



Oliver Nottrodt

Polygonscannerbasierte Hochleistungs-Ultrakurzpuls- Laserstrukturierung

Polygonscannerbasierte Hochleistungs- Ultrakurzpuls-Laserstrukturierung

Polygon Scanner Based Structuring with High Power Ultrashort Pulsed Laser Systems

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Oliver Nottrodt

Berichter:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

Tag der mündlichen Prüfung: 25. September 2017

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

ERGEBNISSE AUS DER LASERTECHNIK

Oliver Nottrodt

Polygonscannerbasierte Hochleistungs-
Ultrakurzpuls-Laserstrukturierung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Oliver Nottrodt: Polygonscannerbasierte Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laserstrukturierung

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2018
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-623-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Zusammenfassung

Ultrakurzpulslaser (UKP) werden seit einiger Zeit in der Industrie erfolgreich eingesetzt. Die Strukturierung von Spritzguss- und Prägwerkzeugen sind bereits Stand der Technik, da die Qualität des Bearbeitungsergebnisses zeit- und kostenaufwendige Nachbearbeitungsschritte zur Entfernung von Graten oder Schmelzablagerungen überflüssig macht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Laserstrukturierungssystem aufgebaut, dass einen Polygonscanner zur Laserstrahlablenkung verwendet. Bei der Brennweite von 163 mm werden Bearbeitungsgeschwindigkeiten von bis zu 360 m/s erreicht, was deutlich über der üblichen Bearbeitungsgeschwindigkeit von 1 - 5 m/s mit industriell genutzten Galvanometerscannern liegt. Hierdurch kann die Produktivität bzw. Abtragsrate bei gleichbleibender Oberflächenqualität deutlich gesteigert werden und das verfügbare Potenzial heutiger Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser mit mehr als 100 W mittlerer Leistung und Pulsfrequenzen im MHz-Bereich ausgeschöpft werden.

Bei der Laserstrukturierung bei diesen Scangeschwindigkeiten und Pulsfrequenzen im MHz-Bereich führen bereits kleinste Toleranzen der Synchronisation aller Teilsysteme und der Fertigung der Komponenten zu Geometrieabweichungen des Strukturierungsergebnisses. Alle relevanten Abweichungsursachen, welche zu einer Abweichung der Strukturierung von der Sollgeometrie beitragen, wurden analysiert und in die drei Kategorien Prozessdatenkonvertierung, systembedingte und prozessbedingte Abweichungsursachen gruppiert. Die systembedingten Ursachen für Geometrieabweichungen sind für die Strukturierung mit vielen Schichten statistisch beschreibbar. Auf Basis der statistischen Einzelfehlerverteilungen der Komponenten und Signalflüsse des Systems kann die Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems in Form einer Punktspreizfunktion berechnet werden. Mit Hilfe dieses statistischen Modells können die erwarteten Geometrieabweichungen des Prozessergebnisses vor dem Prozess mit Methoden der Bildverarbeitung simuliert werden.

Die Punktspreizfunktion kann zusätzlich verwendet werden, die statistisch zu erwartenden Abweichungen vor dem Prozess aus den Prozessdaten herauszurechnen. Der direkte Vergleich der Strukturierungen basierend auf originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten zeigt, dass die mit dem Laser abgetragene Struktur durch die Vorverarbeitung bildlich scharfgezeichnet wird.

Abstract

Ultra-short pulse (USP) lasers are already being successfully used in industry for laser structuring of injection-molding and embossing tools. The quality of the structuring result avoids the need for time-consuming and costly post-processing steps for removing burrs or melt deposits. Within the scope of this thesis a laser structuring system was developed that uses a polygon scanner for laser beam deflection. With the focal length of 163 mm, the system reaches scanning speeds of up to 360 m/s, which is clearly above the usual processing speed of 1 - 5 m/s with galvanometer scanners commonly used in the industry. As a result, the productivity and material ablation rate can be significantly increased while maintaining the highest surface quality. At these scanning speeds even laser pulses at pulse frequencies in the MHz range are separated which is essential for low thermal impact and exploiting the potential of today's high-performance USP lasers with more than 100 W average power.

Geometrical deviations of the structuring result from the very small tolerances of the synchronization of all subsystems and the production of the components when laser structuring at these high scanning speeds and pulse frequencies in the MHz range. All relevant deviation sources, which contribute to a deviation of the structuring result from the target geometry, were analyzed and grouped into three categories: process data conversion, system- and process-related sources for deviations. The system-induced causes for geometry deviations can be statistically described for laser structuring with many processing layers. On the basis of the statistical individual error distributions of the components and signal flows of the system, the transfer function of the processing system can be calculated in the form of a point spread function. Using this statistical model, the expected geometry deviations of the processing result can be simulated using image processing methods.

In addition, the point spread function can be used to compensate for the statistically expected deviations by preprocessing the process data. The comparison of the laser structuring results based on original and pre-processed process data shows that the laser ablated structure is visually sharpened by the pre-processing.

Danksagung

Prof. Poprawe danke ich für die Möglichkeit der Promotion am Fraunhofer Institut für Lasertechnik, ILT. Die anregenden Diskussionen bei der Betreuung meiner Arbeit waren immer motivierend und außerordentlich hilfreich bei der weiteren Fokussierung auf das Thema meiner Arbeit. Prof. Schlaak danke ich für die Betreuung in der End- und Prüfungsphase. Die sehr ausführlichen und konstruktiven Anmerkungen und Korrekturen erhöhten die Qualität der finalen Version meiner Arbeit signifikant.

Ein besonderer Dank geht an Arnold Gillner, der mir meinen Platz am ILT angeboten hat. Nur hierdurch war es mir im Anschluss möglich diese Arbeit anzufertigen und meine Frau kennenzulernen. Die Diskussionen mit dir und deine hilfreichen Ideen haben wesentlich zum roten Faden meiner Arbeit beigetragen. Des Weiteren danke ich Peter Abels für die vielen ruhigen Gespräche über meine Arbeit im Allgemeinen und bei Problemen zu meiner Arbeit im Speziellen.

Für die unermüdliche und stundenlange Auswertung der ersten Abtragsergebnisse und Untersuchungen am Mikroskop danke ich Stephan Keller ganz herzlich. Ohne deinen Einsatz wäre der Einstieg in die Analyse der Geometrieabweichungen und deren Ursachen für mich deutlich schwieriger geworden. Im weiteren Verlauf der Arbeit erwies sich deine hervorragende Dokumentation als außerordentlich nützlich. Für die Zusammenarbeit in der zweiten Hälfte meiner Arbeit danke ich Johannes Finger. Durch die Zusammenführung meines Polygonscanners mit dem Großgerät konnte ich das Potential dieser Technologie zeigen und meine Versuche zielführend durchführen.

Ein herzliches Dankeschön geht an meine Eltern, die mir während Studium und Promotion unterstützend und liebevoll zur Seite standen. Im Besonderen gilt mein Dank meinem Vater, der mir mit seiner Erfahrung und Sachverstand in Diskussionen und der ersten Korrektur meiner Arbeit sehr geholfen hat.

Die Beste kommt zum Schluss. Mein besonderer Dank geht an meine Frau Nadine, die mich immer unterstützt hat und vor allem während der Endphase meiner Arbeit häufig auf mich verzichten musste. Ich bin überglücklich dich während meiner Zeit am ILT kennen und lieben gelernt zu haben und freue mich jetzt wieder mehr Zeit für dich zu haben.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelzeichenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Herangehensweise	3
3 Prozessgrundlage und Stand der Technik	13
3.1 Prinzipien der Scanbewegung	18
4 Aufbau des Polygonscannersystems	21
4.1 Systemübersicht	21
4.2 Auslegung des Polygonscanners	25
4.3 Prozessdaten für die schichtweise Tiefenstrukturierung	29
4.4 Steuerung	31
4.4.1 Programmablauf	34
4.5 Kennwerte und erste Prozessergebnisse mit dem Polygonscannersystem	37
5 Geometrieabweichungen bei der polygonscannerbasierten Laserstrukturierung	43
5.1 Quantisierungsabweichungen der Prozessdatenkonvertierung	43
5.2 Systembedingte Abweichungen	45
5.2.1 Abweichungsursachen konstanter Größe	46
5.2.1.1 Optische Verzeichnung	46
5.2.2 Abweichungsursachen mit statistischer Verteilung	49
5.2.2.1 Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld	49
5.2.2.2 Dynamischer Spurfehler des Polygons	50
5.2.2.3 Genauigkeit des Encoders des Polygonmotors	52
5.2.2.4 Synchronität der Laserpulse zum Linienanfang	54
5.2.2.5 Geschwindigkeitsabweichung von Polygonscanner und Achssystem	56
5.2.2.6 Weitere potentielle Abweichungsursachen	58
5.3 Prozessbedingte Abweichungen	61
5.3.1 Energieverteilung im Fokus	61
5.3.2 Wiederanhaftung	62
5.3.3 Maximaler Flankenwinkel	65

5.3.4	Grabenbildung unterhalb von Flanken	68
6	Systemkonzepte zur Reduktion von Geometrieabweichungen	71
6.1	Passive Reduktion der Positionierabweichungen	73
6.2	Aktive Kompensation der Positionsabweichungen	75
6.3	Reinigung der Werkstückoberfläche	80
7	Konzepte zur statistischen Abweichungskompensation und Erhöhung der Abtragsgenauigkeit	87
7.1	Berechnung der Punktspreizfunktion	88
7.2	Validierung der theoretischen Punktspreizfunktion	93
7.3	Prinzip der Entfaltung	98
7.4	Berechnung des vorkompensierten Bearbeitungsbildes	101
8	Vergleich der Prozessergebnisse mit und ohne Abweichungsvorkompensation	105
9	Zusammenfassung und Ausblick	111
	Anhang	119
A.1	Berechnung der Abtragseffizienz	119
A.2	Optische Simulationen des Polygonscannersystems	122
A.3	Konstruktionsübersicht des Polygonscanners	124
A.4	Programmierung der Steuerung	125
A.5	Weitere Darstellungen des Vergleichs der Prozessergebnisse mit und ohne Abweichungsvorkompensation	129
A.6	Datenblätter der Komponenten	132
	Literaturverzeichnis	139
	Lebenslauf	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzahlen des Polygonscannersystems	23
Tabelle 2: Faktoren des Pulsabstandes und der Verzeichnungsfehler	48
Tabelle 3: Interpolierte Encoderauflösung	54
Tabelle 4: Brechungsindex und Extinktionskoeffizient ausgewählter Metalle	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lichtleiter aus PMMA mit abgeformten Mikrolinsen und laser- strukturierte Druckwalze mit Ledernarbe und kreisförmigen Vertiefungen	1
Abbildung 2:	Kategorien der Ursachen für Geometrieabweichungen und ihre Form	4
Abbildung 3:	Ursache-Wirkungs-Diagramm der Einflussgrößen auf das Prozessergebnis	7
Abbildung 4:	Beispiele von Übertragungsfunktionen aus verschiedenen Fachbereichen	9
Abbildung 5:	Schematischer Rechenweg der Faltung der Prozessdaten mit der PSF und ideale Vorkompensation	10
Abbildung 6:	Exemplarisches Strukturierungsergebnis mit der Topografie der Kontinente in Messing	13
Abbildung 7:	Theoretische Abtragseffizienz für Stahl	16
Abbildung 8:	Theoretische Abtragsrate für Stahl	17
Abbildung 9:	Vergleich des Aufbaus von Galvanometer- und Polygonscannern	19
Abbildung 10:	Vergleich der Scanbewegung für vektorbasierte und rasterbasierte Prozessdaten Links: Vektorbasiert Rechts: Rasterbasiert	20
Abbildung 11:	Systemskizze des Polygonscannersystems mit den Hauptkomponenten	22
Abbildung 12:	Optische Auslegung des Polygonscanners	26
Abbildung 13:	Wirkungsgrad des Polygons in Abhängigkeit der Facettenzahl	28
Abbildung 14:	Mögliche Darstellungen der Prozessdaten für die schichtweise Tiefenstrukturierung	30
Abbildung 15:	Schnittstellen und Signalflüsse der Echtzeitsteuerung	32
Abbildung 16:	Aufsicht der Steuerungsinterfaceplatine zur Signalverteilung und Wandlung der Signale des FPGAs	34
Abbildung 17:	Ablaufdiagramm der Prozessvorbereitung und Durchführung	35
Abbildung 18:	Programmablauf der Hauptschleife der FPGA-Steuerung	36
Abbildung 19:	Ansichten des realisierten Polygonscannersystems	38
Abbildung 20:	Vergleich der Höhenkarten erster Strukturierungsergebnisse	40
Abbildung 21:	Prinzipielle Darstellung der Quantisierung eines kontinuierlichen Signalverlaufs	44
Abbildung 22:	Auswirkung des Rasterns auf den Geometrieehalt	45
Abbildung 23:	Vergleich der Simulation und Messung der Verzeichnung des F-Theta Objektivs	47
Abbildung 24:	Bogenfehler der Scanlinie bei fehlerhafter Justage bei der Laserstrahleinkopplung	49
Abbildung 25:	Zeitliche Toleranz des Bearbeitungsbeginns beim Eintritt der Vorschubachse in das Bearbeitungsfeld	50
Abbildung 26:	Messung des dynamischen Spurfehlers des Polygons	51

