 \cdot 10^{-5}$
7	300	0.2	300	$3,18 \cdot 10^{-5}$
8	300	0.05	900	$1,70 \cdot 10^{-4}$
9	380	0.05	1500	$1,29 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 10: Verwendete Parameter des Stufenexperiments 4.2.2 mit berechneter Volumenenergiedichte (VED). Die Auswertung der Schlißbilder ist auf Abb. 121 im Anhang dargestellt.

### 7.4.4 Parameterfenster der Volumenkörper

Material	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$	$E_{Vol}$ in $\text{J}/\text{cm}^3$
1.4542	150 - 220	700 - 1300	50 - 145	64,2 - 94,1
1.4057	120 - 280	500 - 1100	50 - 150	22,4 - 354,5

Material	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$	$E_{Vol}$ in $\text{J}/\text{cm}^3$
AlSi10Mg	30 - 380	180 - 800	50 - 140	80,4 - 87,1
1.2709	200 - 370	700 - 900	50 - 135	77,1 - 85,6

Tabelle 11: Parameter-Fenster der Untersuchungen zu Volumenkörpern.

### 7.4.5 Überhang-Optimierung

Block- Nummer	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$	Volumen-Energie- Dichte in $\text{J}/\text{mm}^2$
1	150	300	0.05	$2,55 \cdot 10^{-4}$
2	50	300	0.05	$8,49 \cdot 10^{-5}$
3	250	300	0.05	$4,24 \cdot 10^{-4}$
4	350	300	0.05	$5,94 \cdot 10^{-4}$
5	150	300	0.1	$6,37 \cdot 10^{-5}$
6	225	300	0.15	$4,24 \cdot 10^{-5}$
7	300	300	0.2	$3,18 \cdot 10^{-5}$
8	300	900	0.05	$1,70 \cdot 10^{-4}$
9	380	1500	0.05	$1,29 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 12: Verwendete Parameter zur Überhang-Optimierung

### 7.4.6 Zerspante raue Oberflächen

Belichtung	Platte(n)	P in W	v in mm/s	s in $\mu\text{m}$
<b>Schichthöhe in <math>\mu\text{m}</math></b>				
Spur 1 & 2	2-10	120	300	50
Spur 3	2-10	350	300	50
<b>Rauheit</b>				
Spur 1	2-10	150	300	100
Spur 2	2-10	150	300	50

<b>Belichtung</b>	<b>Platte(n)</b>	<b>P in W</b>	<b>v in mm/s</b>	<b>s in <math>\mu\text{m}</math></b>
Spur 3	2-10	120	300	100
Spur 4	2-10	120	300	50
Spur 5	2-10	120	300	70
Streifen 1	2-10	120	300	50
Streifen 2	2-10	200	300	50
Streifen 2	2-10	100	200	50
Streifen 2	2-10	150	150	50

Tabelle 13: Verwendete Parameter zu Untersuchung des Schichthöheneinflusses und der Oberflächenrauheit.

#### 7.4.7 Vorversuche der Oberflächen-Evaluierung

<b>Würfel</b>	<b>2A</b>	<b>3A</b>	<b>21B</b>	<b>24B</b>	<b>43C</b>	<b>45C</b>
<b>v in mm/s</b>	550	687	1375	1100	1100	1100
<b>P in W</b>	200	200	200	100	250	300

Tabelle 14: Verwendete Parameter für Vorversuche zur Oberflächenevaluierung. Der Laserspot-Durchmesser  $s=135 \mu\text{m}$  und der Spuraabstand  $d_h = 85 \mu\text{m}$  wurden konstant gehalten.

#### 7.4.8 Volumenkörper und Spritzer Detektion

<b>Scan-Modul</b>	<b>P in W</b>	<b>v in mm/s</b>	<b>s in <math>\mu\text{m}</math></b>	<b><math>d_h</math> in mm</b>
<b>Fläche</b>	180	700	140	115
<b>Kontur 1</b>	150	300	50	-
<b>Kontur 2</b>	150	1500	50	-

Tabelle 15: Verwendete Parameter für den Versuch zum Positionseinfluss.

## 7.5 Zusatzmaterial

### 7.5.1 Testteil-Geometrien

Um orientierungsabhängig die Maßhaltigkeit und Minimalabstände prüfen zu können, wird ein Bauteil mit 1 mm Wandstärke konzipiert. Die Wände sind in zwei Richtungen und als konzentrische Kreise sowie im Winkel zur Bauplattform-Ebene angeordnet. Der minimale Abstand beträgt 50, der maximale 300  $\mu\text{m}$ . Das zweite hier gezeigte Testteil wird zur Optimierung der Überhangstrukturen herangezogen und verfügt über Kanäle die senkrecht, parallel und im 45 Grad Winkel zur Bauplattform orientiert sind. Die Durchmesser der zylindrischen Aussparungen reichen von 0.5 bis 9 mm. Dadurch Prozess-Parameter für Überhänge optimiert werden. Weil die Prozess-Parameter einen schichtweise und geometrieabhängigen Energieeintrag verwenden und dieser durch die Auslenkung der Galvanometer-Scanner beeinflusst wird, ist der Aufbau der Testteile an verschiedenen Positionen auf der Bauplattform und folgende Analysemittel notwendig: 1) Schmelzbad-Überwachung zur Detektion von Anomalien, 2) 3D-Scan für den Flächenvergleich mit dem CAD-Modell, vor und nach dem Abtrennen von der Bauplattform zur Verzugsermittlung in Abhängigkeit der verwendeten Stützstrukturen oder angewandter thermischer Verfahren, 3) Oberflächenrauheit an aufgeschnittenen und nach unten weisenden Flächen zur Evaluierung des Einflusses von Pulverchargen und der Position relativ zur Prozessgasströmung, sowie der Eignung der verwendeten Parameter, 4) Schlibfbilder für die Analyse der Rand- und Überlapp-Bereiche der Scanparameter, sowie der Analyse der relativen Dichte, 5) Härtemessung zur Untersuchung von Materialschwankungen.

### 7.5.2 Bauplattform mit Kanalbauteilen

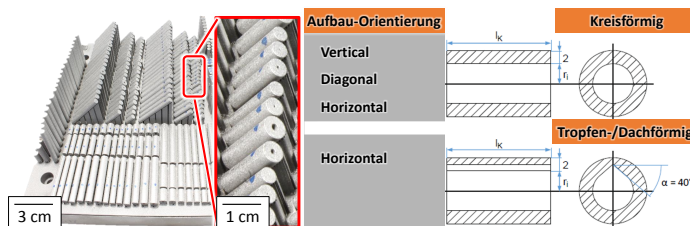


Bild 112: Kanaltestkörper in verschiedenen Orientierungen, Längen und Querschnittsgeometrien dienen zur Entwicklung von Methoden zur Reinigung und Qualifizierung von Überhängen mittels Schmelzbad-Überwachung, sowie der Parameteroptimierung.

### 7.5.3 Koaxial sichtbare Spritzerentstehung

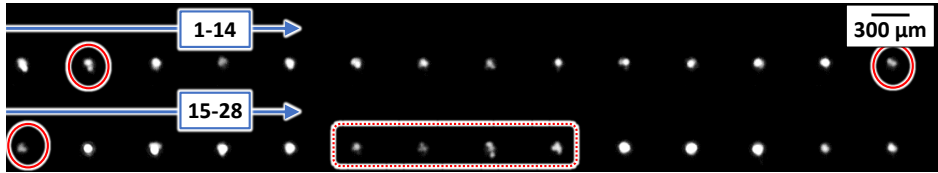


Bild 113: Durch die Analyse der Kamera-Rohbilder ist die Entstehung von Spritzern erkennbar (rote Markierungen). Die blauen Pfeile geben die zeitliche Folge der Bildserie über die zwei Zeilen wieder.

### 7.5.4 Daten-Analyse-Protokoll

**Baujob Protokolle – GUI**

Baujob-Ordner:  Bauteil-Auswahl:

Protokoll-Speicherort:

**Daten-Rückverfolgung**

- Magics-Projekt (Projektname.magics)
- Simulationsdaten (Projektname.amb)
- Zeitschätzung (zeit.txt)
- Partikelgrößenverteilung (Projektname.sld)
- Anlagenprotokoll (prot.txt)
- Sauerstoffgehalt (Atmosphäre.csv)
- QM-Coating-Kamera (Bildstapel.txt)
- Pulver-Fließfähigkeit (Projektname.sld)
- Schmelzbad-Überwachung: Kamera (Bildstapel.tif)
- Schmelzbad-Überwachung: Photodiode (Bildstapel.tif)
- Schmelzbad-Überwachung: TOMs Daten
- Schmelzbad-Schichtmittelwerte (Meltpool.csv)

**Allgemeine Informationen**

Name	Xxx
Kunde	Xxx
Material	Xxx
Anlage	Xxx

**Baujob-Foto**

**Visualisierungen**

**Sauerstoffgehalt**

$X_{s,10}$	$X_{s,50}$	$X_{s,90}$	SPHT	Feuchte
14.4	37.2	44.6	0.83	10

Standard-Pulver

**Partikelgrößenverteilung**

**Fließfähigkeit**

**QM-Coating-Schicht-Dropdown-Menü**

Vorher:

Nachher:

**Schmelzbad-Überwachung: Montage**

Bild 114: Entwurf für ein Protokoll Interface zur übersichtlichen Darstellung einer Baujob-Daten-Sammlung für die Qualitätssicherung.