Abbildung 27: Prinzip der Quadraturencoderauswertung mit fehlerhafter Zählperiode	52
Abbildung 28: Vermessung der Genauigkeit des Polygonencoders mit fehlerhafter Zählperiode	53
Abbildung 29: Einfluss der Synchronisierung von Laser und Steuerung auf die Laserpulsfolge	55
Abbildung 30: Einfluss von Geschwindigkeitsschwankungen der Vorschubachse auf die Linienpositionierungsgenauigkeit	57
Abbildung 31: Problem der Wiederanhaftung an den Flanken einer Rechtecksenkung	63
Abbildung 32: Visualisierung des Rückimpulses des Prozesses anhand der Orientierung des Prozessleuchtens	64
Abbildung 33: Projektion der Laserenergie auf die Werkstückoberfläche	65
Abbildung 34: Winkelabhängigkeit von Reflexion und Absorption der Laserstrahlung	67
Abbildung 35: Schematische Darstellung der Reflexion der Laserstrahlung an Flanken des Werkstücks	69
Abbildung 36: Einfluss der Stufensteigung auf die Grabenbildung	70
Abbildung 37: Systemkonzepte zur Reduktion des dynamischen Spurfehlers	72
Abbildung 38: Interne Doppelreflexion an Polygonspiegeln zur Kompensation des Taumelfehlers	73
Abbildung 39: Externe Doppelreflexion eines Polygonscanners zur Kompensation des dynamischen Spurfehlers	75
Abbildung 40: Schematische Darstellung der Positionierabweichungen der Laserpulse	76
Abbildung 41: Kompensation der Positionierabweichung mit einem Hybridscanner	77
Abbildung 42: Schematische Darstellung des SyperSync™ Prinzips	79
Abbildung 43: Konzeptskizze der getesteten Koaxialabsaugung für einen Polygonscanner	81
Abbildung 44: Einfluss eines punktförmigen Luftstroms auf Materialablagerungen	83
Abbildung 45: Fehlerverteilungen des Bearbeitungs-systems in Scan- und Vorschubrichtung	91
Abbildung 46: Entwicklung des virtuellen Bearbeitungsfokus durch die statistischen Abweichungsverteilungen	92
Abbildung 47: Einfluss der PSF auf eine 100 x 100 µm Rechteckvertiefung	94
Abbildung 48: Prozessdaten zur Messung des Amplitudengangs	95
Abbildung 49: Simulierter Amplitudengang in Vorschubrichtung	96
Abbildung 50: Amplitudengänge für die gemessenen Abtragstiefen 50 µm und 25 µm im Vergleich zur Simulation in Vorschubrichtung	98
Abbildung 51: Signalfluss des Prozesses und Prozesssystems mit Vorverarbeitung der Prozessdaten	100
Abbildung 52: Quantisierung der Punktspreizfunktion mit der Pixelgröße als Abtastabstand	102
Abbildung 53: Profilverlauf der vorverarbeiteten Prozessdaten im Vergleich zu den Originaldaten	103

Abbildung 54: Ausschnitt des Profilverlaufs der vorverarbeiteten Prozessdaten im Vergleich zu den Originaldaten	104
Abbildung 55: Aufnahme der Probe zum Geometrievergleich	106
Abbildung 56: Profilvergleich von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten	107
Abbildung 57: Ausschnitt des Profilvergleichs von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten	108
Abbildung 58: Nahaufnahme von mit dem Polygonscannersystem abgetragenen Beispielstrukturen	112
Abbildung 59: Ablauf der fehlertoleranten Prozessführung	116
Abbildung 60: Anordnung zur Simulation der Scanwegs und Telezentriefehlers für das F-Theta Objektiv	122
Abbildung 61: Simulationsergebnis der Scanlänge und des Telezentriefehlers	122
Abbildung 62: Simulationsergebnis der optischen Verzeichnung im Scanfeld des F-Theta Objektivs	123
Abbildung 63: Konstruktionsübersicht des Polygonscanners mit Einkoppelspiegel	124
Abbildung 64: Screenshot der Benutzeroberfläche – Laden der Prozessdaten	125
Abbildung 65: Screenshot der Benutzeroberfläche – Definieren und Übertragen der Prozessparameter in die Echtzeitsteuerung	126
Abbildung 66: Screenshot der Benutzeroberfläche – Ansicht der aktuellen Bearbeitungsschicht und Prozessvorschritt	127
Abbildung 67: Screenshot der Benutzeroberfläche – Konfiguration und Kalibrierung des Bearbeitungssystems	127
Abbildung 68: Screenshot des Hauptprogrammablaufs auf dem FPGA der Echtzeitsteuerung	128
Abbildung 69: Gesamter Profilvergleich von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten	129
Abbildung 70: Ausschnitt des Profilvergleichs von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten im Bereich 5,25 - 6,75 mm	130
Abbildung 71: Ausschnitt des Profilvergleichs von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten im Bereich 9,5 – 10,5 mm	130
Abbildung 72: Ausschnitt des Profilvergleichs von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten im Bereich 11,5 – 12,0 mm	131
Abbildung 73: Ausschnitt des Profilvergleichs von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten im Bereich 14,5 – 15,5 mm	131
Abbildung 74: Datenblatt des Polygonscanners der Firma Kugler GmbH	133
Abbildung 75: Datenblatt der Beschichtung des Polygonscanners	134
Abbildung 76: Datenblatt der Fokussieroptik des Polygonscanners S4LFT3162/328 von Sill Optics	135

Abbildung 77: Spezifikation der Linearachse mit einem Verfahrweg von 200 mm zum Verfahren des Werkstücks von Aerotech Inc.	136
Abbildung 78: Datenblatt des verwendeten Lasers	137

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AOD	Akusto-optischer Strahlablenker (englisch: acousto-optic deflector)
CAD	Rechnerunterstützte Konstruktion (englisch: computer-aided design)
CLP	Kegelförmige Substrukturen (englisch: cone-like protrusion)
CPU	Prozessors eines Computers oder vergleichbar (englisch: central processing unit)
D	Prozessdaten
$\hat{D}$	Fouriertransformierte der Prozessdaten
D'	Vorverarbeitete Prozessdaten
EOD	Elektro-optischer Strahlablenker (englisch: electro-optic deflector)
FPGA	Programmierbarer integrierter Schaltkreis (englisch: field programmable gate array)
LIPSS	Laser induzierte periodischen Subwellenlängen-Strukturen (englisch: Laser-induced Periodic Surface Structures)
LZI	Linear zeitinvariantes (System)
PMMA	Polymethylmethacrylat / Acrylglas (z.B. Plexiglas der Firma Evonik Röhm GmbH)
PSF	Punktspreizfunktion
PSF_{Eintritt}	Punktspreizfunktion des Fehlers beim Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld
PSF_{Spot}	Punktspreizfunktion der Energieverteilung des Laserfokus
PSF_{Spur}	Punktspreizfunktion des Taumelfehlers des Polygonscanners
PSF_{Sync}	Punktspreizfunktion des Fehlers des Linienanfangs
PSF_{System}	Punktspreizfunktion des Gesamtfehlers des Bearbeitungssystems
$\widehat{PSF_{\text{System}}}$	Fouriertransformierte der Gesamtfehlerpunktspreizfunktion
PSF_{Vorschub}	Punktspreizfunktion in Vorschubrichtung
UKP	Ultrakurzpuls
USP	Ultra-short-pulse

Formelzeichenverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
A	Abtragsfläche	mm^2
A_P	Fresnelsche Absorption für parallele Polarisation	
A_S	Fresnelsche Absorption für senkrechte Polarisation	
β	Justagefehler beim Einkoppeln des Laserstrahls in den Polygonscanner	$^\circ$
$DC_{\text{Facettenlänge}}$	Polygoneffizienz in Abhängigkeit der Facettenlänge	
$DC_{\text{Scanwinkel}}$	Polygoneffizienz in Abhängigkeit des Scanwinkels	
d_{Linie}	Linienabstand	μm
d_{Pixel}	Pixelgröße	μm
d_{Polygon}	Polygondurchmesser	mm
d_{Puls}	Pulsabstand	μm
$d_{\text{Rohstrahl}}$	Rohstrahldurchmesser	mm
$d'_{\text{Rohstrahl}}$	Projizierter Rohstrahldurchmesser	mm
E_{Bogen}	Bogenfehler	mm
E_P	Pulsenergie	J
$E_{\text{Verzeichnung}}$	Fehler durch Verzeichnung des Objektivs	mm
f	Brennweite	mm
f_P	Laserpulsfrequenz	MHz
k	Extinktionskoeffizient	
k_T	Temperaturleitfähigkeit	mm^2/s
L_{Facette}	Facettenlänge	mm
L_{Scan}	Scanlänge	mm
n	Brechungsindex	
n_{Facetten}	Anzahl Facetten	
P_M	Mittlere Laserleistung	W
φ_{tz}	Telezentriefehler	$^\circ$
r_a	Radius des Abtrags mit einem gaußförmigen Strahlprofil	μm
R_P	Fresnelsche Reflexion für parallele Polarisation	
R_S	Fresnelsche Reflexion für senkrechte Polarisation	
t_d	Gesamtverzögerungszeit	ms

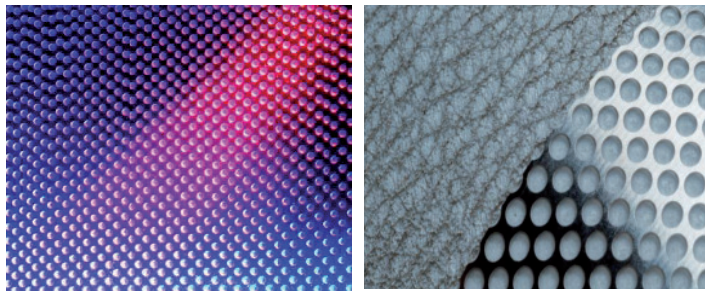
t_{dB}	Verzögerung bis zur Prozessfreigabe bei Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld	ms
t_{dF}	Verzögerung bis zum Anfang der nächsten Facette	ms
t_{dP}	Verzögerung bis zum nächsten Laserpuls	ns
T_{LT}	Periode des Lasertaktes	ns
t_P	Pulsdauer	ps
T_{ST}	Periode des Steuerungstaktes	ns
δ	Thermische Eindringtiefe	nm
$\Delta V_{Gau\beta}$	Abtragsvolumen / Puls für Gauß-Profil	mm ³
$\Delta \dot{V}_{Gau\beta}$	Abtragsrate für ein Gauß-Profil	mm ³ /min
v_{scan}	Scangeschwindigkeit	m/s
ΔV_{TopHat}	Abtragsvolumen / Puls für ein quadratisches Top-Hat-Profil	mm ³
$\Delta \dot{V}_{TopHat}$	Abtragsrate für ein quadratisches Top-Hat-Profil	mm ³ /min
θ_{scan}	Scanwinkel	°
Φ	Fluenz	J/cm ²
Φ_0	Spitzenfluenz	J/cm ²
Φ_{th}	Abtragsschwellfluenz	J/cm ²
ω_0	Fokusradius	μm
z_{abtr}	Abtragstiefe	μm

1 Einleitung

Ultrakurzpulslaser (UKP) werden seit einiger Zeit in der modernen Fertigung von hochpräzisen Bauteilen erfolgreich eingesetzt. Die Strukturierung von Spritzguss- und Prägewerkzeugen sind bereits Stand der Technik. So werden z.B. Mikrolinsen für die homogene Lichtauskopplung von Design- und Funktionselementen oder Imitationen von Ledernarben für Armaturenbretter im Automobilbereich in die Werkzeuge mit dem UKP-Laser graviert. Diese Beispiele sind in Abbildung 1 zu sehen. Die Oberflächeneigenschaften im Hinblick auf z.B. optische oder haptische Funktionen werden immer mehr zum Qualitätsmerkmal von Produkten. Nicht ohne Grund gibt es inzwischen Firmen, die sich auf das Design von 3D-Texturen zum Gravieren von Oberflächen mittels Lasertechnik spezialisiert haben [1]. Im Bereich der 2D Bearbeitung, z. B. für Beschriftungsanwendungen und bei der 2,5D Bearbeitung, bspw. von Werkzeugen, hat sich der Einsatz von UKP-Strahlquellen zum Materialabtrag mit höchster Präzision bereits etabliert [2, 3].

Abbildung 1:
Lichtleiter aus
PMMA mit abge-
formten Mikrolin-
sen und laser-
strukturierte
Druckwalze mit
Ledernarbe und
kreisförmigen Ver-
tiefungen

[Bildquelle: Fraun-
hofer ILT, Aachen]



Das Verfahren der Strukturierung mittels gepulster Laserstrahlung bietet den Vorteil der vollständig digitalen Prozesskette im Sinne der „Digital Photonic Production“. Mit dem Schmelzabtrag mit ns-Pulsen sind Abtragsraten von bis zu 50 mm³/min erreichbar [4], wodurch die Produktivität der Laserstrukturierung mit ns-Pulsen konkurrenzfähig zu photo-chemischen

Ätzverfahren zur Herstellung von texturierten Oberflächen ist. Der Vorteil ultrakurzer Pulse ist, dass das Material keine Zeit hat, die eingekoppelte Energie in Form von Wärme an benachbartes Material weiterzuleiten. Die UKP-Bearbeitung wird daher auch als „kalter Abtrag“ bezeichnet. Beim Materialabtrag von Metallen mit UKP-Lasern entsteht durch die hohe Intensität und daraus überwiegende Verdampfung nur eine minimale Schmelzfilmdicke. Die Qualität des Bearbeitungsergebnisses macht zeit- und kostenaufwendige Nachbearbeitungsschritte zur Entfernung von Graten oder Schmelzablagerungen überflüssig [5].

Trotz des hohen Potentials dieser Technologie werden in vielen Fällen andere Verfahren und Prozesse der Strukturierung mit UKP-Laser vorgezogen. Die Gründe hierfür sind verschieden. Meistens ist die gesamtwirtschaftliche Bilanz ausschlaggebend. Die Anschaffungskosten von Ultrakurzpulslasern liegen zum Beispiel noch weit über denen von Lasersystemen mit Pulsen im ns-Bereich [6]. Gerade im niedrigeren Leistungsbereich sind die Qualitätsvorteile inzwischen bekannt. Allerdings verhindert in vielen Fällen die - im Vergleich zu etablierten Strukturierungsprozessen mit ns-Pulsen - niedrige Abtragsrate eine größere industrielle Umsetzung.

2 Zielsetzung und Herangehensweise

Im einleitenden Kapitel wurde dargestellt, dass die Strukturierung mit UKP-Laser zunehmend an Bedeutung gewinnt und enormes Potential besitzt. Allerdings hemmt unter anderem die bisher erreichte Produktivität dieser Technologie eine stärkere Verbreitung. Die folgenden 3 Aspekte beschreiben einen möglichen Weg diesem Hemmnis zu begegnen und stellen die wesentlichen Ziele dieser Arbeit dar.

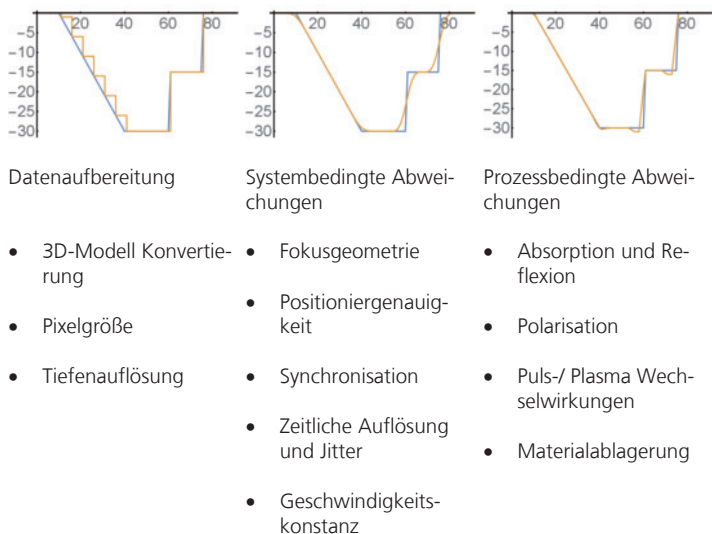
1. Steigerung der Abtragsrate und Ausschöpfung des Potentials der Strukturierung mit Hochleistungs-UKP-Lasern
2. Analyse der Ursachen und deren Gewichtung von Geometrieabweichungen des Abtragsergebnisses
3. Bewertung der Maßnahmen und Konzepte zur Reduktion der Geometrieabweichungen

Aktuelle Hochleistungs-UKP-Laser können mit mittleren Leistungen mit mehr als 1 kW und Pulsfrequenzen mit mehreren Megahertz realisiert werden. Diese Laser erfordern eine adäquate Systemtechnik um die verfügbare Leistung auf dem Werkstück zu verteilen, welche notwendig ist, um die Vorteile der Strukturierung mit Hochleistungs-UKP-Lasern zu nutzen. Für eine qualitativ hochwertige Bearbeitung ist zur Vermeidung von Plasma-wechselwirkungen und negativen Oberflächeneffekten eine materialabhängige maximale Fluenz einzuhalten. Dies verhindert eine Erhöhung der Abtragleistung durch einfache Steigerung der Pulsenergie. Eine Erhöhung der Repetitionsrate dagegen führt bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit zur wiederholten schnellen Beaufschlagung eines Ortspunktes auf dem Werkstück. Die Folge ist eine Wärmeakkumulation und eine Überhitzung bis zur Schmelzbildung.

Aus diesem Grund wurde im ersten Schritt dieser Arbeit ein Laserbearbeitungssystem mit einem Polygonscanner aufgebaut, welches Scangeschwindigkeiten bis zu 360 m/s bei einer Brennweite von 163 mm erreicht. Damit können auch bei hohen Repetitionsraten die Laserpulse örtlich getrennt werden. Die verwendeten Prozessdaten sind Höhenbilder, deren Pixel die gewünschte Abtragtiefe für die jeweilige Bearbeitungsposition spezifizieren. Mit diesem System (beschrieben in Kapitel 4) kann das Potential aktueller UKP-Laser mit hoher mittlerer Leistung ausgenutzt werden, da sinnvolle Puls-zu-Puls Abstände und Pulsenergien auch im MHz-Bereich eingehalten werden können.

Neben der bisher geringen integralen Abtragsrate bei der Strukturierung mit UKP-Lasern sind Prozessungenauigkeiten und Geometrieabweichungen ein weiterer Grund für eine bisher geringe Verwendung der UKP-Technologie.

Abbildung 2:
Kategorien der Ursachen für Geometrieabweichungen und ihre Form



In Abbildung 2 sind die Hauptursachen für Geometrieabweichungen bei der Strukturierung mit gepulster Laserstrahlung aufgeteilt in 3 Kategorien aufgelistet. Zusätzlich ist die prinzipielle Form der resultierenden Geometrieabweichung dieser Kategorien an einem beispielhaften Profil gegenüber dem Sollprofil dargestellt. Die Quantisierungsabweichungen bei der Berechnung der pixelbasierten Prozessdaten im linken Bild führen zu einem stufenförmigen Profil, welches nach der Bearbeitung sichtbar sein kann. Die systembedingten Abweichungen resultieren in einer Verrundung der Kanten und einem flacheren Flankenwinkel der Stufen. Bei den prozessbedingten Abweichungen können z.B. polarisations- und materialabhängige Absorption und Reflexion zu einem reduzierten Flankenwinkel und einer Grabenbildung unterhalb von Stufen führen.

Vertiefend zeigt das Ursache-Wirkungs-Diagramm in Abbildung 3, dass es viele Einflussgrößen gibt, welche das Prozessergebnis zu einem bestimmten Punkt der Arbeitskette beeinflussen.

Wesentlicher Punkt für geometrische Abweichungen ist, wie die Ausgangsdaten vorliegen bzw. erzeugt werden. Das Polygonscannersystem arbeitet mit rasterbasierten Höhenkarten, welche schichtweise in das Material übertragen werden. Die Ausgangsdaten können als 3D-CAD-Daten oder direkt als bildbasierte Textur vorliegen. Die 3D-CAD-Daten müssen in eine Höhenkarte konvertiert werden, da sie nicht direkt von Laserbearbeitungssystemen zur Strukturierung verwendet werden können. Diese Daten müssen vorverarbeitet werden. Das Ergebnis ist eine Höhenkarte mit äquidistantem Raster, dessen Werte die Sollabtragstiefe für diese Position im Bearbeitungsfeld beschreiben. Auf Grund der Pixelgröße und der Tiefenauflösung der Textur bzw. Höhenkarte können hier bereits erste Abweichungen entstehen oder vorliegen.

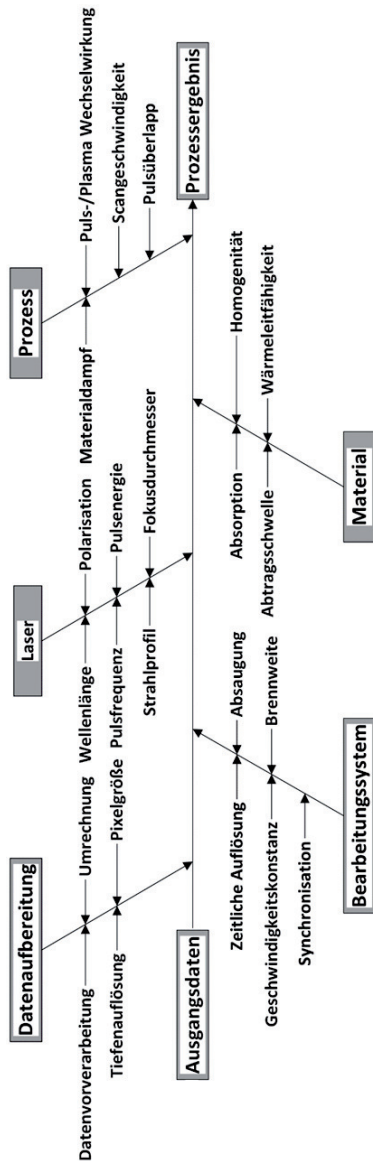
Die nächste potenzielle Abweichungsursache ist das Bearbeitungssystem, da in jedem realen System Positionsabweichungen, eine zeitlich begrenzte

Auflösung des Steuerungssystems und Toleranzen der Fertigung und Montage vorhanden sind. Teil des Bearbeitungssystems ist der Laser, welcher für die Bearbeitung verwendet wird. Es gibt viele größtenteils einstellbare Kenngrößen, wie die Pulsenergie, Pulsfrequenz und Wellenlänge, welche alle einen erheblichen Einfluss auf das Prozessergebnis haben können. Für Napfgeometrien mit trapezförmigen Querschnitt in Oxidkeramik konnte gezeigt werden, dass durch einen größeren Laserfokusedurchmesser und höherer Fluenz die Abtragsrate deutlich gesteigert werden kann. Dieses höhere Abtragsvolumen pro Puls wirkt sich allerdings – in der Simulation und Realität – negativ auf die Maßhaltigkeit der Strukturierung aus, weshalb hier je nach Anforderung ein Kompromiss gefunden werden muss [6].

Das zu bearbeitende Material selbst wirkt sich im Zusammenspiel mit den Bearbeitungsparametern von Laser und Bearbeitungssystem mit seinen Eigenschaften auf das Prozessergebnis und dessen Geometrie aus. Die Bearbeitungsparameter von Laser und Bearbeitungssystem müssen entsprechend dem verwendeten Material und den Anforderungen an das Prozessergebnis eingestellt sein. Anforderungen an das Prozessergebnis sind üblicherweise eine minimale Bearbeitungsdauer bei minimaler Schmelzbildung und maximaler Geometriegenauigkeit. Während des Prozesses können weitere Effekte auftreten, welche sich positiv wie negativ auf das Prozessergebnis auswirken.

Auch wenn die teilweise aufwendigen technischen Möglichkeiten zur Synchronisation der Laserstrahlquelle auf den Polygonscanner oder das aktive Kompensieren von Positionsabweichungen mit Hybridscannern (beschrieben in Kapitel 6.2) verwendet werden, bleibt eine Restungenauigkeit. Die Geometrie des Laserfokus und z.B. ein endlicher Flankenwinkel bleiben zusätzlich immer bestehen, weshalb in vielen Fällen eine perfekte Übertragung der Wunschgeometrie in das Werkstück nicht möglich ist.

Abbildung 3:
Ursache-Wirkungs-
Diagramm der Ein-
flussgrößen auf
das Prozessergeb-
nis



Da sich Abweichungen des Prozessergebnisses von der Sollgeometrie prinzipiell nicht vermeiden lassen, ist es sinnvoll, sie zu kennen. Sind die zu erwartenden Abweichungen und deren Ursachen bekannt, so sollten diese vor dem Prozess bei der Vorverarbeitung der Prozessdaten berücksichtigt werden. Daher ergibt sich die Frage, ob die Geometrieabweichung erzeugter Strukturen mittels einer Hochleistungs-UKP-Laserstrukturierung mit einem Polygonscannersystem mit Hilfe statistischer Fehlerabschätzung modelliert und simuliert werden kann.