## 7.6 Ergebnisse

### 7.6.1 Pulvercharakterisierung

Lieferant / Name	CL / CL 20ES	Carp. / MicroMelt	CL / CL 92	CL / CL 50WS	CL / CL 31AL
	1.4404 /	1.4057 /	1.4542 /	1.2709 /	
DIN / EN	X2CrNiMo17-12-2	X17CrNi16-2	X5CrNiCuNb 16-4	X3NiCoMoTi18-9-5	3.2382 / AISi10Mg
<b>Chemische Zusammensetzung (ICP-OES, Verbrennungsanalyse): Minimum / IST / Maximum [%]</b>					
Al	-	-	-	-	Rest
C	0 / 0,015 / 0,030	0,12 / 0,160 / 0,22	0 / 0,015 / 0,07	0 / 0,009 / 0,03	0 / 0,007 / 0,10
Co	-	-	-	8,50 / 9,4 / 10,0	-
Cr	16,5 / 17,8 / 18,5	15/ 16,1 / 17	15,0 / 16,6 / 17,0	0 / 0,03/ 0,25	-
Cu	-	-	3,0 / 4,2 / 5,0	-	0 / 0,002 / 0,10
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	0 / 0,068 / 0,55
Mg	-	-	-	-	0,20 / 0,28 / 0,45
Mn	0 / 0,99 / 2,0	0 / 0,6 / 1,5	0 / 0,2 / 1,50	0 / 0,02 / 0,15	0 / 0,002 / 0,45
Mo	2,0 / 2,3 / 2,5	-	0 / 0,02 / 0,60	4,50 / 5,1 / 5,20	-
Nb	-	-	0,15 / 0,23 / 0,45	-	-
Ni	10,0 / 12,4 / 13,0	1,5 / 2,0 / 2,5	3,0 / 4,12 / 5,0	17,0 / 17,8 / 19,0	0 / 0,001 / 0,05
P	0 / < 0,02/ 0,045	0 / < 0,002 / 0,04	0 / < 0,02 / 0,40	0 / 0,003 / 0,010	-
Pb	-	-	-	-	0 / 0,011 / 0,05
S	0 / 0,005 / 0,030	- / 0,006 / < 0,03	- / 0,005 / 0,015	0 / 0,002 / 0,010	-
Si	0 / 0,65 / 1,0	-	0 / 0,38 / 0,70	0 / 0,01 / 0,10	9,0 / 10,01 / 11,0
Sn	-	-	-	-	0 / < 0,005 / 0,05
Ti	-	-	-	0,80 / 0,90 / 1,20	0 / 0,006 / 0,15
V	-	-	-	-	-
Zn	-	-	-	-	0 / 0,006 / 0,10
<b>Feuchtigkeit (Karl Fischer Coulometrie)</b>					
H2O [%]	0,001 n=1	0,002 n=1	0,001 n=1	0,004 n=1	0,012 (±3) n=16
<b>Pulverschüttdichte (Hall Flowmeter)</b>					
Schüttdichte [g/cm³]		4,32 (±1) (n=3)	3,77 (±1) (n=3)		
<b>Partikelgrößenverteilung (Dynamische Bildanalyse, Camsizer X2) [µm]</b>					
D3,10	17,9	16,9	18,4	16,6	9,6
D3,50	27,2	28,8	27,8	27,9	22,2
D3,90	40,9	42,9	41,9	42,6	38,3
SPHT0		0,870	0,824		0,797
SPHT3		0,829	0,793		0,884
<b>Statische Fließfähigkeit (Trichter-Verfahren, Carney Flowmeter)</b>					
Carney [s]		18,79 (±2) (n=3)	26,75 (±24) (n=3)		
<b>Dynamische Fließfähigkeit (Dynamischer Lawinenwinkel, Revolution Powder Analyzer)</b>					
Zeit [s]	4 (±1) n=8	1,3 (±6) n=1	3 (±1) n=3		4,8 (± 9) n=8
Energie [kJ/kg]	17 (±3) n=8	11 (±7) n=1	10 (±6) n=3		19 (±4) n=8
Winkel [deg]	44 (±3) n=8	41 (±6) n=1	39 (±2) n=3		46 (±2) n=8
<b>He-Pyknometrie</b>					
Dichte [g/cm³]	7,9209 (±11) n=5	7,7352 (±18) n=5	7,6142 (±9) n=5	7,9983 (±8) n=5	2,6477 (±6) n=5

Bild 115: Ergebnisse der Pulveranalyse: CL: Concept Laser GmbH; ES: Edelstahl; WS: Werkzeugstahl; AL: Aluminium

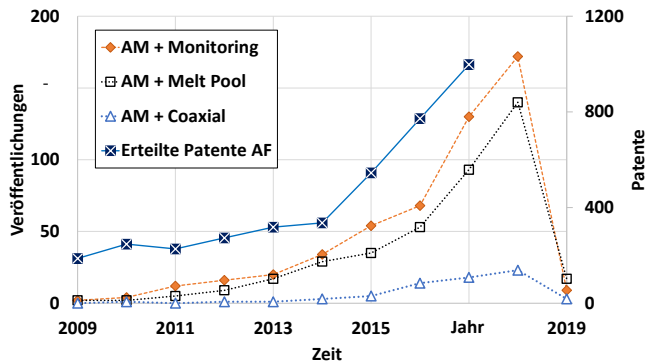


Bild 116: Scopus-Schlüsselwort-Suche der Begriffe *Monitoring*, *Melt Pool* und *Coaxial* zusammen mit dem Begriff *Additive Manufacturing (AM)* in den Titeln, den Schlüsselworten und den Abstracts begutachteter Publikationen neben erteilten Patenten in der AF.

### 7.6.2 Schlüsselwortsuche zur Prozessüberwachung

### 7.6.3 Beobachtungen zur Oberflächenrauheit

Bild 117 zeigt den Einfluss der Pulvermaterialien, der zu einer Verdoppelung des arithmetischen Mittenrauheitswertes führt der hier mittels konfokal-Mikroskopie vermessen wurde [S5]. Bei Bild 117 b) links ist eine Erhöhung der Kanten erkennbar [34]. Auf Bild 118 werden 10 Schichten hohe Testflä-

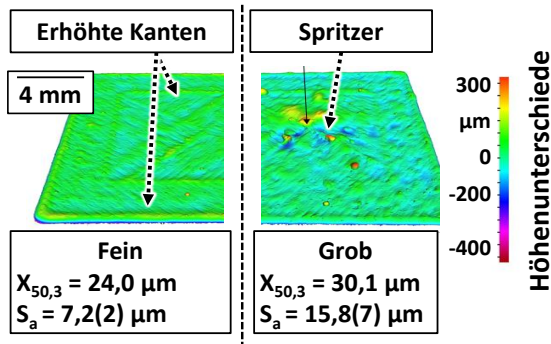


Bild 117: Erhöhte Kanten durch unausgereifte Konturparameter (links) und Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung wirken sich auf die Oberflächenrauheit aus [S5].

chen gezeigt, deren darunterliegende Stützstrukturen variiert wurden [S13]. Beschichter-Beschädigungen treten bereits während des Aufbaus oder kurz nach den Stützstrukturen auf, weil dort Zwischenräume überbrückt werden müssen (Bild 118).

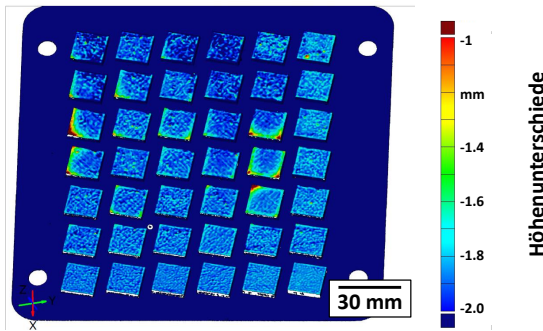


Bild 118: 3D-Scan einer Bauplattform mit Testkörpern mit Übergangsbereich in den Schichten nach dem Aufbau von Stützstrukturen [S13].

### 7.6.4 Positionsabhängige Laserleistungsmessung

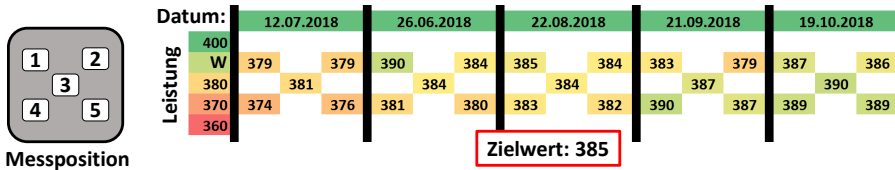


Bild 119: Ergebnisse der positionsabhängigen Laserleistungsmessung

### 7.6.5 Einzelspurversuche mit AlSi10Mg

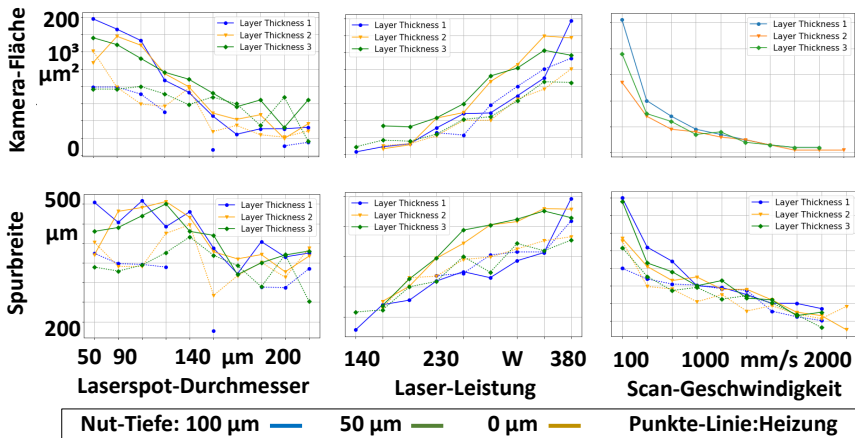


Bild 120: Messungen zu Schlibbildern bei Einzelspurversuchen des Werkstoff AlSi10Mg. Konstante Parameter:  $P=180$  W,  $V=500$  mm/s,  $s=70$  µm.

### 7.6.6 Einzelspuren auf 1.4404 Testkörpern

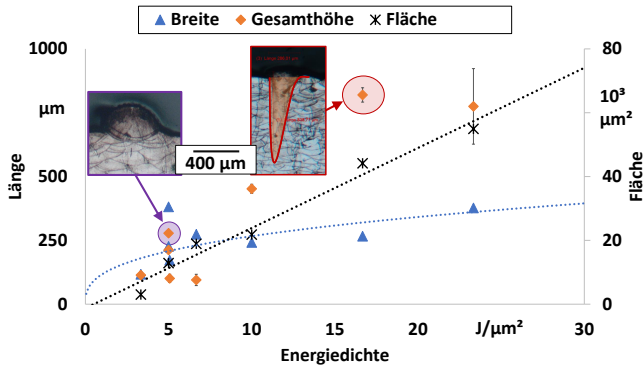


Bild 121: Ergebnisse zu Einzelspuren auf Testkörper: Die Querschnittsfläche der Schmelzspur wächst linear mit der modifizierten Energiedichte  $E = P/(v \cdot s)$ , welche den variierten Laserspot-Durchmesser enthält. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 10 gelistet.

### 7.6.7 EDX-Vergleich von 1.4404 Oberflächen

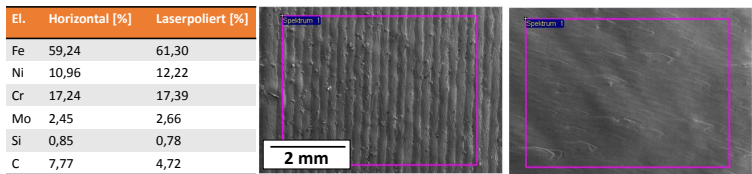


Bild 122: Horizontale Oberfläche eines mittels LSS aufgebauten Testkörpers und laserpolierte horizontale Oberfläche von Testkörpern des Edelstahl 1.4404 mit mittels REM-EDX gemessener Massenverteilung. Durch das polieren wird die chemische Zusammensetzung nicht beeinflusst.

### 7.6.8 Einzelspurversuche mit dem Edelstahl 1.4057

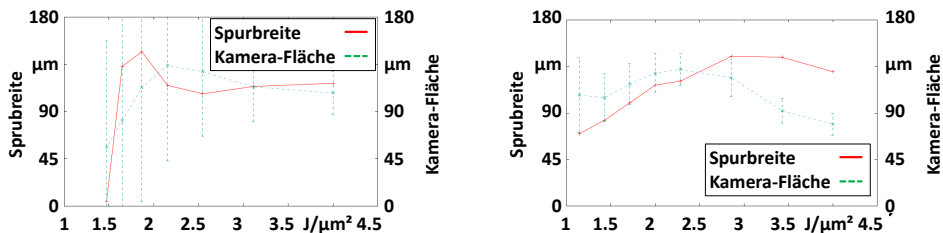


Bild 123: Ergebnisse zu Einzelspuren aus dem Material 1.4057: a) Laserspot-Durchmesser-Variation; b) Laser-Leistungs-Variation. Feste Parameter:  $P=140$  (Variation: 70-290) W,  $v=500$  mm/s,  $s=70$  (Variation: 50-190)  $\mu\text{m}$ .