Die Prozessdaten für die Strukturierung mit gepulster Laserstrahlung unter Verwendung eines Polygonscannerbearbeitungssystems liegen meist als rasterbasierte Höhenkarten in Form von Bitmaps vor. Aus diesem Grund wird mit Mitteln der digitalen Bild- und Signalverarbeitung die Gesamtübertragungsfunktion des Bearbeitungssystems auf Basis der bekannten statistischen Abweichungen berechnet. Da die Bereiche der Signaltheorie der Elektrotechnik und der optischen Bildtheorie grundsätzlich analog zu betrachten sind, können Methoden und Algorithmen aus beiden Feldern verwendet und kombiniert werden [7].

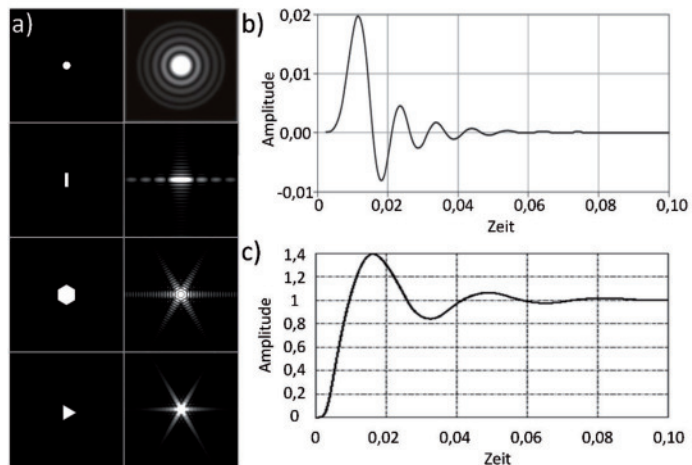
Jede punktförmige Lichtquelle wird bei einer optischen Abbildung durch Beugung und Aperturfehler auf einen Bildfleck abgebildet. Der Zusammenhang zwischen Objektpunkt und Bildpunkt wird durch die Punktspreizfunktion (PSF) beschrieben. Diese Funktion entspricht signaltheoretisch der Impulsantwort eines linearen Systems [8]. Abbildung 4 a) zeigt die Beugung eines Lichtstrahls an verschiedenen Blendengeometrien. Diese Beugungsstrukturen entsprechen der Punktantwort oder Punktspreizfunktion des Systems – in diesem Fall die Blende – für den 2-dimensionalen Fall.

Analog zu der Punktantwort eines Systems im 2-dimensionalen Fall beschreibt die Impulsantwort aus dem Bereich der Systemtheorie die Reaktion eines Systems auf einen unendlich kurzen Impuls für den 1-dimensionalen Fall. Eine exemplarische Impulsantwort eines linearen, zeitinvarianten Systems (LZI-System) 2. Ordnung ist in Abbildung 4 b) dargestellt. Mit Hilfe

der Impulsantwort lässt sich ein lineares, zeitinvariantes System charakterisieren und z. B. dessen Frequenzgang oder Übertragungsfunktion bestimmen. Diese ist bei streng stabilen Systemen die Fourier-Transformierte der Impulsantwort. Da es in der Realität sehr schwer ist einen idealen Impuls zu erzeugen, wird in der Praxis meist ein Sprungsignal verwendet. Die Sprungantwort eines solchen schwingenden Systems beschreibt das zeitliche Integral der Impulsantwort und enthält ebenfalls alle Informationen der Übertragungsfunktion des Systems. Die Sprungantwort eines linearen, zeitinvarianten Systems 2. Ordnung ist in Abbildung 4 c) dargestellt. Die dargestellten Impuls- und Sprungantworten könnten z.B. das Positionierverhalten einer Achse oder das Schaltverhalten eines Laserleistungsmodulators zeigen.

Abbildung 4:
Beispiele von
Übertragungsfunk-
tionen aus ver-
schiedenen
Fachbereichen

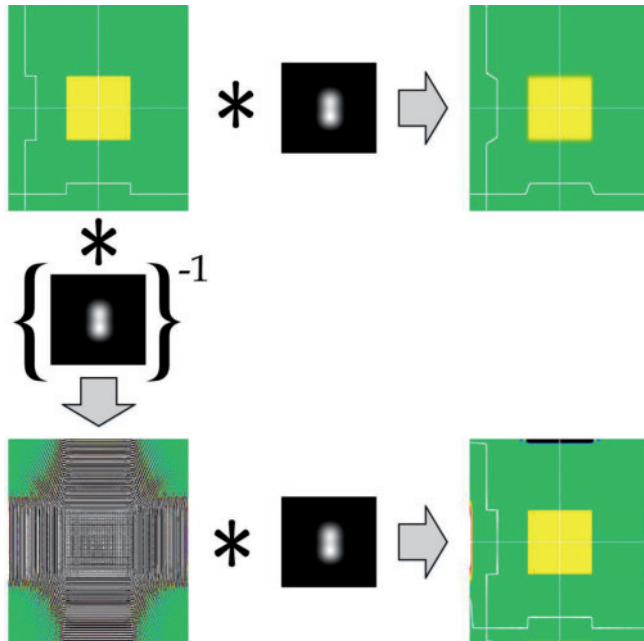
- a) 2-dimensionale
PSF der Optik [9]
,[10]
- b) Impulsantwort
[11] und c)
Sprungantwort
[12] eines LZI-Sys-
tems 2. Ordnung



Mit Hilfe der Punktspreizfunktion, welche im Bereich der Bildverarbeitung unter anderem für die Beschreibung von Abbildungs- und Übertragungsfehlern verwendet wird, lassen sich die zu erwartenden Abweichungen vor dem Prozess durch Faltung der Prozessdaten mit der PSF für das gesamte

Bearbeitungsfeld simulieren. Dieser Schritt ist in Abbildung 5 oben dargestellt. Durch den Einfluss der Punktspreizfunktion wird die Kontur verschliffen bzw. weichgezeichnet, wodurch Kanten verrundet und Stufen abgeflacht werden. Kleinste Strukturen werden deshalb teilweise nicht vollständig übertragen.

Abbildung 5:
Schematischer Re-
chenweg der Fal-
tung der Prozess-
daten mit der PSF
und ideale Vor-
kompensation



Das Wissen um die Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems eröffnet sogar noch weitere Möglichkeiten. In der unteren Hälfte von Abbildung 5 ist das Vorgehen einer Datenvorkompensation dargestellt. Anstatt die Abweichungen nur zu simulieren, könnte die Umkehrfunktion der Systemübertragungsfunktion berechnet werden. Mit Hilfe dieser Umkehrfunktion können die rasterbasierten Prozessdaten vor dem Prozess entsprechend an-

gepasst werden, um die system- und prozessbedingten Geometrieabweichungen zu kompensieren oder zumindest zu vermindern. Im Idealfall werden die Prozessdaten vor dem Prozess so angepasst, dass durch den Prozess die gewünschte Geometrie erhalten wird. Die Vorkompensation könnte als Zusatz oder eventuell sogar anstatt aktiver Kompensationsmaßnahmen verwendet werden. Die Übertragungsgenauigkeit könnte somit im Vorfeld durch eine softwarebasierte Vorverarbeitung der Prozessdaten lokal angepasst und auf teure aktive bzw. hardwarebasierte Maßnahmen verzichtet werden.

3 Prozessgrundlage und Stand der Technik

In Abbildung 6 ist als Beispiel für ein 3D-Relief die Oberflächentopologie der Kontinente dargestellt, welche mit dem in dieser Arbeit aufgebauten Polygonscannersystem in eine Messingplatte graviert wurde. Die dargestellte Größe der Gravur beträgt 45 mm x 70 mm. Die gesamte Gravur hat eine Fläche von 50 mm x 90 mm und eine Tiefe von bis zu 650 µm. Die Bearbeitungsdauer betrug 52 Stunden, da bei dem schichtweisen Abtrag nur 65 nm pro Schicht abgetragen wurden. Die erreichte Abtragsrate von knapp 1 mm³/min spiegelt bei der verwendeten Laserleistung von nur 12 W den Stand der Technik für die Laserstrukturierung mit Ultrakurzpulslasern in diesem Laserleistungsbereich wieder. Dieses Beispiel ist neben den technischen Oberflächen im Bereich der Herstellung von Präge- und Druckplatten oder Werkzeugen wie in Abbildung 1 eine mögliche Anwendung.

Abbildung 6:
Exemplarisches
Strukturierungser-
gebnis mit der To-
pografie der Ko-
ntinente in
Messing



Die Abtragstiefe eines einzelnen Laserpulses ist abhängig von dessen Energieeindringtiefe in das Werkstück. Die Energieeindringtiefe des Laserpulses in das Werkstück wird von der Pulsdauer, Temperaturleitfähigkeit und Ab-

sorptionskoeffizient des abzutragenden Materials beeinflusst. Die thermische Eindringtiefe δ wird abhängig von Temperaturleitfähigkeit k_T des Materials und Pulsdauer t_p mit Hilfe von Formel (1) beschrieben [13, 14].

$$\delta = \sqrt{4k_T t_p} \quad (1)$$

Bei kürzeren Laserpulsen kann auf Grund der kurzen Wechselwirkungszeit die eingebrachte Energie nicht so tief in das Material weitergeleitet werden und ein größerer Temperaturgradient entsteht. Die Entfernung des Temperaturmaximums im Material zum Punkt des Abklingens auf den $e^{-1/2}$ -ten Teil [43] und entsprechend die abgetragene Tiefe verringern sich. Aus diesem Grund sind die erreichbaren Abtragsraten und somit die Produktivität bei der Strukturierung mit ps-Pulsen im Vergleich zur Verwendung von ns-Pulsen deutlich geringer und es muss ein Kompromiss zwischen Volumenabtragsrate und Qualität gefunden werden.

Dieser thermischen Eindringtiefe steht die optische Eindringtiefe nach dem Lambert-Beerschen Gesetz entgegen. Im Pulslängenbereich kleiner 5 ps steigt die Abtragsrate für Stahl auf Grund einer verringerten Abtragschwelle wieder. Das Optimum bei der Strukturierung von Stahl mit ultrakurzen Pulsen bei der Wellenlänge von 1064 nm bezüglich des Abtragsvolumens pro Puls liegt bei knapp 1 ps [15]. Die Abtragstiefe z_{abtr} kann über Formel (2) in Abhängigkeit der eingebrachten Fluenz Φ und der Energieeindringtiefe δ für Fluenzen größer der Abtragsschwellfluenz Φ_{th} berechnet werden [16]. Die Herleitung ist in Anhang A.1 aufgeführt.

$$z_{abtr} = \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_{th}}\right) \quad (2)$$

Für kleine Pulsdauern $t_p < 5$ ps und kleinen Fluenzen ist für δ die optische Eindringtiefe, für große Fluenzen die thermische Eindringtiefe maßgeblich [56]. Das Abtragsvolumen pro Laserpuls kann durch Integration der Abtragstiefe über die Fläche bzw. Energieverteilung des Laserfokus berechnet

werden [21]. Die Spitzenfluenz Φ_0 eines gaußförmigen Laserfokus ist abhängig von der Pulsenergie E_p und dem Radius des Laserfokus ω_0 . Der komplette Rechenweg ist in Anhang A.1 aufgeführt.

$$\Delta V_{Gauß} = \frac{1}{4} \pi \cdot \delta \cdot \omega_0^2 \cdot \ln^2 \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}} \right) \quad (3)$$

$$\text{mit } \Phi_0 = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot \omega_0^2} \text{ und } E_p = \frac{P_M}{f_P} \quad (4)$$

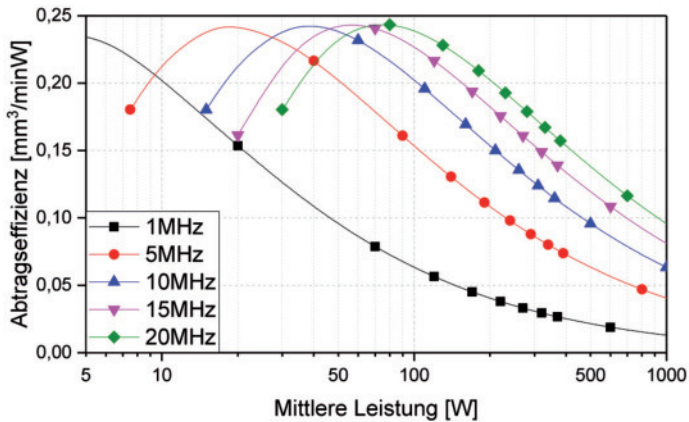
Die Abtragsrate und die Abtragseffizienz für ein gaußförmiges Strahlprofil können nach den Formel (5) und (6) durch einsetzen von (4) in (3) berechnet werden [16]. Die Abtragseffizienz beschreibt die Abtragsrate pro eingesetzter mittlerer Laserleistung P_M und somit den geringsten Wärmeeintrag in das Material.