### 7.6.9 Einfluss der Pulverwerkstoffe

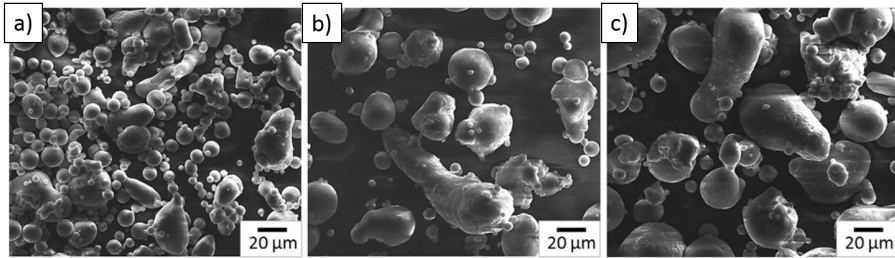


Bild 124: REM-Aufnahmen von 3 präparierten und verarbeiteten Partikelgrößenverteilungen: a) Feine Fraktion, b) Ausgangspulver, c) Grobe Fraktion [S5]

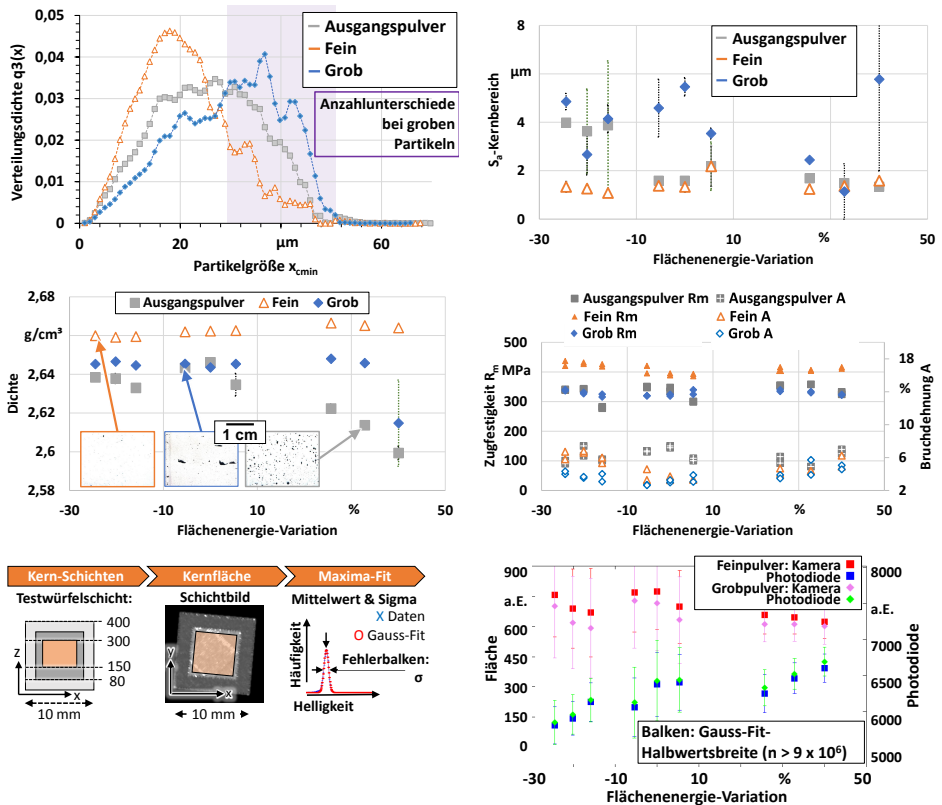


Bild 125: Unterschiede in der Verteilungsdichte  $q_3(x)$  bei großen Partikeln (a) beeinflussen den Arithmetischer Mittenrauwert  $S_q$  (b) der obersten Schicht negativ und wirken sich negativ auf die Dichte (c) und die Zugfestigkeit aus (d). Die Position und Breite (Fehlerbalken) der Verteilung der Schmelzbad-Daten zeigt im Mittel ein 8 % niedrigeres Kamera-Signal, aber kaum veränderte Photodioden-Werte (f).

### 7.6.10 Härtemessung beim Werkzeugstahl 1.2709

Drei Proben des Versuchs mit variierender Prozessgas-Strömung wurden einer Vickers-Härteprüfung unterzogen. Dabei wurden je Probe 12 Messungen mit Prüfkraft 1 kp durchgeführt. Es ist keine Abhängigkeit der Härte von der Prozessgasströmung erkennbar.

Prozessgas-Strömung [%]	Mittelwert [HV <sub>1</sub> ]	Standardabweichung
79	385	9
88	384	8
97	386	11

Tabelle 16: Härtemessung zu 1.2709 Proben unterschiedlicher Prozessgasströmung

### 7.6.11 Positionsabhängige Dichte beim Werkzeugstahl 1.2709

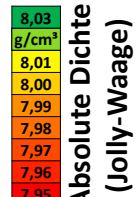
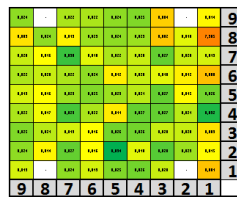
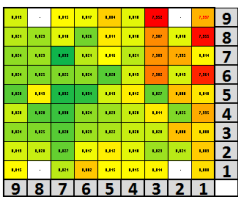
Prozessgas-Strömung:

A: 79 %

B: 88 %

C: 97 %

Systematischer Fehler



Position auf Bauplattform 220 x 220 mm: X (1-9) und Y (1-9)

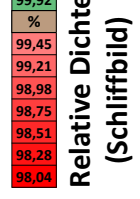
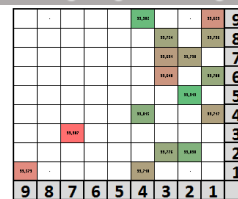
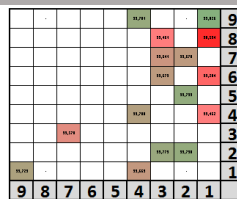
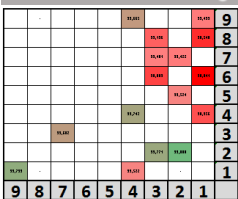


Bild 126: Dichteuntersuchungen zum Werkzeugstahl 1.2709 unter Prozessgasvariation. Die Archimedes Messung bei 97 % Strömung unterlag einem nicht untersuchten systematischen Fehler weshalb alle Proben eine niedrigere absolute Dichte aufweisen.



## 7.7 Auszug geförderter Projekte zur Prozessüberwachung

Projektname	Förderträger, Einrichtungen und Unternehmen	Laufzeit
Indipro [197]	BMBF, Robert Bosch GmbH, Citim GmbH, InfraTec GmbH, ISEMP, MTU Aero Engines AG, Plasmo Industrietechnik GmbH	2018-2020
AM4Industry [198]	Mechatronik Cluster eco plus Niederösterreich, fir RWTH Aachen University, FOTEC Forschungsunternehmen Wiener Neustadt, Fraunhofer IGCV, Johannes Kepler Universität, TU Austria, RHP-Technology GmbH, Sirris (Belgien)	2017-2019
Multisurv	Fraunhofer IGCV	-
futureAM	Fraunhofer IAPT, IFAM, IGD, ILT, IWS, IWU	2017-2020
Agent3D - QualiPro	BMBF, AM Metals, APWorks, Contact Software, TU Dresden, Fraunhofer (IWU, IWS, IPK, IFF) Trumpf GmbH & Co. KG, Siemens AG, Symate	2014-2022
ProSIM	DFG, TUM (IWB, AER)	2018 - 2020
SFB 814	DFG, FAU (LKT, FMT)	2011 - 2019
Hyper	DFG, FAU LPT	2017-2020
ReAddi	DMG Mori, DMRC, EDAG Engineering GmbH, Heraeus Noblelight GmbH, Indutherm GmbH, INTES GmbH, KIT, LPT, Mercedes-Benz AG, PROTIQ GmbH, QASS GmbH, Robert Bosch GmbH, Rosswag GmbH, Simufact GmbH, USU Software AG	2019 - 2023
ProMoAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	2019-n.a.

Tabelle 17: Beispiele öffentlich geförderter Projekte zur Prozessüberwachung beim Laserstrahl-Schmelzen.

# Literaturverzeichnis

- [1] SCHMIDT, M. ; MERKLEIN, M. ; BOURELL, D. ; DIMITROV, D. ; HAUSOTTE, T. ; WEGENER, K. ; OVERMEYER, L. ; VOLLERTSEN, F. ; LEVY, G. N.: Laser based additive manufacturing in industry and academia. In: *CIRP Annals* 66 (2017), Nr. 2, S. 561–583
- [2] RUFFO, M. ; TUCK, C. ; HAGUE, R.: Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 220 (2006), Nr. 9, S. 1417–1427
- [3] AGHASSI, S. ; BAUHOFF, F. ; BRECHER, C. ; FUCHS, S. ; JESCHKE, S. ; JOOSS, C. ; KOZIELSKI, S. ; ORILSKI, S. ; RICHERT, A. ; RODERBURG, A. u. a.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Springer, 2011, S. 17–81
- [4] v., V. D. I.: *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*
- [5] HUANG, Y. ; LEU, M.: Frontiers of additive manufacturing research and education. In: *University of Florida, Gainesville, FL* (2014)
- [6] LOTT, P. ; SCHLEIFENBAUM, H. ; MEINERS, W. ; WISSENBACH, K. ; HINKE, C. ; BÜLTMANN, J.: Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM). In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 683–690
- [7] SEEPERSAD, C. C. ; ALLISON, J. ; SHARPE, C. u. a.: The need for effective design guides in additive manufacturing. In: *DS 87-5 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 5: Design for X, Design to X, Vancouver, Canada, 21-25.08. 2017, 2017*, S. 309–316
- [8] ADAM, G. A.: *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*. Shaker, 2015
- [9] *Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) Accelerated Certification Program in Metal AM: Real-time Melt Pool Sensor of Concpet Laser GmbH / KU Leuven*. [www.manufacturing.llnl.gov/additive-manufacturing/accelerated-certification/real-time-melt-pool-sensor](http://www.manufacturing.llnl.gov/additive-manufacturing/accelerated-certification/real-time-melt-pool-sensor)
- [10] PROTOTYPING, A. R. ; RICHTLINIE, V.: 3405 Additive Fertigungsverfahren: Strahlschmelzen metallischer Bauteile Qualifizierung. In:

*Qualitätssicherung und Nachbearbeitung* (2013)