$$\Delta \dot{V}_{Gauß} = \Delta V_{Gauß} \cdot f_P \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \dot{V}_{Gauß}}{P_M} = \Delta V_{Gauß} \cdot \frac{f_P}{P_M} = \frac{\delta}{2 \cdot \Phi_0} \ln^2 \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}} \right) \quad (6)$$

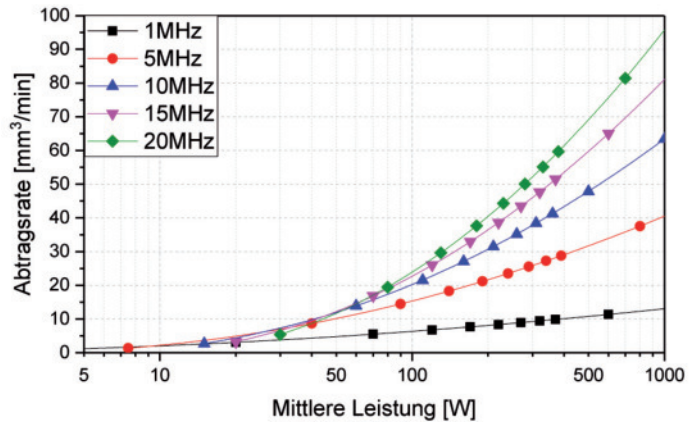
Zu beachten ist, dass das zugrundeliegende Modell Laserleistungen bis zu 3 W und Pulsfrequenzen im Bereich von 25 - 300 kHz verwendet [14]. Bei konstanter Fluenz und konstantem Pulsabstand konnte im Bereich vom 200 kHz bis 1,6 MHz und einer maximalen Scangeschwindigkeit von 3 m/s ein linearer Zusammenhang zwischen Pulsfrequenz und Abtragsrate für Aluminium-Oxidkeramik (Al_2O_3) festgestellt werden [6]. Unter der Annahme, dass der Abtragsprozess auch für größere Pulsfrequenzen und Scangeschwindigkeiten skalierbar ist, sind folgend die theoretisch optimalen Arbeitspunkte und Abtragsraten für Stahl bei Pulsfrequenzen von 1 - 20 MHz gezeigt. Für die Berechnung wurde für Stahl eine Abtragschwelle $\Phi_{th} = 0,08 \text{ J/cm}^2$ und eine Eindringtiefe $\delta = 12 \text{ nm}$ [16], sowie ein Fokusradius $\omega_0 = 20 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Abbildung 7 zeigt unter Verwendung von Formel (6) den optimalen Arbeitspunkt für Stahl, wenn als Kriterium Abtragsrate pro mittlere Laserleistung verwendet wird.

Abbildung 7:
Theoretische Ab-
tragseffizienz für
Stahl



Entsprechend dem verwendeten Modell und Abbildung 7 liegen für Stahl und einen Fokussdurchmesser von $40\text{ }\mu\text{m}$ für den Frequenzbereich von 1 - 20 MHz die theoretischen, optimalen mittleren Laserleistungen im Bereich von 5 - 70 W. Heute liegt die Abtragsrate von Stahl mit ps-Pulsen üblicherweise im Bereich von $1\text{ mm}^3/\text{min}$. Abbildung 8 zeigt die theoretisch zu erwartende Abtragsrate von Stahl. Dieses Potential setzt Systemtechnik voraus, die eine Skalierung des Prozesses in dieser Größenordnung ermöglicht. Ist diese Systemtechnik zur sehr schnellen Verteilung der verfügbaren Laserleistung nicht vorhanden, überhitzt das Material und der hochqualitative, schmelzfreie Abtrag wird wieder schmelzbehaftet und der Qualitätsvorteil geht verloren. Unter der Verwendung einer entsprechenden Systemtechnik, mit der bis zu 1 kW mittlere Laserleistung bei 20 MHz Pulsfrequenz auf dem Werkstück bei gleichbleibender Qualität ausreichend schnell verteilt wird, könnten Abtragsraten von bis zu $95\text{ mm}^3/\text{min}$ für Stahl möglich sein. Hierbei sind keine möglichen Effekte wie die Entstehung von kegelförmigen (englisch: cone-like protrusions, CLP) [17] oder periodischen Substrukturen (LIPSS) [18, 19] und Puls-Plasma oder -Material/Dampfwolke Wechselwirkungen [20, 21] berücksichtigt, welche den Abtrag negativ beeinflussen können.

Abbildung 8:
Theoretische Ab-
tragsrate für Stahl



Heutige Ultrakurzpuls-Laserbearbeitungssysteme zur Oberflächenstrukturierung arbeiten in der Regel weit unterhalb der möglichen maximalen Laserleistung [22]. Der Grund hierfür ist die eingesetzte Systemtechnik mit Galvanometerscannern, welche typischerweise bei Beschriftungsgeschwindigkeiten von bis zu 1 - 4 m/s [23, 24] verwendet werden. Im Linienscan-modus sind inzwischen bis zu 30m/s mit ca. 10 mm Beschleunigungs- und Verzögerungsstrecke realisierbar [24].

Die vorhergehende Betrachtung zeigt, dass mit den üblicherweise verwendeten Galvanometerscannern die inzwischen verfügbare Laserleistung nicht sinnvoll umgesetzt werden kann und neue schnellere Strahlableitungssysteme benötigt werden. Nicht ohne Grund ist eine der technologischen Herausforderungen der kommenden Jahre die Entwicklung von Strahlableitungssystemen mit Ablenkgeschwindigkeiten von mehr als 1000 m/s. Begleitet werden diese Anstrengungen mit schnellen Modulationstechniken und der Synchronisation mit und von hochrepetierenden UKP-Lasern [25].

3.1 Prinzipien der Scanbewegung

Typischerweise werden für die Strukturierung mit UKP-Lasern Galvanometerscanner eingesetzt. Es gibt viele Hersteller mit unterschiedlichen Ausführungsvarianten. Galvanometerscanner lenken den Laserstrahl über zwei auf separaten Motorachsen montierte Spiegel in zwei Richtungen ab. Die Motoren sind in der Regel als Galvanometerantrieb ausgelegt. Eine Prinzipskizze der Anordnung dieser Antriebe vor einer Fokussieroptik ist in Abbildung 9 links dargestellt. Die Vorteile von Galvanometerscannern sind die flexible und frei ansteuerbare Bewegungsbahn bei hoher Genauigkeit und für viele Prozesse ausreichender Geschwindigkeit. Die freie Ansteuerung der Positionen hat den Vorteil, dass Positionen in beliebiger Reihenfolge abgefahren werden können. Hierfür sind allerdings viele Richtungswechsel mit Beschleunigungs- und Bremsvorgängen notwendig, welche die Bearbeitungsgeschwindigkeit auf Grund der vorhandenen Massenträgheit limitieren [26].

Im Gegensatz zu den Galvanometerscannern arbeitet ein Polygonscanner mit einer kontinuierlichen Rotationsbewegung des Polygonrades. Da hierdurch die Beschleunigungs- und Bremsphasen wegfallen, kann mit einer deutlich höheren und konstanten Bearbeitungsgeschwindigkeit gearbeitet werden. Der Polygonscanner lenkt den Laserstrahl entlang einer Achse ab und springt am Ende des Scanfeldes automatisch durch die Verwendung der nächsten Facette wieder an den Anfang zurück.

Die zugehörige Prinzipskizze ist in Abbildung 9 rechts dargestellt. Es muss allerdings prinzipbedingt immer das komplette Scanfeld entlang der Scanrichtung abgefahren werden. Der Polygonscanner ist ein Scanner mit nur einer Ablenkrichtung. Für eine flächige Bearbeitung wird eine weitere Bewegungsrichtung quer zur Scanrichtung benötigt, welche durch das Verfahren des Werkstücks mit einer Achse oder die Kombination mit z.B. einem Galvanometerscanner erfolgen kann.

Abbildung 9:
Vergleich des Auf-
baus von Galvano-
meter- und
Polygonscannern

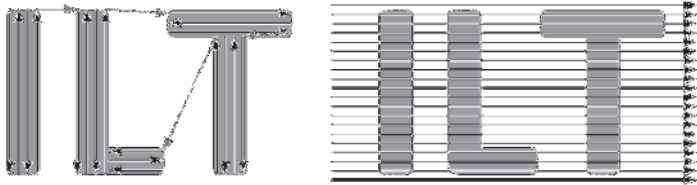
Links: XY-Galvano-
meterscanner

Rechts: Polygo-
nscanner



Grundsätzlich kann für die Laserstrahlablenkung zwischen zwei Bewegungsprinzipien unterschieden werden. Abbildung 10 zeigt das Bewegungsprofil für die vektor- und rasterbasierte Strukturierung eines einfachen Schriftzugs. Üblicherweise werden zum Beschriften vektorbasierte Prozessdaten verarbeitet, da hier nur der zu strukturierende Teil des Scanfeldes abgescannt werden muss. Zwischen einzelnen Bereichen kann auf dem direktesten Weg schnell gesprungen werden (graue Pfeile). Die Kehrseite dieser flexiblen Bearbeitungsstrategie sind häufige Richtungswechsel, welche auf Grund der Massenträgheit der Galvanometerspiegel vergleichsweise viel Zeit in Anspruch nehmen.

Abbildung 10:
Vergleich der
Scanbewegung für
vektorierte und
rasterbasierte Pro-
zessdaten
Links:
Vektorbasiert
Rechts:
Rasterbasiert



Mit Galvanometerscannern sind beide Scanprinzipien oder Mischformen möglich. Mit einem Polygonscanner ist die rasterbasierte Abarbeitung der Prozessdaten vorgegeben. Da Prozessdaten der rasterbasierten Bearbeitung meistens als Bitmap vorliegen, spricht man hier auch häufig von der bitmap-basierten Bearbeitung. Der Polygonscanner scannt das komplette Bearbeitungsfeld immer in seiner vollen Breite und Länge ab. Die Scanrichtung bleibt hierbei konstant.

Die Bearbeitungseffizienz eines Polygonscannersystems ist daher vom Füllgrad der zu strukturierenden Fläche abhängig [27]. Zusätzlich summieren sich richtungsabhängige Artefakte der Strukturierung mit der Anzahl der Bearbeitungsschichten auf. Dies wird bei der Bearbeitung mit Galvanometerscannern vermieden, indem die Strukturen mit unterschiedlichen Schraffurwinkeln erzeugt werden. Dies wäre bei Polygonscannern durch eine mechanische Drehung des Werkstücks und der erneuten Vorverarbeitung der Prozessdaten entsprechend des Rotationswinkels auch möglich, ist allerdings auf Grund der aufwendigen Verzahnung aller beteiligten Systemkomponenten und potenziellen neuen Abweichungsursachen bisher nicht umgesetzt.

4 Aufbau des Polygonscannersystems

Für die flächige Strukturierung mit hochrepetierenden UKP-Hochleistungslasern wurde ein Polygonscannersystem aufgebaut. Durch die konstante Rotationsgeschwindigkeit des Polygons können sehr hohe Laserstrahl-ableitungsgeschwindigkeiten erreicht werden, welche für einen geringen bzw. keinen Pulsüberlapp bei dieser Art von Laserstrahlquellen benötigt werden. Prinzipbedingt lenkt der Polygonscanner den Laserstrahl entlang einer Linie ab und springt mit dem Beginn der nächsten Linie wieder an den Anfang des Scanfeldes. Durch eine synchronisierte Bewegung des Werkstücks senkrecht zur Scanrichtung, kann das Werkstück flächig bearbeitet werden.

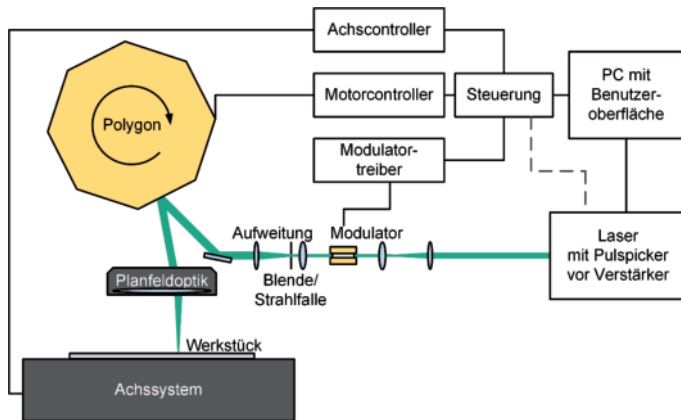
4.1 Systemübersicht

Abbildung 11 zeigt die relevanten Komponenten des Polygonscannersystems. Das System besteht aus einem PC, auf dem die Benutzeroberfläche und Datenvorverarbeitung läuft. Diese Software kommuniziert mit der Echtzeitsteuerung und allen anderen Komponenten für deren Konfigurationseinstellungen. Hier laufen nur nicht echtzeitrelevante Prozesse. Die Echtzeitsteuerung übernimmt die Ansteuerung des Polygoncontrollers und des Lasermodulators, welcher innerhalb des Lasers oder nachgelagert sein kann. Es erfolgt eine Synchronisation der Ablenkung durch den Polygonscanner mit der Achsbewegung und gegebenenfalls den Laserpulsen.