- [11] ZHAO, C. ; FEZZAA, K. ; CUNNINGHAM, R. W. ; WEN, H. ; DE CARLO, F. ; CHEN, L. ; ROLLETT, A. D. ; SUN, T.: Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction. In: *Scientific Reports* 7 (2017)
- [12] MARTIN, A. A. ; CALTA, N. P. ; KHAIRALLAH, S. A. ; WANG, J. ; DEPOND, P. J. ; FONG, A. Y. ; THAMPY, V. ; GUSS, G. M. ; KISS, A. M. ; STONE, K. H. u. a.: Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing. In: *Nature communications* 10 (2019), Nr. 1, S. 1–10
- [13] COECK, S. ; BISHT, M. ; PLAS, J. ; VERBIST, F.: Prediction of lack of fusion porosity in selective laser melting based on melt pool monitoring data. In: *Additive Manufacturing* (2018)
- [14] DEPOND, P. J. ; GUSS, G. ; LY, S. ; CALTA, N. P. ; DEANE, D. ; KHAIRALLAH, S. ; MATTHEWS, M. J.: In situ measurements of layer roughness during laser powder bed fusion additive manufacturing using low coherence scanning interferometry. In: *Materials & Design* (2018)
- [15] BARTLETT, J. L. ; HEIM, F. M. ; MURTY, Y. V. ; LI, X.: In situ defect detection in selective laser melting via full-field infrared thermography. In: *Additive Manufacturing* (2018)
- [16] WEBSTER, P. J. ; JOE, X. ; LEUNG, B. Y. ; WRIGHT, L. G. ; MORTIMER, K. D. ; FRASER, J. M.: Inline coherent imaging of laser micromachining. In: *Optomechatronic Technologies (ISOT), 2010 International Symposium on IEEE*, 2010, S. 1–4
- [17] GRATZKE, U. ; KAPADIA, P. ; DOWDEN, J. ; KROOS, J. ; SIMON, G.: Theoretical approach to the humping phenomenon in welding processes. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 25 (1992), Nr. 11, S. 1640
- [18] FRANCIS, Z. R.: *The Effects of Laser and Electron Beam Spot Size in Additive Manufacturing Processes*, Carnegie Mellon University, Diss., 2017
- [19] CRAEGHS, T. ; BECHMANN, F. ; BERUMEN, S. ; KRUTH, J.-P.: Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors. In: *Physics Procedia* 5 (2010), S. 505–514
- [20] CARTER, L. N. ; MARTIN, C. ; WITHERS, P. J. ; ATTALLAH, M. M.: The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. In: *Journal of Alloys and Compounds* 615 (2014), S. 338–347

- [21] SPEARS, T. G. ; GOLD, S. A.: In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. In: *Integrating Materials and Manufacturing Innovation* 5 (2016), Nr. 1, S. 2
- [22] TOLOCHKO, N. K. ; MOZZHAROV, S. E. ; YADROITSEV, I. A. ; LAOUI, T. ; FROYEN, L. ; TITOV, V. I. ; IGNATIEV, M. B.: Balling processes during selective laser treatment of powders. In: *Rapid Prototyping Journal* 10 (2004), Nr. 2, S. 78–87
- [23] ROMBOUTS, M. ; KRUTH, J.-P. ; FROYEN, L. ; MERCELIS, P.: Fundamentals of selective laser melting of alloyed steel powders. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 55 (2006), Nr. 1, S. 187–192
- [24] ZHOU, X. ; LIU, X. ; ZHANG, D. ; SHEN, Z. ; LIU, W.: Balling phenomena in selective laser melted tungsten. In: *Journal of Materials Processing Technology* 222 (2015), S. 33–42
- [25] LOW, D. ; LI, L. ; CORFE, A.: Characteristics of spatter formation under the effects of different laser parameters during laser drilling. In: *Journal of materials processing Technology* 118 (2001), Nr. 1-3, S. 179–186
- [26] LEE, D. ; CHO, J. ; KIM, C. H. ; LEE, S. H.: Application of laser spot cutting on spring contact probe for semiconductor package inspection. In: *Optics & Laser Technology* 97 (2017), S. 90–96
- [27] NORMAN, P. ; ENGSTRÖM, H. ; KAPLAN, A.: State-of-the-art monitoring and imaging of laser welding defects. In: *11th NOLAMP Conference in Laser Processing of Materials*, 2007, S. 20–22
- [28] KING, W. E. ; ANDERSON, A. T. ; FERENCZ, R. ; HODGE, N. ; KAMATH, C. ; KHAIRALLAH, S. A. ; RUBENCHIK, A. M.: Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. In: *Applied Physics Reviews* 2 (2015), Nr. 4, S. 041304
- [29] TSAI, M. ; KOU, S.: Marangoni convection in weld pools with a free surface. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 9 (1989), Nr. 12, S. 1503–1516
- [30] SZOST, B. ; WANG, X. ; JOHNS, D. ; SHARMA, S. ; CLARE, A. ; ASHCROFT, I. u. a.: Spatter and oxide formation in laser powder bed fusion of Inconel 718. In: *Additive Manufacturing* 24 (2018), S. 446–456
- [31] LY, S. ; RUBENCHIK, A. M. ; KHAIRALLAH, S. A. ; GUSS, G. ; MATTHEWS, M. J.: Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing. In: *Scientific Reports* 7 (2017)

- [32] SIMONELLI, M. ; TUCK, C. ; ABOULKHAIR, N. T. ; MASKERY, I. ; ASHCROFT, I. ; WILDMAN, R. D. ; HAGUE, R.: A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 46 (2015), Nr. 9, S. 3842–3851
- [33] LUTTER-GÜNTHER, M. ; HOFMANN, A. ; HAUCK, C. ; SEIDEL, C. ; REINHART, G.: Quantifying Powder Losses and Analyzing Powder Conditions in Order to Determine Material Efficiency in Laser Beam Melting. In: *Applied Mechanics & Materials* 856 (2017)
- [34] YASA, E. ; DECKERS, J. ; CRAEGHS, T. ; BADROSSAMAY, M. ; KRUTH, J.-P.: Investigation on occurrence of elevated edges in selective laser melting. In: *International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA*, 2009, S. 673–85
- [35] MATTHEWS, M. J. ; GUSS, G. ; KHAIRALLAH, S. A. ; RUBENCHIK, A. M. ; DEPOND, P. J. ; KING, W. E.: Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. In: *Acta Materialia* 114 (2016), S. 33–42
- [36] YADROITSEV, I. ; SMUROV, I.: Surface morphology in selective laser melting of metal powders. In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 264–270
- [37] GUNENTHIRAM, V. ; PEYRE, P. ; SCHNEIDER, M. ; DAL, M. ; COSTE, F. ; FABBRO, R.: Analysis of laser–melt pool–powder bed interaction during the selective laser melting of a stainless steel. In: *Journal of Laser Applications* 29 (2017), Nr. 2, S. 022303
- [38] NASSAR, A. R. ; GUNDERMANN, M. A. ; REUTZEL, E. W. ; GUERRIER, P. ; KRANE, M. H. ; WELDON, M. J.: Formation processes for large ejecta and interactions with melt pool formation in powder bed fusion additive manufacturing. In: *Scientific reports* 9 (2019), Nr. 1, S. 1–11
- [39] WENBIN, H. ; YONG TSUI, L. ; HAIQING, G.: A study of the staircase effect induced by material shrinkage in rapid prototyping. In: *Rapid Prototyping Journal* 11 (2005), Nr. 2, S. 82–89
- [40] FIEGL, T. ; FRANKE, M. ; KÖRNER, C.: Impact of build envelope on the properties of additive manufactured parts from AlSi10Mg. In: *Optics & Laser Technology* 111 (2019), S. 51–57
- [41] MOYLAN, S. ; SLOTWINSKI, J. ; COOKE, A. ; JURRENS, K. ; DONMEZ, M. A.: Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. In: *Proceedings of the 2012 annual international solid freeform fabrication symposium Austin, TX, 2012*,

S. 6–8

- [42] ZHU, H. ; LU, L. ; FUH, J.: Study on shrinkage behaviour of direct laser sintering metallic powder. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 220 (2006), Nr. 2, S. 183–190
- [43] KELLER, N.: Verzugsminimierung bei selektiven Laserschmelzverfahren durch Multi-Skalen-Simulation. (2017)
- [44] HAUSER, C.: *Selective Laser Sintering of a Stainless Steel Powder*, University of Leeds, Diss., 2003
- [45] MALEKIPOUR, E. ; EL-MOUNAYRI, H.: Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2017), S. 1–24
- [46] DIN, E.: 11146-1 DIN EN ISO 11146: Laser und Laseranlagen- Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen. In: *Berlin: Beuth* (2005)
- [47] SCHWEDE, H.: Das Strahlprofil von Hochleistungslasern–Genaue Messungen als Basis für die Lasercharakterisierung. In: *Laser Technik Journal* 4 (2007), Nr. 2, S. 48–51
- [48] ALEXEEV, I. ; WU, J. ; KARG, M. ; ZALEVSKY, Z. ; SCHMIDT, M.: Determination of laser beam focus position based on secondary speckles pattern analysis. In: *Applied Optics* 56 (2017), Nr. 26, S. 7413–7418
- [49] DEBROY, T. ; DAVID, S.: Physical processes in fusion welding. In: *Reviews of modern physics* 67 (1995), Nr. 1, S. 85
- [50] ARATA, Y. ; MIYAMOTO, I.: Laser welding. In: *Technocrat* 11 (1978), Nr. 5, S. 33–42
- [51] GÖTZ, J. ; IGLBERGER, K. ; STÜRMER, M. ; RÜDE, U.: Direct numerical simulation of particulate flows on 294912 processor cores. In: *Proceedings of the 2010 ACM/IEEE international conference for high performance computing, networking, storage and analysis* IEEE Computer Society, 2010, S. 1–11
- [52] BARTUSCHAT, D. ; RÜDE, U.: Parallel multiphysics simulations of charged particles in microfluidic flows. In: *Journal of Computational Science* 8 (2015), S. 1–19
- [53] PROTASOV, C. E. ; GUSAROV, A. V.: Modeling the effect of beam shaping at selective laser melting. In: *Procedia IUTAM* 23 (2017), S. 147–154

- [54] RUBENCHIK, A. M. ; KING, W. E. ; WU, S. S.: Scaling laws for the additive manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology* 257 (2018), S. 234–243
- [55] MANVATKAR, V. ; DE, A. ; DEBROY, T.: Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing. In: *Journal of Applied Physics* 116 (2014), Nr. 12, S. 124905
- [56] TOLOCHKO, N. K. ; KHLOPKOV, Y. V. ; MOZZHAROV, S. E. ; IGNATIEV, M. B. ; LAOUI, T. ; TITOV, V. I.: Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. In: *Rapid Prototyping Journal* 6 (2000), Nr. 3, S. 155–161
- [57] RUBENCHIK, A. ; WU, S. ; MITCHELL, S. ; GOLOSKER, I. ; LEBLANC, M. ; PETERSON, N.: Direct measurements of temperature-dependent laser absorptivity of metal powders. In: *Applied optics* 54 (2015), Nr. 24, S. 7230–7233
- [58] TRAPP, J. ; RUBENCHIK, A. M. ; GUSS, G. ; MATTHEWS, M. J.: In situ absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing. In: *Applied Materials Today* 9 (2017), S. 341–349
- [59] MARKL, M. ; KÖRNER, C.: Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing. In: *Annual Review of Materials Research* 46 (2016), S. 93–123
- [60] KHAIRALLAH, S. A. ; ANDERSON, A. T. ; RUBENCHIK, A. ; KING, W. E.: Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. In: *Acta Materialia* 108 (2016), S. 36–45
- [61] ANTHONY, T. ; CLINE, H.: Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying. In: *Journal of Applied Physics* 48 (1977), Nr. 9, S. 3888–3894
- [62] SCHÜSSLER, A. ; STEEN, P. ; EHRHARD, P.: Laser surface treatment dominated by buoyancy flows. In: *Journal of applied physics* 71 (1992), Nr. 4, S. 1972–1975
- [63] SEMAK, V. ; MATSUNAWA, A.: The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing. In: *Journal of physics D: Applied physics* 30 (1997), Nr. 18, S. 2541
- [64] KOU, S. ; LE, Y.: Three-dimensional heat flow and solidification during the autogenous GTA welding of aluminum plates. In: *Metallurgical Transactions A* 14 (1983), Nr. 11, S. 2245–2253