Der Laserstrahl wird je nach Anforderung und Eigenschaften des Ausgangsstrahls des Lasers mit Hilfe eines Teleskops auf den gewünschten Strahldurchmesser eingestellt. Mit Hilfe eines elektro-optischen oder akusto-optischen Modulators können die Laserpulse in eine Strahlfalle geleitet oder in Richtung Werkstück durchgelassen werden. Der Laserstrahl wird über mehrere Spiegel in den Bearbeitungskopf geführt. Modulator

und Strahlfalle können auch Teil des Lasersystems sein und müssen in diesem Fall nicht extern hinzugefügt werden. Für die Prozessentwicklung und Systemvalidierung wurde ein Ultrakurzpuls laser der Firma Amphos verwendet. Dieser ermöglicht die Bearbeitung mit bis zu 400 W mittlerer Leistung, 40 MHz Pulsfrequenz und Pulslängen im Bereich von 1 - 10 ps [57].

Abbildung 11:
Systemskizze des
Polygonscanner-
systems mit den
Hauptkomponen-
ten



Das Polygon ist fest in einem Gehäuse verbaut und dreht im Betrieb mit konstanter Geschwindigkeit. Hierdurch wird der stehende Laserstrahl entlang einer Linie abgelenkt und mit Hilfe des Planfeldobjektivs, auf das Werkstück fokussiert. Das Werkstück wird mit Hilfe der zweiten Achse senkrecht zur Scanrichtung des Polygonscanners bewegt, so dass eine flächige Bearbeitung des Werkstücks erreicht wird. Zusätzlich verfügt das System über eine Achse zum Einstellen des Arbeitsabstandes, so dass die Bearbeitung in der Fokusebene sichergestellt werden kann.

Die Anforderungen, Randbedingungen und technischen Kennzahlen des Polygonscannersystems sind nachfolgend in Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Kennzahlen des Polygonscannersystems

Spezifikation	Anforderung	Randbedingung	Realisierte Kennzahl
Wellenlänge	1064 nm, andere möglich	Beschichtungen Optiken und Polygon	1030 - 1090 nm
Brennweite	typ. 163 mm	Verfügbare Fokussieroptiken	163 mm / 80 mm getestet
Eingangsapertur	≥ 14 mm	Maximale Breite des Polygons und maximal akzeptierter Rohstrahl des Objektivs	20 mm
Scanfeldbreite	≥ 100 mm (für $f = 163$ mm)	Maximaler Scanwinkel mit Telezentriefehler $\leq 5^\circ$	106 mm (für $f = 163$ mm)
Scangeschwindigkeit	≥ 200 m/s (für $f = 163$ mm)	Maximale Drehzahl des Polygons	17 - 360 m/s (für $f = 163$ mm)
Bearbeitungslänge	≥ 100 mm	Verfahrweg der Achse und Speicher der Steuerung	200 mm
Zeitliche Auflösung der Steuerung	≤ 50 ns	Ausführzeit des Programmcodes	12,5 ns
Laterale Auflösung	Entsprechend Pixelgröße 5 - 30 μm	-	typisch 5 - 30 μm
Wiederholgenauigkeit	-	Fertigungs- und Synchronisationstoleranzen der Komponenten	Scanrichtung: ± 10 μm Vorschubrichtung: ± 25 μm Für Pixelgröße 15 μm , Pulsfrequenz 6,3 MHz und Brennweite 163 mm

Effizienz	maximal	Rohstrahl muss immer vollständig auf einer Facette des Polygons sein	56,8% (für 163 mm Brennweite und 15 mm Rohstrahldurchmesser)
Polygondurchmesser	-	≤ 150 mm	150 mm
Anzahl Facetten	-	Optimum der optischen Auslegung	11
Ablenkwinkel	-	Maximaler Akzeptanzwinkel des Objektivs und Anzahl Facetten	$\pm 32^\circ$ (optisch)
Drehzahlbereich	-	Resultierende maximale Scangeschwindigkeit	500 - 10.500 U/min
Linienfrequenz	-	Maximale Drehzahl des Polygons	90 - 1925 Hz
Achsvorschub	-	Scangeschwindigkeit und Linienabstand	typisch 2 - 50 mm/s

4.2 Auslegung des Polygonscanners

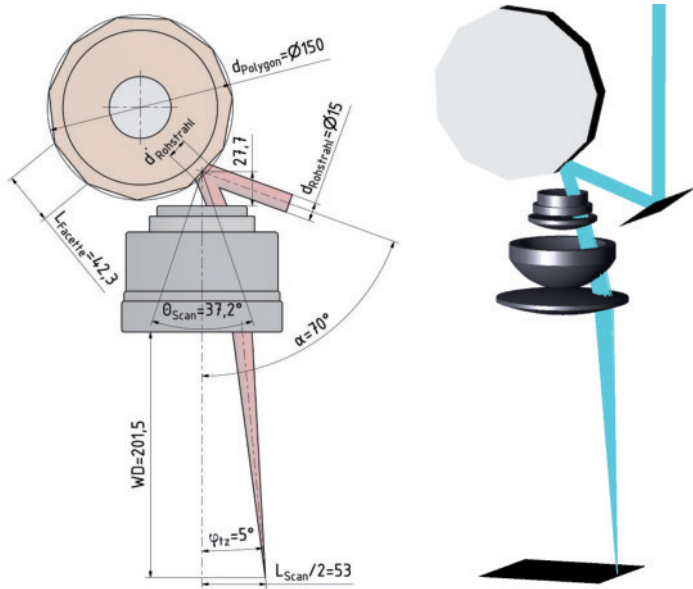
Die Berechnung und Auslegung eines Polygonscannersystems beginnt mit der Definition des nutzbaren Scanwinkels [28], da ein kommerziell verfügbares F-Theta Objektiv verwendet werden soll. F-Theta-Objektive sind Flachfeldobjektive, welche sich idealerweise durch einen zum Scanwinkel proportionalen Versatz des Laserstrahls mit einem Brennpunkt in der Arbeitsebene senkrecht zur optischen Achse des Objektivs auszeichnen. Aufgrund seiner Eckdaten der für die Bearbeitung interessanten Brennweite von 163 mm und einem relativ großen Scanwinkel von bis zu $\pm 22,9^\circ$ (optisch) und einer Apertur von 15 mm wurde das F-Theta Objektiv S4LFT3162/328 von Sill ausgewählt. Die Simulation des maximal zulässigen Telezentriefehlers φ_{tz} des Objektivs von 5° zeigt einen nutzbaren Scanbereich θ_{scan} von $\pm 18,6^\circ$ mit einer Scanlänge L_{scan} von 106 mm bei einem Rohstrahldurchmesser $d_{Rohstrahl}$ von 15 mm (Weitere Details der Simulation befinden sich in Anhang A.2).

Abbildung 12 links zeigt die realisierte Anordnung von Polygonscanner, Fokussieroptik und des Lasereingangsstrahls zueinander sowie die relevanten Parameter zur Auslegung des Polygons. In Abbildung 12 rechts ist die optische Simulation des realisierten Polygonscannerbearbeitungskopfes dargestellt. Über mehrere Spiegel wird der Laserstrahl auf das Polygon geleitet. Der Winkel zwischen der optischen Achse des Objektivs und dem auf dem Polygon auftreffenden Laserstrahl α beträgt 70° . Die Wahl dieses Winkels ist begrenzt durch eine mögliche Abschattung des Strahlengangs auf Grund der geometrischen Ausdehnung des Objektivs. Der Abstand des Reflexionspunktes des Laserstrahls auf dem Polygon zur Eingangsapertur der Fokussieroptik ist mit 27,7 mm durch die Spezifikation des Objektivs vorgegeben.

Abbildung 12:
Optische Auslegung
des Polygon-
nscanners

Links: Skizze der
Komponentenan-
ordnung der Scan-
nerauslegung

Rechts: Zemax Si-
mulationsbild des
Strahlengangs der
realisierten Polygo-
nscanneroptik



Der Wirkungsgrad des Polygons beschreibt den prozentualen Anteil der nutzbaren Laserleistung und wird durch das Verhältnis des nutzbaren Winkelbereiches zu einer vollen Umdrehung des Polygons - definiert durch den maximalen Duty Cycle - beschrieben. Innerhalb der nicht nutzbaren Winkelbereiche trifft der Laserstrahl gleichzeitig auf zwei angrenzende Facetten oder befindet sich außerhalb des nutzbaren Winkelbereichs des Objektivs. In beiden Fällen ist der Laserstrahl über den Modulator in eine Strahlfalle zu leiten und wertvolle Laserenergie geht verloren. Aus diesem Grund ist bei der Auslegung des Polygonrades ein maximaler Wirkungsgrad der Polygon-Objektiv-Kombination anzustreben.

Die Berechnung des Wirkungsgrades des Polygons $DC_{\text{Scanwinkel}}$ in Abhängigkeit des Scanwinkels und der Facettenzahl erfolgt mit Formel (7) [28], wobei n_{Facetten} die Anzahl der Facetten und θ_{Scan} der nutzbare Scanwinkel sind.

Dieser Berechnungsansatz beschreibt eine Anordnung von Polygonscanner, Objektiv und eingekoppeltem Laserstrahl, wie in Abbildung 12 dargestellt. Hieraus ergibt sich für den maximal zulässigen Scanwinkel des Objektivs von $\pm 18,6^\circ$ (optisch) ein maximaler Wirkungsgrad von 98% bei 19 Facetten.

$$DC_{Scanwinkel} = \frac{n_{Facetten} \cdot \theta_{Scan}}{720^\circ} \quad (7)$$

Eine weitere Randbedingung ist der maximale Durchmesser des Polygons von 150 mm, welcher durch die in diesem Projekt vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten der Firma Kugler Precision GmbH gegeben ist. Die Facettenlänge $L_{Facette}$ berechnet sich entsprechend Formel (8). Die Polygoneffizienz in Abhängigkeit der Facettenlänge $DC_{Facettenlänge}$ berechnet sich nach Formel (9) [28]. Zur Sicherheit sollte ein Millimeter auf den projizierten Rohstrahldurchmesser gerechnet werden, um eine Kantenverrundung der Facettenübergänge zu berücksichtigen [28]. Diese Formeln beschreiben, dass möglichst lange Facetten und ein entsprechend großer Polygondurchmesser $d_{Polygon}$ für einen hohen Wirkungsgrad nötig sind. Zusätzlich ist der Durchmesser der Projektion des Laserstrahls $d'_{Rohstrahl}$ auf den Facetten möglichst gering zu halten.

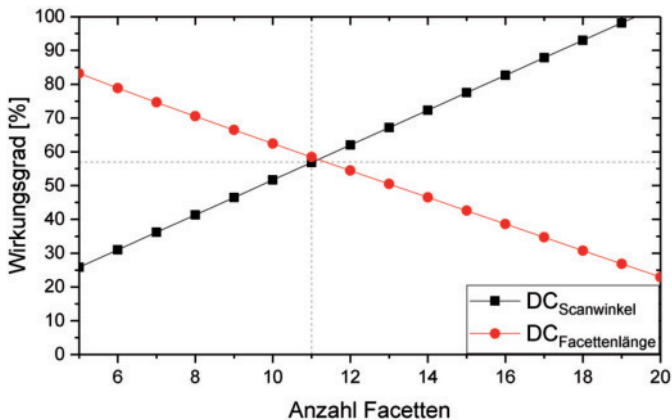
$$L_{Facette} = \tan \frac{180^\circ}{n_{Facetten}} \cdot d_{Polygon} \quad (8)$$

$$DC_{Facettenlänge} = 1 - \frac{d'_{Rohstrahl} + 1\text{mm}}{L_{Facette}} \quad (9)$$

Abbildung 13 zeigt den Verlauf des Polygonwirkungsgrads für die beiden Randbedingungen in Abhängigkeit der Facettenzahl. Bei der optimalen Facettenzahl entsprechend des maximalen Scanwinkels ergibt sich durch den maximal fertigbaren Polygondurchmesser von 150 mm und einem Rohstrahldurchmesser von 15 mm ein Wirkungsgrad von nur 25%. Die bestmögliche Auslegung ist der Schnittpunkt der beiden gegenläufigen Kurven. Hierdurch ergibt sich ein maximaler Wirkungsgrad des Polygons von 57%

bei 11 Facetten. Möglichkeiten den Wirkungsgrad zu erhöhen, sind ein Objektiv mit größerem Scanwinkel, einen kleineren Strahldurchmesser auf dem Polygon oder einen größeren Polygondurchmesser zu verwenden [28]. Ein größerer, nutzbarer Scanwinkel verschiebt $DC_{\text{Scanwinkel}}$ nach links, während ein größerer Polygondurchmesser die Kurve $DC_{\text{Facettenlänge}}$ nach rechts verschiebt. Ein kleinerer Laserstrahldurchmesser auf dem Polygon hat einen positiven Effekt auf beide Kenngrößen.