- [65] SCRIVEN, L. ; STERNLING, C.: The marangoni effects. In: *Nature* 187 (1960), Nr. 4733, S. 186
- [66] SZEKELY, J.: Advances in welding science and technology. In: *edited by SA David* 3 (1986)
- [67] FERRAR, B. ; MULLEN, L. ; JONES, E. ; STAMP, R. ; SUTCLIFFE, C.: Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. In: *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012), Nr. 2, S. 355–364
- [68] ROBERTS, I. A. ; WANG, C. ; ESTERLEIN, R. ; STANFORD, M. ; MYNORS, D.: A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49 (2009), Nr. 12-13, S. 916–923
- [69] KI, H. ; MAZUMDER, J. ; MOHANTY, P. S.: Modeling of laser keyhole welding: Part II. Simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 33 (2002), Nr. 6, S. 1831–1842
- [70] HOOPER, P. A.: Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. In: *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 548–559
- [71] SALEH, B. E. ; TEICH, M. C.: *Grundlagen der Photonik*. John Wiley & Sons, 2008
- [72] HERWIG, H. ; MOSCHALLSKI, A.: *Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen, illustrierende Beispiele, Übungsaufgaben mit Musterlösungen; mit 37 Tabellen*. Springer Science & Business Media, 2006
- [73] CAGRAN, C.: *Untersuchungen des Emissionsverhaltens flüssiger Metalle mittels Photopolarimetrie und mehrwellenlängen Pyrometrie*. Universität Graz, 2004
- [74] LACROIX, D. ; JEANDEL, G. ; BOUDOT, C.: Spectroscopic characterization of laser-induced plasma created during welding with a pulsed Nd:YAG laser. In: *Journal of Applied Physics* 81 (1997), Nr. 10, S. 6599–6606
- [75] BIAN, L. ; SHAMSAEI, N. ; USHER, J.: *Laser-based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. CRC Press, 2017
- [76] GRASSO, M. ; COLOSIMO, B. M.: Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. In: *Measurement Science and Technology* 28 (2017), Nr. 4, S. 044005

- [77] COLOSIMO, B. M.: In-situ monitoring of additive manufacturing: opportunities and challenges, 2019. – 32nd International SAOT Workshop: Additive Manufacturing - Experimental process development
- [78] DUDECK, S. G.: *Kamerabasierte In-situ-Überwachung gepulster Laserschweißprozesse*. KIT Scientific Publishing, 2013
- [79] KRAUSS, H. ; ZAEH, M.: Investigations on manufacturability and process reliability of selective laser melting. In: *Physics Procedia* 41 (2013), S. 815–822
- [80] THOMBANSEN, U. ; GATEJ, A. ; PEREIRA, M.: Process observation in fiber laser-based selective laser melting. In: *Optical Engineering* 54 (2014), Nr. 1, S. 011008
- [81] FURUMOTO, T. ; ALKAHARI, M. R. ; UEDA, T. ; AZIZ, M. S. A. ; HOSOKAWA, A.: Monitoring of laser consolidation process of metal powder with high speed video camera. In: *Physics Procedia* 39 (2012), S. 760–766
- [82] *Datenblatt: Scanlab intelliSCANde 30*. [www.scanlab.de/de/produkte/scan-systeme/intelliscan/intelliscande-30](http://www.scanlab.de/de/produkte/scan-systeme/intelliscan/intelliscande-30)
- [83] *Datenblatt: YLR-1070 Series Ytterbium Rack-mount Fiber Lasers*. <https://www.ipgphotonics.com/de/products/lasers/mid-power-cw-fiber-lasers/1-micron/ylm-and-ylr>
- [84] *M2 Cusing (3.Gen) Anleitung*. Dezember 2016
- [85] *SLM500 hl SLM Solutions Group Datenblatt*. [www.slm-solutions.com/file/101en171016-01-004-slm500webpdf](http://www.slm-solutions.com/file/101en171016-01-004-slm500webpdf)
- [86] SMITH, D. C.: High-power laser propagation: thermal blooming. In: *Proceedings of the IEEE* 65 (1977), Nr. 12, S. 1679–1714
- [87] *Datenblatt Slm280 2.0*. [www.slm-solutions.de/file/120de171015-01-002-slm280-2owebpdf](http://www.slm-solutions.de/file/120de171015-01-002-slm280-2owebpdf)
- [88] BAMBERG, J. ; ZENZINGER, G. ; LADEWIG, A.: In-process control of selective laser melting by quantitative optical tomography. In: *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2016
- [89] ÖZEL, T. ; SHAURYA, A. ; ALTAY, A. ; YANG, L.: Process monitoring of melt pool and spatter for temporal-spatial modeling of laser powder bed fusion process. In: *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 102–106
- [90] ISLAM, M. ; PURTONEN, T. ; PIILI, H. ; SALMINEN, A. ; NYRHILÄ, O.: Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel. In: *Physics Procedia* 41 (2013), S. 835–842

- [91] CHENG, B. ; LYDON, J. ; COOPER, K. ; COLE, V. ; NORTHROP, P. ; CHOU, K.: Infrared thermal imaging for melt pool analysis in SLM: a feasibility investigation. In: *Virtual and Physical Prototyping* 13 (2018), Nr. 1, S. 8–13
- [92] KLESZCZYNSKI, S. ; JACOBSMÜHLEN, J. zur ; SEHRT, J. T. ; WITT, G.: Mechanical properties of laser beam melting components depending on various process errors. In: *Digital product and process development systems*. Springer, 2013, S. 153–166
- [93] KLESZCZYNSKI, D.-I. S. ; JACOBSMÜHLEN, D.-I. J. ; SEHRT, J. T. ; WITT, G.: Einfluss von Prozessfehlern auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften strahlgeschmolzener Bauteile. In: *Rapid. Tech* (2013)
- [94] JACOBSMÜHLEN, J. zur ; KLESZCZYNSKI, S. ; WITT, G. ; MERHOF, D.: Elevated region area measurement for quantitative analysis of laser beam melting process stability. In: *26th International Solid Freeform Fabrication Symposium; Austin, TX, 2015*
- [95] JACOBSMÜHLEN, J. zur ; KLESZCZYNSKI, S. ; LADEWIG, A. ; WITT, G. ; MERHOF, D.: In-Situ Surface Roughness Measurement of Laser Beam Melted Parts—a Feasibility Study of Layer Image Analysis. (2015)
- [96] KLESZCZYNSKI, S. ; LADEWIG, A. ; FRIEDBERGER, K. ; ZUR JACOBSMÜHLEN, J. ; MERHOF, D. ; WITT, G.: Position dependency of surface roughness in parts from laser beam melting systems. In: *Proceedings of the 26th International Solid Free Form Fabrication (SFF) Symposium, 2015*
- [97] JACOBSMÜHLEN, J. zur ; ACHTERHOLD, J. ; KLESZCZYNSKI, S. ; WITT, G. ; MERHOF, D.: Robust calibration marker detection in powder bed images from laser beam melting processes. In: *Industrial Technology (ICIT), 2016 IEEE International Conference on IEEE, 2016, S. 910–915*
- [98] JACOBSMÜHLEN, J. zur ; KLESZCZYNSKI, S. ; WITT, G. ; MERHOF, D.: Compound quality assessment in laser beam melting processes using layer images. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017 IEEE International IEEE, 2017, S. 1–6*
- [99] JACOBSMÜHLEN, J. zur ; KLESZCZYNSKI, S. ; SCHNEIDER, D. ; WITT, G.: High resolution imaging for inspection of laser beam melting systems. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International IEEE, 2013, S. 707–712*
- [100] BISHT, M. ; RAY, N. ; VERBIST, F. ; COECK, S.: Correlation of selective laser melting-melt pool events with the tensile properties of Ti-6Al-4V

- ELI processed by laser powder bed fusion. In: *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 302–306
- [101] 3DSystemsCorp. [de.3dsystems.com/](http://de.3dsystems.com/)
- [102] CRAEGHS, T. ; CLIJSTERS, S. ; KRUTH, J.-P. ; BECHMANN, F. ; EBERT, M.-C.: Detection of process failures in layerwise laser melting with optical process monitoring. In: *Physics Procedia* 39 (2012), S. 753–759
- [103] BERTOLI, U. S. ; GUSS, G. ; WU, S. ; MATTHEWS, M. J. ; SCHOENUNG, J. M.: In-situ characterization of laser-powder interaction and cooling rates through high-speed imaging of powder bed fusion additive manufacturing. In: *Materials & Design* 135 (2017), S. 385–396
- [104] LEHTI, A. ; TAIMISTO, L. ; PIILI, H. ; SALMINEN, A. ; NYRHILÄ, O.: Evaluation of different monitoring methods of laser assisted additive manufacturing of stainless steel. In: *ECerS XII 12th Conference of the European Ceramic Society. Stockholm, 2011*
- [105] PAVLOV, M. ; DOUBENSKAIA, M. ; SMUROV, I.: Pyrometric analysis of thermal processes in SLM technology. In: *Physics Procedia* 5 (2010), S. 523–531
- [106] RIEDER, H. ; DILLHOFER, A. ; SPIES, M. ; BAMBERG, J. ; HESS, T.: Online monitoring of additive manufacturing processes using ultrasound. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, Czech Republic, 2014*
- [107] KANKO, J. A. ; SIBLEY, A. P. ; FRASER, J. M.: In situ morphology-based defect detection of selective laser melting through inline coherent imaging. In: *Journal of Materials Processing Technology* 231 (2016), S. 488–500
- [108] NEEF, A. ; SEYDA, V. ; HERZOG, D. ; EMMELMANN, C. ; SCHÖNLEBER, M. ; KOGEL-HOLLACHER, M.: Low coherence interferometry in selective laser melting. In: *Physics Procedia* 56 (2014), S. 82–89
- [109] CALTA, N. P. ; GUSS, G. ; WU, S. S. ; LY, S. ; DEANE, D. ; CRUMB, M. F. ; MATTHEWS, M.: High Speed Hyperspectral Thermal Imaging of the Melt Pool Dynamics During Metal Additive Manufacturing. In: *CLEO: Applications and Technology* Optical Society of America, 2017, S. ATH4B–2
- [110] BACKES, G. ; KREUTZ, E. ; GASSER, A. ; STROMEYER, R. ; WISSENBACH, K.: Process monitoring and control during alloying and cladding with CO<sub>2</sub> laser radiation. In: *European conference on laser treatment of materials*, 1998, S. 227–236

- [111] NEGENDANCK, M. ; SCHWAB, J.: Process monitoring in laser beam welding. In: *Proc LANE* Bd. 2001, 2001, S. 697–706
- [112] POPRAWE, R. ; KÖNIG, W.: Modeling, monitoring and control in high quality laser cutting. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 50 (2001), Nr. 1, S. 137–140
- [113] ALVAREZ, C. ; RAMIL, A. ; NICOLAS, G. ; SAAVEDRA, E. ; LOPEZ, A. ; PEREZ, J. u. a.: Real time control and monitoring of the laser hardening process: application to cylindrical workpieces. In: *Laser Assisted Net Shape Engineering* Bd. 3, 2001
- [114] KRATZSCH, C. ; ABELS, P. ; KAIERLE, S. ; POPRAWE, R. ; SCHULZ, W.: Coaxial process control during laser beam welding of tailored blanks. In: *High-Power Lasers in Manufacturing* Bd. 3888 International Society for Optics and Photonics, 2000, S. 472–482
- [115] WEN, P. ; ZHANG, Y. ; CHEN, W.: Quality detection and control during laser cutting progress with coaxial visual monitoring. In: *Journal of Laser Applications* 24 (2012), Nr. 3, S. 032006
- [116] OCYLOK, S. ; ALEXEEV, E. ; MANN, S. ; WEISHEIT, A. ; WISSENBACH, K. ; KELBASSA, I.: Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring. In: *Physics Procedia* 56 (2014), S. 228–238
- [117] ZHANG, Y. ; ZHANG, C. ; TAN, L. ; LI, S.: Coaxial monitoring of the fibre laser lap welding of Zn-coated steel sheets using an auxiliary illuminant. In: *Optics & Laser Technology* 50 (2013), S. 167–175
- [118] ALBERTS, D. ; SCHWARZE, D. ; WITT, G.: High speed melt pool & laser power monitoring for selective laser melting. In: *Proceedings of 9th International Conference on Photonic Technologies LANE 2016* (2016)
- [119] ARTZT, K. ; SIGGEL, M. ; KLEINERT, J. ; RICCIUS, J. ; REQUENA, G. ; HAUBRICH, J.: Pyrometric-Based Melt Pool Monitoring Study of CuCrZr Processed Using L-PBF. In: *Materials* 13 (2020), Nr. 20, S. 4626
- [120] KRUTH, J.-P. ; MERCELIS, P. ; VAN VAERENBERGH, J. ; CRAEGHS, T.: Feedback control of selective laser melting. In: *Proceedings of the 3rd international conference on advanced research in virtual and rapid prototyping*, 2007, S. 521–527
- [121] BERUMEN, S. ; BECHMANN, F. ; LINDNER, S. ; KRUTH, J.-P. ; CRAEGHS, T.: Quality control of laser-and powder bed-based Additive Manufacturing (AM) technologies. In: *Physics procedia* 5 (2010), S. 617–622

- [122] CRAEGHS, T.: *A monitoring system for on-line control of selective laser melting*, Katholieke Universiteit te Leuven (1970-), Diss., 2012
- [123] ROSENTHAL, D.: Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. In: *Welding journal* 20 (1941), S. 220–234
- [124] KING, W.: Accelerated Certification of Additively Manufactured Metals Project: Overcoming the barriers to material qualification. In: *27th SAOT International Conference on Modeling of Laser Material Processing*, 2016
- [125] FISHER, B. A. ; LANE, B. ; YEUNG, H. ; BEUTH, J.: Toward determining melt pool quality metrics via coaxial monitoring in laser powder bed fusion. In: *Manufacturing letters* 15 (2018), S. 119–121
- [126] CRAEGHS, T.: *A monitoring system for on-line control of selective laser melting*, Katholieke Universiteit te Leuven (1970-), Diss., 2012
- [127] KRUTH, J.-P. ; LEVY, G. ; KLOCKE, F. ; CHILDS, T.: Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 56 (2007), Nr. 2, S. 730–759
- [128] SERCOMBE, T. ; LI, X.: Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites. In: *Materials Technology* 31 (2016), Nr. 2, S. 77–85
- [129] TSOTSAS, E. ; MARTIN, H.: Thermal conductivity of packed beds: A review. In: *CHemical Eng. Process. Process Intensif.* 22 (1987), Juli, Nr. 1, S. 19–37
- [130] WEI, L. C. ; EHRLICH, L. E. ; POWELL-PALM, M. J. ; MONTGOMERY, C. ; BEUTH, J. ; MALEN, J. A.: Thermal conductivity of metal powders for powder bed additive manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 21 (2018), S. 201–208
- [131] MURR, L. E. ; MARTINEZ, E. ; AMATO, K. N. ; GAYTAN, S. M. ; HERNANDEZ, J. ; RAMIREZ, D. A. ; SHINDO, P. W. ; MEDINA, F. ; WICKER, R. B.: Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science. In: *Journal of Materials Research and technology* 1 (2012), Nr. 1, S. 42–54
- [132] MURR, L. ; QUINONES, S. ; GAYTAN, S. ; LOPEZ, M. ; RODELA, A. ; MARTINEZ, E. ; HERNANDEZ, D. ; MARTINEZ, E. ; MEDINA, F. ; WICKER, R.: Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. In: *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 2 (2009), Nr. 1, S. 20–32

- [133] SPIERINGS, A. B. ; HERRES, N. ; LEVY, G.: Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. In: *Rapid Prototyping Journal* 17 (2011), Nr. 3, S. 195–202
- [134] SIMCHI, A.: Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features. In: *Materials Science and Engineering: A* 428 (2006), Nr. 1, S. 148–158
- [135] MCGEARY, R.: Mechanical packing of spherical Particles. In: *Journal of the American ceramic society* 44 (1961), Nr. 10, S. 513–522
- [136] LIU, B. ; WILDMAN, R. ; TUCK, C. ; ASHCROFT, I. ; HAGUE, R.: Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process. In: *Additive Manufacturing Research Group, Loughborough University* (2011)
- [137] DAS, S.: Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals. In: *Advanced Engineering Materials* 5 (2003), Nr. 10, S. 701–711
- [138] LI, X. ; O'DONNELL, K. ; SERCOMBE, T.: Selective laser melting of Al-12Si alloy: Enhanced densification via powder drying. In: *Additive Manufacturing* 10 (2016), S. 10–14
- [139] OLAKANMI, E.: Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. In: *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013), Nr. 8, S. 1387–1405
- [140] *Laserstrahlprofilmeter-Hersteller*. [www.cinogy.com/](http://www.cinogy.com/)
- [141] *SLM Solutions Group*. [www.slm-solutions.de/](http://www.slm-solutions.de/). Version: August 2018
- [142] *Primes Cube: Messgerät zur Laserleistungsmessung in Laserstrahl-Schmelzanlagen*. [www.primes.de/en/products/laser-power/brief-radiation/cube-kopie.html](http://www.primes.de/en/products/laser-power/brief-radiation/cube-kopie.html)
- [143] ; DIN (Veranst.): 50125:2009-07 *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*
- [144] *Datenblatt CL20 Edelstahl 1.4404*. [www.concept-laser.de/produkte/werkstoffe.html](http://www.concept-laser.de/produkte/werkstoffe.html)
- [145] HECHT, E.: *Optik*. McGraw-Hill, 1987
- [146] OTSU, N.: A threshold selection method from gray-level histograms. In: *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 9 (1979), Nr. 1, S. 62–66

- [147] CIRESAN, D. C. ; MEIER, U. ; MASCI, J. ; GAMBARDELLA, L. M. ; SCHMID-HUBER, J.: Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification. In: *Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2011
- [148] BRIDLE, J. S.: Probabilistic interpretation of feedforward classification network outputs, with relationships to statistical pattern recognition. In: *Neurocomputing*. Springer, 1990, S. 227–236
- [149] *Datenblatt Mikrotron Eosens 1362 CMOS*. mikrotron.de/en/products/machine-vision-cameras/camera-linkr.html
- [150] *Datenblatt Thorlabs Photodiode PDA36A(-EC) Si Switchable Gain Detector*. www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA36A-EC&pn=PDA36A-EC#11887
- [151] SUGIURA, M. ; YAMAZAKI, T. ; NAKAO, R. ; TANAKA, T. ; NAGATA, S. ; KUMAZAWA, H. ; TSUBOTA, E. ; NAGAI, W.: Development of a New Technique for Continuous Molten Steel Temperature Measurement. In: *Shinnittetsu Giho* (2003), S. 21–24
- [152] PEREIRA, M. ; THOMBANSEN, U.: Contributions for the next generation of 3D metal printing machines. In: *Laser 3D Manufacturing II* Bd. 9353 International Society for Optics and Photonics, 2015, S. 935318
- [153] *TDMS-Format (National Instruments White-Paper)*. www.ni.com/white-paper/3727/de/
- [154] CLIJSTERS, S. ; CRAEGHS, T. ; BULS, S. ; KEMPEN, K. ; KRUTH, J.-P.: In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75 (2014), Nr. 5-8, S. 1089–1101
- [155] MANI, M. ; FENG, S. ; LANE, B. ; DONMEZ, A. ; MOYLAN, S. ; FESPERMAN, R.: *Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing powder bed fusion processes*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2015
- [156] MEINERS, W.: *Direktes Selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe* (Doctoral thesis) Shaker Verlag GmbH. In: *RWTH Aachen, Aachen* (1999)
- [157] RAUSCH, A. M. ; KÜNG, V. E. ; POBEL, C. ; MARKL, M. ; KÖRNER, C.: Predictive Simulation of Process Windows for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: Influence of the Powder Bulk Density. In: *Materials* 10 (2017), Nr. 10, S. 1117

- [158] *Datenblatt: Framegrabber microEnable IV AD<sub>4</sub> - PoCL, Fa. Silicon Software GmbH.* [www.silicon.software/produkte/framegrabber/microenable4/?lang=de](http://www.silicon.software/produkte/framegrabber/microenable4/?lang=de)
- [159] AIRY, G. B.: VI. On the phænomena of Newton's rings when formed between two transparent substances of different refractive powers. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2 (1833), Nr. 7, S. 20–30
- [160] KING, W. ; ANDERSON, A. ; FERENCZ, R. ; HODGE, N. ; KAMATH, C. ; KHAIRALLAH, S.: Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory. In: *Materials Science and Technology* 31 (2015), Nr. 8, S. 957–968
- [161] ALBERTS, D. ; SCHWARZE, D. ; WITT, G.: *IN SITU MELT POOL MONITORING AND THE CORRELATION TO PART DENSITY OF INCONEL® 718 FOR QUALITY ASSURANCE IN SELECTIVE LASER MELTING.* 2016
- [162] KRUTH, J. ; VANDENBROUCKE, B. ; VAN VAERENBERGH, J. ; MERCELIS, P.: Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. In: *Laser* 1 (2005), S. 3D
- [163] KLAIBER, M. J. ; BAILEY, D. G. ; BAROUD, Y. O. ; SIMON, S.: A resource-efficient hardware architecture for connected component analysis. In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 26 (2016), Nr. 7, S. 1334–1349
- [164] KRUTH, J.-P. ; YASA, E. ; DECKERS, J.: Roughness improvement in selective laser melting. In: *Proceedings of the 3rd international conference on polymers and moulds innovations, 2008*, S. 170–183
- [165] HIRSCH, M. ; DRYBURGH, P. ; CATCHPOLE-SMITH, S. ; PATEL, R. ; PARRY, L. ; SHARPLES, S. ; ASHCROFT, I. ; CLARE, A.: Targeted rework strategies for powder bed additive manufacture. In: *Additive Manufacturing* 19 (2018), S. 127–133
- [166] DEMIR, A. G. ; PREVITALI, B.: Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93 (2017), Nr. 5–8, S. 2697–2709
- [167] YASA, E. ; KRUTH, J.-P.: Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. In: *Procedia Engineering* 19 (2011), S. 389–395
- [168] KIEDROWSKI, T.: *Oberflächenstrukturbildung beim Laserstrahlpolieren von Stahlwerkstoffen*, Shaker Verlag, Diss., 2009