Abbildung 13:
Wirkungsgrad des
Polygons in Ab-
hängigkeit der Fa-
cettenzahl



Ein Design mit 12 Facetten würde entsprechend Abbildung 13 den Wirkungsgrad des Polygons auf 60% erhöhen. Damit dieser Wirkungsgrad auch erreicht werden kann, muss die Projektion des Laserstrahls auf dem Polygon auf 15 mm reduziert werden. Dies könnte nur erreicht werden, indem der Rohstrahldurchmesser entsprechend verringert oder der Auftreffwinkel auf 0° reduziert wird [29]. Letzteres ist auf Grund der Größe und Lage des Objektivs bei dieser Anordnung nur möglich, wenn der Laserstrahl von unten durch das Objektiv eingekoppelt wird. 11 Facetten sind ein optimaler Kompromiss bezüglich des erreichbaren Wirkungsgrades des

Polygonscanners unter Berücksichtigung der Randbedingungen der geometrischen Anordnung, Fertigungsmöglichkeiten und verfügbarer F-Theta-Objektive.

4.3 Prozessdaten für die schichtweise Tiefenstrukturierung

Bei der Bearbeitung mit dem Polygonscannersystem wird der Laserstrahl wiederholt entlang einer Linie abgelenkt, welche durch den Vorschub der Achse relativ zum Werkstück verschoben wird. Auf diese Weise werden die rasterförmigen Prozessdaten Bildzeile für Bildzeile zu einer Fläche während einer Überfahrt aufgespannt. Bei der Strukturierung mit Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern wird pro Überfahrt mit dem Laser über das Werkstück nur eine sehr geringe Tiefe abgetragen. Die Abtragstiefe pro Überfahrt beträgt je nach Material und Prozessparametern typischerweise zwischen 50 nm und 1 µm. Das Bearbeitungsfeld muss viele Male überfahren werden, um die gewünschte Abtragstiefe und Topografie Schicht für Schicht abzutragen.

In Abbildung 14 sind schematisch 3 mögliche Datenformen von Prozessdaten möglich. Links ist ein 3D-Modell mit beispielhaften Vertiefungen dargestellt. Diese Topografie muss in der Datenvorverarbeitung in Schichten in Richtung der Abtragstiefe unterteilt werden. Die Schichtdicke richtet sich hierbei nach der gewünschten Tiefenauflösung, dem Material und der verfügbaren Laserleistung. Rechts oben in Abbildung 14 sind exemplarisch 10 binäre Schichten dargestellt. In den farbigen Bereichen soll der Laser für den Abtrag auf das Werkstück geleitet werden, um an diesen Stellen Material abzutragen. In den transparenten Bereichen der Schichten muss der Laserstrahl ausgeschaltet sein.

Bei der Datenvorverarbeitung der CAD-Daten können die einzelnen Schichtbilder für die spätere Strukturierung abgespeichert oder zu einer Höhenkarte zusammengefasst werden, wie sie in Abbildung 14 rechts unten dargestellt ist. Der Grauwerte des Pixels definiert die designte Abtragstiefe für diese Stelle des Bearbeitungsfeldes und beschreibt wie viele

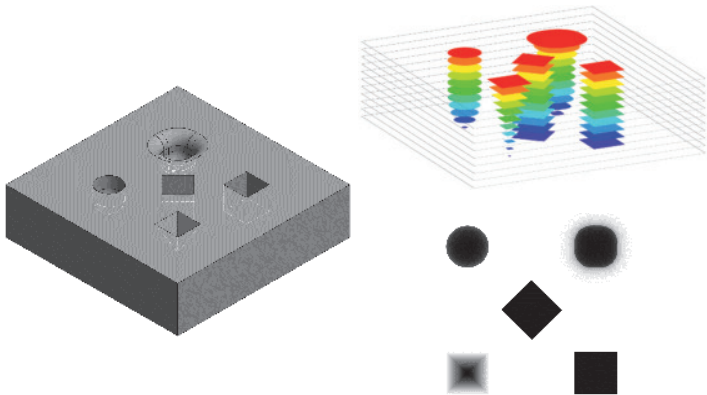
Schichten der Laser an dieser Stelle eingeschaltet sein soll. Alternativ kann die gewünschte Struktur bereits als Höhenkarte bzw. Graustufenbild vorliegen. Die einzelnen Schichtbilder werden aus den Graustufenbildern über eine Schwellwertanalyse für jeden Grauwert berechnet.

Abbildung 14:
Mögliche Darstellungen der Prozessdaten für die schichtweise Tiefenstrukturierung

Links: 3D Modell

Rechts oben: Schematische Darstellung der Schichten der Strukturierung

Rechts unten: Sol-
labtragstiefen zusammengefasst als Höhenkarte



Jede Laserstrukturierungsanlage mit gepulster Laserstrahlung arbeitet mit diesen binären Schichtbildern. Allerdings unterscheidet sich die Datenvorverarbeitung und Speicherung der Prozessdaten erheblich. Viele Maschinenhersteller berechnen alle binären Schichtbilder im Vorfeld und speichern diese gemeinsam mit den Scanner- und Maschinenprogrammen ab. Die Maschine behandelt während der Strukturierung jede Schicht als Einzelprozess an definierten Maschinenpositionen und lädt die Schichtbilder entsprechend von der Festplatte.

Ein alternativer Ansatz, wie er bei der Programmierung des Polygonscannersystems verwendet wird, ist die Höhenkarte komplett zu laden und die binären Schichtbilder über eine Schwellwertanalyse während der Bearbeitung zu berechnen.

Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Prozessdaten bitcodiert und nicht jede Schicht als Einzelbild gespeichert werden müssen. Auf diese Art

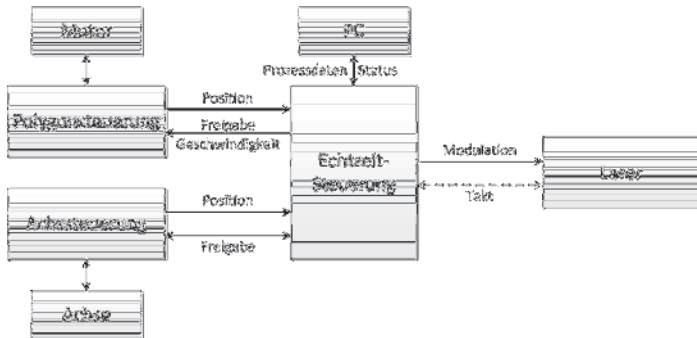
können pro Pixel bis zu 65.535 Schichten in einem 16 Bit Wert gespeichert werden. Die Einzelbilder der Schichten belegen hingegen für jeden Pixel 1 Bit pro Schicht, was bei 1000 Schichten bereits 125 Bytes pro Pixel bedeutet. Die codierte Variante benötigt hingegen lediglich 2 Bytes pro Pixel auf der Festplatte.

Am Beispiel eines typischen Bearbeitungsfeldes des Polygonscanners von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ mit einer Auflösung von $15 \text{ }\mu\text{m}$ sind die Graustufenbilder 6666×6666 Pixel bzw. 44,4 Megapixel groß und belegen bei einer Tiefenauflösung von 16 Bit auf der Festplatte und im Arbeitsspeicher 88,8 MB. Die einzelnen Schichtbilder belegen auf der Festplatte für 1000 Schichten insgesamt 5,5 GB und für 5000 Schichten 27,8 GB, wobei die Schichtbilder nacheinander in den Arbeitsspeicher geladen werden und dort jeweils nur 5,5 MB belegen.

4.4 Steuerung

Die wichtigste Eigenschaft des Polygonscannersystems zur Strukturierung mit UKP-Hochleistungslasern ist es, die gewünschte Struktur oder Topografie mit hoher Präzision in das Werkstück zu übertragen bzw. abzutragen. Hierfür ist es wichtig, die Laserpulse an die richtigen Stellen zu platzieren. Dies kann nur erfolgen, wenn alle Komponenten des Systems zueinander zeitlich synchronisiert sind. Pulsfrequenzen von aktuell bis zu 20 MHz erfordern eine Steuerung mit mindestens der gleichen Taktrate. In Abbildung 15 sind die prozessrelevanten Schnittstellen der Echtzeitsteuerung dargestellt. Die Steuerung muss die Positionssignale der Vorschubachse und des Polygonrades erfassen, auswerten, um die Laserpulse entsprechend den hinterlegten Prozessdaten zu modulieren. Die Synchronisierung der Laserpulsfrequenz und des Steuerungstaktes ist optional. Zusätzlich ist eine gegenseitige Freigabe zwischen Achssystem und Steuerung vorhanden, so dass diese beiden Teilsysteme darauf warten, dass der jeweilige Partner für die nächste Bearbeitungsschicht bereit ist. Auf diese Art kann der Prozess auch für Kontrollen zwischen den Schichten pausiert werden.

Abbildung 15:
Schnittstellen und
Signalflüsse der
Echtzeitsteuerung



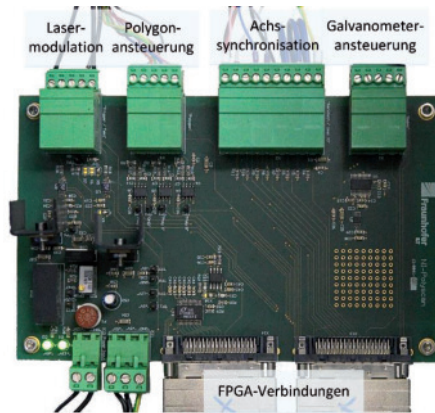
Industriesteuerungen werden typischerweise mit Zykluszeiten von 1 – 10 ms betrieben. Neuere PC basierte Steuerungen können auch Zykluszeiten bis zu 50 μ s erreichen [30]. Mit Steuerungssystemen der Firma Beckhoff sind dank der XFC Technologie für einfache Systeme Zyklusfrequenzen von bis zu 80 kHz mit einer I/O-Ausgaberate von 1 μ s durch Überabtastung realisierbar [31]. Selbst diese sehr schnellen Steuerungen arbeiten mit einer 250-mal langsameren Zyklusfrequenz als sie für diese Anwendung mit maximal 20 MHz benötigt wird. Die Firma Nextscan hat gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Steuerung nicht mit der Laserpulsfrequenz von z.B. 8,2 MHz, sondern mit der Oszillatorfrequenz zu betreiben, welche z.B. 82 MHz betragen kann [32, 33]. Aus diesem Grund erfolgt die Implementierung der Echtzeitsteuerung auf einem FPGA und nicht auf einer Industriesteuerung. Durch die Programmierung der Verschaltung der vorgegebenen Elemente wird die Funktionsweise einzelner Blöcke im FPGA und deren Verschaltung untereinander festgelegt. Bei einem FPGA muss für jede Operation ein eigenes Stück Hardware synthetisiert bzw. zu einem Rechenverbund verschaltet werden [34]. Die Hardwareblöcke implementierter Operationen arbeiten parallel und sind nur über Speicherregister und den Systemtakt gekoppelt. Auf diese Art erhält man ein absolut deterministisches Steuerungssystem, auf welchem die notwendigen Berechnungen parallel und mit geringer Latenz erfolgen. Das Hinzufügen weiterer Funktionen in den Steuerungsablauf hat keinen Einfluss auf die Laufzeit

der bereits getesteten Funktionen, wie es bei einer softwarebasierten Steuerung mit einer sequenziellen Abarbeitung der Operationen auf CPUs oder Mikrocontrollern der Fall wäre.

Die Umsetzung der Steuerung erfolgt mit LabView auf einem FlexRio FPGA-System der Firma National Instruments. Diese Hardwareserie verfügt über zwei 256 MB große Arbeitsspeicherblöcke, die separat über das FPGA beschrieben und gelesen werden können. Dieser Arbeitsspeicher wird für das Speichern der kompletten Prozessdaten in der Echtzeitsteuerung verwendet. Für jede Bearbeitungsschicht muss ein Binärbild zur Ansteuerung des Lasers berechnet werden, welches während der Bearbeitung im FPGA berechnet wird.

Sollte der Speicher für das gesamte Bearbeitungsfeld nicht ausreichen, so können zum Beispiel die beiden Speicherbereiche im Wechsel verwendet und die Daten für den nächsten Bereich nachgeladen werden. Das komplette Nachladen kann in weniger als 5 Sekunden erfolgen, während bei dieser Bearbeitungsfeldgröße die Bearbeitungsdauer je nach Prozessdatenstrategie zwischen mehreren 10 Sekunden oder Stunden beträgt. Für einfachere Steuerungsaufgaben mit dem Polygonscanner kann auf günstigere FPGA-Hardwarevarianten ohne Arbeitsspeicher zurückgegriffen werden, ohne die Steuerungsprogrammierung stark verändern zu müssen.