- [169] MONTERO SISTIAGA, M. ; NARDONE, S. ; HAUTFENNE, C. ; VAN HUMBEECK, J.: Effect of heat treatment of 316L stainless steel produced by selective laser melting (SLM), *Solid Freeform Fabrication*, 2016, 558–565
- [170] *Software ImageJ*. [www.imagej.nih.gov/ij/](http://www.imagej.nih.gov/ij/)
- [171] WILKES, J. ; HAGEDORN, Y.-C. ; MEINERS, W. ; WISSENBACH, K.: Additive manufacturing of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic components by selective laser melting. In: *Rapid Prototyping Journal* 19 (2013), Nr. 1, S. 51–57
- [172] PLESSIS, A. du ; SPERLING, P. ; BEERLINK, A. ; TSHABALALA, L. ; HOOSAIN, S. ; MATHE, N. ; ROUX, S. G.: Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 2: density measurement. In: *MethodsX* 5 (2018), S. 1117–1123
- [173] *Software Volume Graphics Studio Max 3.0*. [www.volumegraphics.com/de/produkte/vgstudio-max.html](http://www.volumegraphics.com/de/produkte/vgstudio-max.html)
- [174] CHEVERTON, M. A. ; DEATON JR, J. B.: *Systems and methods for monitoring a melt pool using a dedicated scanning device*. März 27 2018. – US Patent 9,925,715
- [175] LUTTER-GÜNTHER, M. ; BRÖKER, M. ; MAYER, T. ; LIZAK, S. ; SEIDEL, C. ; REINHART, G.: Spatter formation during laser beam melting of AlSi10Mg and effects on powder quality. In: *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 33–38
- [176] *Verein Deutscher Ingenieure: Fachausschuss 105.6 – Sicherheit beim Betrieb additiver Fertigungsanlagen*. [www.vdi.de/technik/fachthemen/produkt-und-prozessgestaltung/artikel/sicherheit-beim-betrieb-additiver-fertigungsanlagen/](http://www.vdi.de/technik/fachthemen/produkt-und-prozessgestaltung/artikel/sicherheit-beim-betrieb-additiver-fertigungsanlagen/)
- [177] *International Organization for Standardization: ISO/TC 261/AHG 2 – AM safety issues*. [www.iso.org/committee/629086.html](http://www.iso.org/committee/629086.html)
- [178] ASTM: *ASTM and F42.06 and WK59813 and New guide for Hazard Risk Ranking and Safety Defense*. [www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK59813.htm](http://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK59813.htm)
- [179] GRAFF, P. ; STÅHLBOM, B. ; NORDENBERG, E. ; GRAICHEN, A. ; JOHANSSON, P. ; KARLSSON, H.: Evaluating measuring techniques for occupational exposure during additive manufacturing of metals: A pilot study. In: *Journal of Industrial Ecology* (2016)

- [180] SCHMID, D. ; SCHMUTZLER, C. ; SCHREIBER, S. ; ANSTAETT, C. ; ZAEH, M. F.: Occupational Safety in powder-bed based Additive Manufacturing. In: *Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt* (2016)
- [181] KAIERLE, S. ; BAUMGÄRTEL, A. ; GIESEKE, M. ; WALTER, J. ; HUSTEDT, M.: *Additive Fertigung, aber sicher - Aktueller Stand der Arbeitssicherheit bei der additiven Fertigung, Rapid. Tech-International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing: Proceedings of the 13th Rapid. Tech Conference Erfurt, Germany, 14-16 June 2016*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016
- [182] SCIME, L. ; WOLF, S. D. ; BEUTH, J. ; MRDJENOVICH, S. ; KELLEY, M.: Safety and Workflow Considerations for Modern Metal Additive Manufacturing Facilities. In: *JOM* (2018), S. 1-5
- [183] CRISTINA GUERREIRO, F. d. L. Alberto González Ortiz O. Alberto González Ortiz: Air quality in Europe - 2017 report / European Environmental Agency. Version: 2017. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>. 2017. – Forschungsbericht
- [184] ARBEITSMEDIZIN, B. für Arbeitsschutz u.: *TRGS 561 Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen*. Oktober 2017
- [185] ARBEITSMEDIZIN, B. für Arbeitsschutz u.: *TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte*. BArBl. Heft 1/2006 S. 41-55, Januar 2006
- [186] ARBEITSMEDIZIN, B. für Arbeitsschutz u.: *TRGS 910 Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen*. Februar 2014
- [187] FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT, D.: *MAK- und BAT Wert Liste*. <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9783527812110>, Juli 2017. – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (sog. MAK-Kommission)
- [188] EAGAR, T. ; TSAI, N.: Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. In: *Welding journal* 62 (1983), Nr. 12, S. 346-355
- [189] SLOTWINSKI, J. A. ; GARBOCZI, E. J.: Metrology needs for metal additive manufacturing powders. In: *JOM* 67 (2015), Nr. 3, S. 538-543
- [190] STRONDL, A. ; LYCKFELDT, O. ; BRODIN, H. ; ACKELID, U.: Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. In: *Jom* 67 (2015), Nr. 3, S. 549-554
- [191] SCHUEREN, B. Van d. ; KRUTH, J.-P.: Powder deposition in selective metal powder sintering. In: *Rapid Prototyping Journal* 1 (1995), Nr. 3, S.

23–31

- [192] WEINGARTEN, C. ; BUCHBINDER, D. ; PIRCH, N. ; MEINERS, W. ; WISSENBACH, K. ; POPRAWA, R.: Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. In: *Journal of Materials Processing Technology* 221 (2015), S. 112–120
- [193] SANTOMASO, A. ; LAZZARO, P. ; CANU, P.: Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing. In: *Chemical Engineering Science* 58 (2003), Nr. 13, S. 2857–2874
- [194] GREY, R. ; BEDDOW, J.: On the Hausner ratio and its relationship to some properties of metal powders. In: *Powder Technology* 2 (1969), Nr. 6, S. 323–326
- [195] SPIERINGS, A. B. ; VOEGLIN, M. ; BAUER, T. ; WEGENER, K.: Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. In: *Progress in Additive Manufacturing* 1 (2016), Nr. 1-2, S. 9–20
- [196] SCHULZE, D.: Fließeigenschaften von Schüttgütern. In: *Pulver und Schüttgüter*. Springer, 2014, S. 49–93
- [197] *BMBF Projekt Indipro*. [www.indipro-projekt.de](http://www.indipro-projekt.de)
- [198] *Projekt AM4Industry*. [www.am4industry.azurewebsites.net/](http://www.am4industry.azurewebsites.net/)
- [199] RICHARD, H. A. ; SCHRAMM, B. ; ZIPSNER, T.: *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*. Springer-Verlag, 2017
- [200] LACHMAYER, R. ; LIPPERT, R. bastian ; FAHLBUSCH, T.: *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung*. Springer-Verlag, 2016

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

Teilergebnisse und -inhalte der vorliegenden Arbeit wurden vom Autor schon in Einzelveröffentlichungen publiziert. Diese Publikationen sind im Folgenden aufgeführt.

- [P1] KOLB, T. ; SCHMIDT, P. ; BEISSER, R. ; TREMEL, J. ; SCHMIDT, M.: Safety in additive manufacturing: Fine dust measurements for a process chain in Laser beam melting of metals. In: *RTeJournal-Fachforum für Rapid Technologie* 2017 (2017), Nr. 1
- [P2] KOLB, T. ; HUBER, F. ; AKBULUT, B. ; DONOČIK, C. ; URBAN, N. ; MAURER, D. ; FRANKE, J.: Laser Beam Melting of NdFeB for the production of rare-earth magnets. In: *Electric Drives Production Conference (EDPC), 2016 6th International IEEE*, 2016, S. 34-40
- [P3] KOLB, T. ; GEBHARDT, P. ; SCHMIDT, O. ; TREMEL, J. ; SCHMIDT, M.: Melt pool monitoring for laser beam melting of metals: assistance for material qualification for the stainless steel 1.4057. In: *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 116-121
- [P4] KOLB, T. ; MÜLLER, L. ; TREMEL, J. ; SCHMIDT, M.: Melt pool monitoring for laser beam melting of metals: inline-evaluation and remelting of surfaces. In: *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 111-115
- [P5] KOLB, T. ; MAHR, A. ; HUBER, F. ; TREMEL, J. ; SCHMIDT, M.: Qualification of channels produced by laser powder bed fusion: Analysis of cleaning methods, flow rate and melt pool monitoring data. In: *Additive Manufacturing* (2018)
- [P6] PAPKE, T. ; JUNKER, D. ; SCHMIDT, M. ; KOLB, T. ; MERKLEIN, M.: Bulk Metal Forming of Additively Manufactured Elements. In: *MATEC Web of Conferences* Bd. 190 EDP Sciences, 2018, S. 03002
- [P7] KOLB, T. ; ELAHI, R. ; SEEGER, J. ; SORIS, M. ; SCHEITLER, C. ; HENTSCHEL, O. ; TREMEL, J. ; SCHMIDT, M.: Camera signal dependencies within coaxial melt pool monitoring in laser powder bed fusion. In: *Rapid Prototyping Journal* (2019)



# Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

Teilergebnisse und -inhalte der vorliegenden Arbeit wurden von Studenten schon in studentischen Arbeiten mit einem Sperrvermerk verfasst. Diese Arbeiten sind im Folgenden aufgeführt.

- [S1] SCHMIDT, R.: *Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von physikalischen und verfahrenstechnischen Eigenschaften von Metallpulvern auf Qualitätsgrößen des Laserstrahl-Schmelz-Prozesses*, Technische Hochschule Nürnberg, Georg Simon Ohm, Diplomarbeit, (2019)
- [S2] WITTMANN, M.: *Analysis of the process stability in laser beam melting of metals (LBM-M)*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2019)
- [S3] REINDLER, B.: *Entwicklung und Topologie-Optimierung einer flexiblen Prüfvorrichtung zur dreidimensionalen Vermessung von mittels Laserstrahl-Schmelzen aufgebauten Metallbauteilen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2019)
- [S4] MEYER, T.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahl-Schmelzen von Metallen im Pulverbett: Vergleich und Analyse von Daten aus der hochauflösenden Röntgen-Computertomographie und der koaxialen Schmelzbad-Überwachung*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2019
- [S5] FABER, M.: *Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von physikalischen und verfahrenstechnischen Eigenschaften von Metallpulvern auf Qualitätsgrößen des Laserstrahl-Schmelz-Prozesses*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2018)
- [S6] KROEPEL, S.: *Weiterentwicklung einer Software zur Defekterkennung mittels Schmelzbad-Überwachung beim Laserstrahl-Schmelzen von Metallen*, Duale Hochschule Baden Württemberg Heidenheim, Diplomarbeit, 2018
- [S7] KRONBERGER, S.: *Entwicklung und Aufbau der selektiven Lasersinteranlage Selective Desktop Laser-One (SDL-One)*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2018)
- [S8] MÜLLER, L.: *Analysis and interpretation of process signatures regarding the surface topography determination based on a coaxial monitor-*

- ing system within laser beam melting of metals*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2018)
- [S9] RIEGEL, D.: *Analysis of Experimental Data and programming of Image Processing Algorithms for the Automated Detection of Process Errors with a Melt Pool Monitoring System in Laser Beam Melting*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2018)
- [S10] SCHMITT, J.: *Untersuchungen zur Qualitätssicherung eines Dual-Lasersystems beim Laserstrahl-Schmelzen*, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diplomarbeit, 2018
- [S11] SCHWAB, R.: *Entwicklung einer Methodik zur Erarbeitung von Wärmebehandlungsrouten für mittels Laserstrahl-Schmelzen hergestellter Bauteile des martensitischen Edelstahl 1.4057/1.4542*, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diplomarbeit, (2018)
- [S12] SEEGER, J.: *Programmierung einer Bilderfassung und Analyse von Prozessfehlern für das selektive Laserstrahl-Schmelzen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2018
- [S13] SORIS, M. E.: *Coaxial melt pool monitoring in laser beam melting: Analysis of support structures and strategies to reduce its impact at transition zone*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2018)
- [S14] ULLMANN, S.: *Topologieoptimierung eines Radträgers für den Einsatz in einem Formula Student Rennwagen im Hinblick auf die Fertigung durch Laserstrahl-Schmelzen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2018
- [S15] SCHEUERER, A.: *Inbetriebnahme und Materialstudie für das innovative SLS Desktop 3D Drucker Maschinenkonzept SSDL-Oneüunter gleichzeitiger Ableitung von Verbesserungspotenzialen in Hinblick auf eine Weiterentwicklung und Industrialisierung*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2018)
- [S16] GEBHARDT, P.: *Analyse einer Materialqualifizierung beim Laserstrahl-Schmelzen: Machbarkeitskriterien, Prozessparameter-Entwicklung und Wirtschaftlichkeit*, Technische Hochschule Nürnberg, Georg Simon Ohm, Diplomarbeit, 2017
- [S17] HILBEL, L.: *Charakterisierung der Schmelzbad-Überwachung beim Laserstrahl-Schmelzen von Metallen im Pulverbett*, Hochschule Karlsruhe: Technik und Wirtschaft, Diplomarbeit, (2017)

- [S18] KLAMT, D.: *3DP-MPC: Wertstromanalyse und Optimierung*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2017)
- [S19] MAHR, A.: *Herstellung von Schutzgaszuführungen mittels Laserstrahl-Schmelzen von Metallen im Pulverbett: Entpulverung von innenliegenden Kanälen und daraus abgeleitete Konstruktionsempfehlungen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2017)
- [S20] SCHMIDT, P.: *Arbeitssicherheit in der additiven Fertigung: Laserstrahl-Schmelzen von Metallen im Pulverbett und Fused Deposition Modeling bei der Robert Bosch GmbH*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2017)
- [S21] SCHMIDT, O.: *Materialqualifizierung des Edelstahl 1-4057 für das Laserstrahlschmelzen von Metallen im Pulverbett: Experimentelle Durchführung eines statistischen Versuchsplans und Analyse von Testkörpern*, Technische Hochschule Nürnberg, Georg Simon Ohm, Diplomarbeit, (2017)
- [S22] WILLBERGER, F.: *Konzeption und Evaluierung eines Workflows zur simulativen Vorbereitung und Bewertung additiver Metallbauteile*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2017)
- [S23] AKBULUT, B.: *Laser Beam Melting of rare-earth-magnet powder and characterization of powders for LBM for industrial quality standards*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2016
- [S24] DONOČIK, C.: *Verarbeitung von Seltenerd-Magnetwerkstoffen durch pulverbettbasiertes Laserstrahl-Schmelzen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2016
- [S25] EGYED, J.: *Erstellung eines umfassenden Kalkulationstools für die M2 Laserstrahl-Schmelzmaschine von der Firma Concept Laser GmbH zur variablen Berechnung von Bauteilen*, FH Münster, Diplomarbeit, (2016)
- [S26] RAPPE, C.: *Study and characterisation of the surface quality in the process of Laser Beam Melting with high laser power and high layer thickness*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2016
- [S27] LIU, T.: *Study on process stability and certification for Laser Beam Melting of Metals with melt pool monitoring and powder qualification*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2018

- [S28] ACKERMANN, S.: *Datenstrukturierung und Klassifizierung von Prozessdaten zur Vorbereitung einer Parametergenerierung mittels Maschinellen Lernens für das Laserstrahl-Schmelzen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2019
- [S29] ELAHI, R.: *Statistical analysis of melt pool monitoring data within Laser Powder Bed Fusion of metals by means of machine learning algorithms*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, (2019)
- [S30] WELZENBACH, H. M. C.: *Analyse des Anwendungspotentials von additiven Fertigungsverfahren für den firmeninternen Werkzeugbau*, Diplomarbeit, 2018
- [S31] UNGER, L.: *Weiterentwicklung der digitalen Qualitätssicherung für das Laserstrahl-Schmelzen anhand der fertigungsbegleitenden Pulvercharakterisierung des Werkstoffs AlSi10Mg*, Technische Hochschule Nürnberg, Georg Simon Ohm, Diplomarbeit, (2019)
- [S32] ECKSTEIN, F.: *Entwicklung eines mikrokontrollerbasierten Systems zur Schichtauftragskontrolle beim selektiven Laserstrahl-Schmelzen*, Technische Hochschule Nürnberg, Georg Simon Ohm, Diplomarbeit, (2019)
- [S33] BALUNI, S.: *Conception and evaluation of a simulation path to optimize the production of additive metal parts*, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diplomarbeit, (2019)

## Reihenübersicht

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

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>FMT</b>	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien
<b>REP</b>	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 CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
Spulenwickeln  
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  
CO<sub>2</sub>-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 Meßner  
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 Schubert  
Regelung der Fokusslage beim Schweißen  
mit CO<sub>2</sub>-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  
Demontagetechologien 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 CO<sub>2</sub>-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 Eßer  
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 Untersuchen-  
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 einsatzgerechten 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  
Laserdurchstrahlenschweißen  
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 Rösel  
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 Laserstrahl-tiefschweißprozesses 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 Zöllner  
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  
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe 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 Karosserierohrbau: 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 Wälzlagertähle für die Wärmebehandlungssimulation  
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl  
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 Zahnradern  
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 Heißcrimpprozesses  
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 mehrlageriger 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 Formspulenwicklungen 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 fokusbandsmodulierte 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.

Band 378: Michael Schneider  
Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten  
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab.  
2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel  
Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering  
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner  
Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen  
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling  
Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design  
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5

Band 382: Tobias Kolb  
Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems  
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2

## Abstract

The demand for individualized products and accelerated product development processes favor the industrialization of material-efficient, laser-based additive manufacturing [1]. This enables prototypes to be produced quickly and cost-efficiently, with properties that are of conventionally manufactured prototypes [199]. This improves the competitiveness significantly, especially for complex products [2]. In mold and tool making, cooling close to the contour increases the subsequent possible output rate and the service life of tools [3], and new possible applications in medical technology enable the individual production of implants [200]. Currently, there are numerous fields of action [4] for the technology of laser powder bed fusion of metals (LPBF-M). These concern the insufficient training opportunities for skilled workers [5], the reproducibility of component quality [6], the lack of and inadequately communicated design guidelines [7], a scientifically based application research [8] and strict framework conditions for occupational safety [P1], as well as legal issues [4]. Despite intensive research in the simulation of laser-based additive processes, the understanding of the physical interaction processes has not yet been sufficiently elaborated, which is why real-time monitoring systems are required to generate new insights [9]. In order to monitor the interaction zone of laser beam and powder, coaxial setups have been distributed since 2016. These enable a high temporal and spatial resolution of the entire manufacturing process and thus theoretically enable a component data set comparable to an exsitu Computed Tomography. Coaxial molten pool monitoring systems are still insufficiently investigated and underrepresented in research. This work therefore deals with the process monitoring of LPBF-M and has the goals to improve the process understanding and the signal understanding of a coaxial melt pool monitoring and to develop possible applications for process monitoring, as well as an outlook on a controlled process. Within the scope of this work, publications have been produced that provide results on the extension of the material range by rare earth magnet materials [P2], on the formability of additively produced test specimens [P6], on the safety in operation of additive manufacturing systems [P1], as well as on the characterization [P7] and the possible applications of coaxial melt pool monitoring [P5, P3, P4].

Das additive Verfahren Laserstrahl-Schmelzen von Metallen im Pulverbett bietet aufgrund von Freiheitsgraden im Bauteildesign, neuartiger Materialeigenschaften, hoher Umsetzungs-Geschwindigkeit und Flexibilität in der Produktion ein sehr hohes Anwendungspotential. Im Verlauf der aktuellen Industrialisierungsphase sind die Handlungsfelder Gesamtanlageneffizienz, Erweiterung der Werkstoffpalette, Simulationsmethoden, Design, sowie die Prozess-Überwachung und -Regelung im Fokus aktueller Forschungsarbeiten. Die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen zur Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems identifizieren typische Prozessfehler und bearbeiten Lösungsansätze zur Erfassung derselben mittels lateraler und koaxiale Prozessüberwachungs-Systeme. Bei der Betrachtung des koaxialen Schmelzbad-Überwachungssystems werden hierfür Signaturen aus Grundlagenversuche mit Einzelspuren, dünnen Wänden, Volumenkörpern und realen Bauteilen charakterisiert. Darauf aufbauend werden Anwendungsmöglichkeiten für beide Systeme erarbeitet. Für das laterale Überwachungssystem wird eine automatisierte Auswertungsmöglichkeit auf Basis des maschinellen Lernens entwickelt um Schichtbilder zu klassifizieren. Für das koaxiale Überwachungssystem werden Möglichkeiten zur Nutzbarmachung bezüglich der Oberflächenrauheit auf gescannten Bauteilflächen, in Folgeschichten von Kanalverschlüssen und bei Spritzer-Ereignissen gezeigt. Gegenmaßnahmen zur Verminderung von Oberflächenrauheit mittels Laserpolieren werden motiviert und Ergebnisse vorgestellt.

ISBN 978-3-96147-491-2