Abbildung 16:
Aufsicht der Steuerungsinterface-
platine zur
Signalverteilung
und Wandlung der
Signale des FPGAs



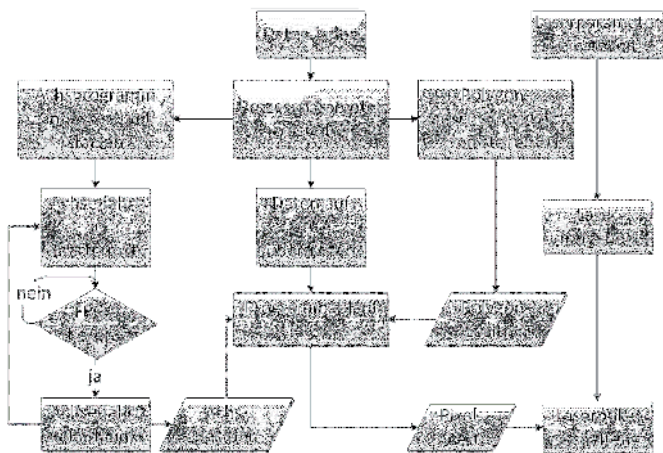
Das FlexRio-System besitzt eine Reihe digitaler Ein- und Ausgänge, welche zur Interaktion mit den anderen Systemkomponenten gepuffert oder verstärkt werden müssen. Außerdem sind diese Signale nur auf kompakten Steckverbindern verfügbar. Aus diesem Grund wurde eine Platine zur Signalaufbereitung und -Verteilung – dargestellt in Abbildung 16 – entwickelt, welche z.B. die differentiellen Encodersignale des Polygonmotors zu TTL-Signalen konvertiert, zwei Treiber zur Laseransteuerung, zwei Analogausgänge zur Ansteuerungen zweier Galvanometerscanner neben einigen digitalen Ein- und Ausgängen auf getrennten Steckverbindern und Schraubklemmen zur Verfügung stellt.

4.4.1 Programmablauf

In Abbildung 17 ist das grundsätzliche Vorgehen zur Strukturierung mit dem Polygonscannersystem dargestellt. Als erstes müssen die Prozessdaten bzw. Geometrie geladen werden. Diese muss als Bild mit den Grauwerten als Tiefeninformation vorliegen. Anhand der Prozessparameter Laserpulsfrequenz, Puls- und Linienabstand wird die Polygonsollgeschwindigkeit berechnet und das Polygon auf die entsprechende Drehzahl geregelt. Für die zweite Achse wird mit den weiteren Parametern Anfangsposition der Be-

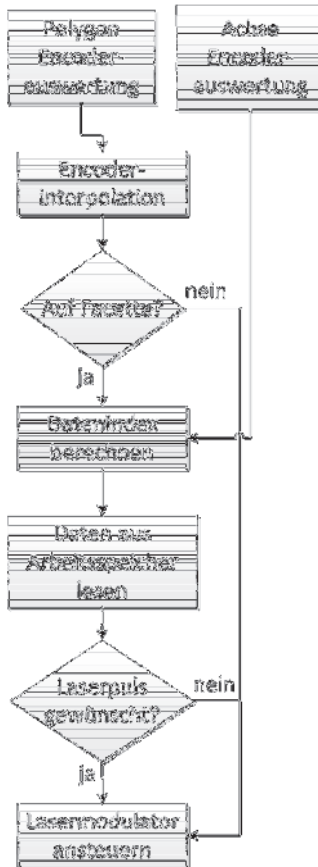
arbeitung, Bildgröße und Anzahl Schichten ein Programmablauf automatisch erstellt und die Achse auf die Startposition gefahren. Parallel hierzu muss der Benutzer die entsprechenden Parameter am Laser einstellen und diesen freigeben. Die Laserkonfiguration ist nicht Teil des Steuerungsprogramms, um verschiedene Laser mit dem Polygonscannersystem zu verwenden.

Abbildung 17: Ablaufdiagramm der Prozessvorbereitung und Durchführung



Nachdem die Prozessdaten auf das FPGA übertragen wurden, kann der Prozess gestartet werden. Das Steuerungsprogramm des FPGAs gibt die Überfahrt für die nächste Schicht frei und die Achse folgt diesem Befehl. Entsprechend der Positionen der Achse und des Polygons und den zugehörigen Prozessdaten erhält der Laser ein Signal zum Selektieren der Pulse.

Abbildung 18:
Programmablauf
der Hauptschleife
der FPGA-Steuerung



Der in Abbildung 17 enthaltene Programmablauf wird in einer Schleife auf dem FPGA abgearbeitet und ist in Abbildung 18 abgebildet. Die einzelnen Schritte der Datenverarbeitung, dargestellt als Operationen und Entscheidungen im Ablaufdiagramm, werden parallel ausgeführt und die Zwischenergebnisse über Pufferregister mit dem nächsten Takt an den nächsten Verarbeitungsschritt weitergegeben. Während der nächste Bearbeitungsschritt diese Daten weiterverarbeitet, berechnet der erste Bearbeitungsschritt parallel den nächsten Datensatz. Durch dieses Pipelining können die Verarbeitungsschritte auf dem FPGA mit einer Taktfrequenz von bis zu 80 MHz mit einer Gesamtdurchlaufzeit von 7 Takten erreicht werden.

Im ersten Verarbeitungsschritt werden die Positionen der Achse und des Polygons erfasst. Da die Auflösung des Polygonmotorencoders nicht ausreichend ist, wird die Position des Encoders

mit bis zu einem 1/100 tel der Encoderauflösung interpoliert. Auf Grund der konstanten Geschwindigkeit des Polygons ist dieses Vorgehen zulässig. Über den Vergleich der Polygonposition und der hinterlegten Facettenkonfiguration wird die aktuell verwendete Facette ermittelt. Entsprechend der Achs- und Polygonscannerposition wird der Datenindex berechnet und die entsprechenden Daten aus dem Arbeitsspeicher des FPGAs ausgelesen. Die

Steuerung zählt die Anzahl der Überfahrten. Ist der geladene Datenwert für die aktuelle Bearbeitungsposition größer als die aktuelle Überfahrtsnummer so wird der Laser zur Bearbeitung an dieser Stelle freigegeben. Screenshots der Benutzeroberfläche zu der in Abbildung 17 und Abbildung 18 beschriebenen Programmabläufe befinden sich in Anhang A.4.

Bevor der Lasermodulator angesteuert wird, erfolgt eine Prüfung, ob der Laser entsprechend den Sicherheitsvorkehrungen freigegeben ist und ob die maximale Modulationsfrequenz des Modulators eingehalten wird. Letzteres ist bei manchen elektro-optischen Modulatoren notwendig um den Treiber des Modulators vor Überhitzung und Beschädigung zu schützen [35].

4.5 Kennwerte und erste Prozessergebnisse mit dem Polygonscannersystem

Das aufgebaute Polygonscannersystem besitzt eine maximale Drehzahl von 10.500 U/min, was einer maximalen Scangeschwindigkeit von 360 m/s unter Verwendung einer Brennweite von 163 mm entspricht. Die Scanfeldbreite in x-Richtung beträgt 106 mm und die maximale Bearbeitungslänge in y-Richtung ist durch den Verfahrbereich der Achse auf 200 mm begrenzt. Aktuell wird nur eine Speicherbank des FPGAs genutzt, weshalb die Bearbeitungsdatei auf 125 Megapixel reduziert ist. Dies entspricht einem Bearbeitungsfeld von $110 \times 110 \text{ mm}^2$ mit $10 \mu\text{m}$ oder $110 \times 250 \text{ mm}^2$ mit $15 \mu\text{m}$ Auflösung. Die Anzahl der Schichten ist auf 65.535 limitiert. Die in Abbildung 18 dargestellte Schleife der Polygonscannersteuerung arbeitet mit 80 MHz, was eine zeitgenaue Ansteuerung der Laserpulse erlaubt. Die Durchlaufzeit von 7 Takten stellt kein Problem dar, da diese Verzögerung auf Grund der konstanten Drehgeschwindigkeit des Polygons mit dessen Positionswert verrechnet werden kann.

Für die Validierung des Polygonscannersystems wurde eine Bearbeitungsmaschine realisiert. In Abbildung 19 links ist die Außenansicht der Maschine der Lasersicherheitsklasse 1 (keine Gefährdung von Personen bei geschlossener Tür) dargestellt.

Abbildung 19:
Ansichten des rea-
lierten Polygo-
nscannersystems

Links: Außen-
sicht der Gesamt-
anlage

Rechts: Innen-
sicht des Bear-
beitsraumes

[Bildquellen:
Fraunhofer ILT,
Aachen / Wolf-
gang Schwager]



Rechts sind der Polygonscanner und die bewegte Werkstückplattform auf dem Achssystem zu sehen. Scankopf, Achssystem, Strahlmanipulation, Steuerung, PC und falls möglich der Laser befinden sich innerhalb Gehäuses der Gesamtanlage. Das Gehäuse ist in verschiedene Bereiche unterteilt, so dass ideale Bedingungen für den jeweiligen Aufgabenbereich der dort montierten Komponenten vorliegen. Ist der Laser nicht innerhalb des Gehäuses montierbar, so kann der Strahl durch eine Apertur von hinten in die Anlage geleitet werden. Das Gehäuse besitzt im geschlossenen Zustand die Schutzklasse 1 und ist mit einem Druckluft- und Absaugungssystem ausgestattet. Der Scankopf und die Optikbereiche werden mit sauberer Luft gespült, um Verschmutzungen so gering wie möglich zu halten.

In Abbildung 20 ist ein erstes Beispiel der Strukturierung von Testgeometrien mit dem Polygonscannersystem gezeigt. Oben ist die Höhenkarte der Prozessdaten farblich codiert dargestellt. Die untere Hälfte zeigt die Höhenkarte des Prozessergebnisses. Die gewählten Testgeometrien stellen eine Auswahl verschiedener Struktureigenschaften dar. Die Struktur links

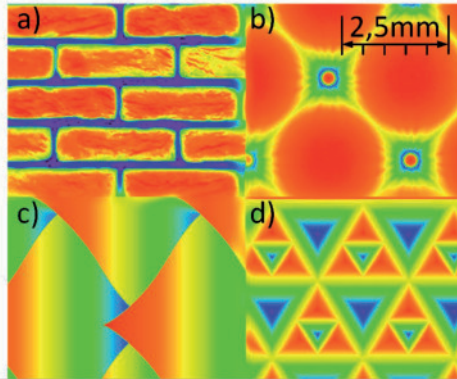
oben (a) ist die Struktur einer Backsteinwand. Diese Struktur besitzt die interessanten Eigenschaften, dass sie tiefe und feine Gräben quer und längs der Scanrichtung, als auch feine Strukturen auf den ebenen Flächen aufweist. Die Struktur rechts oben (b) ist der Topografie des Chesterfield Musters ähnlich der gleichnamigen Sofabezüge nachempfunden. Diese Struktur besitzt rautenförmig angeordnete Halbkugeln mit glatter Oberfläche, wie sie z.B. auch für Linsenarrays benötigt wird. Zwischen diesen Halbkugeln sind sehr kleine Pins eingefügt, welche schnell aufeinanderfolgende Wechsel von steigender und fallender Flanke benötigen. Die schuppenförmige Herzstruktur links unten (c) besitzt glatte, homogene Schrägen und gleichzeitig steile Stufen und Spitzen. Die doppelpyramidenförmige Struktur rechts unten (d) besteht aus einer periodischen Abfolge steigender und fallender Schrägen, welche diagonal zur Scanrichtung angeordnet sind.

Der Vergleich der Höhenkarten in Abbildung 20 zeigt bereits erste Abweichungen des Prozessergebnisses von der Sollgeometrie. Die signifikanteste Art von Abweichungen ist in der oberen Hälfte zu erkennen. Feinere Strukturen der Backsteine (a) sind horizontal verwischt (1) und ragen teilweise bis in den rechten, oberen Quadranten (2). Die kleinen Pins des Chesterfield Musters (b) werfen auch eine Art Schatten nach rechts (3), da dort die Struktur nicht tief genug abgetragen wurde. Beide Effekte sind hauptsächlich auf die reduzierte Modulationsfrequenz von 200 kHz zurückzuführen (siehe Kapitel 5.2.2.6). Damit die Strukturen korrekt übertragen werden können müsste der Abstand zwischen zwei Strukturfeinheiten bei den gewählten Prozessparametern mindestens 31 Pixel oder 470 μm betragen. Diese Einschränkung wurde an diesen Stellen nicht eingehalten und die Modulatoransteuerung softwareseitig unterbunden, damit der Modulator-treiber nicht überhitzt und geschädigt wird. Aus diesem Grund kann an diesen Stellen kein Abtrag stattfinden.

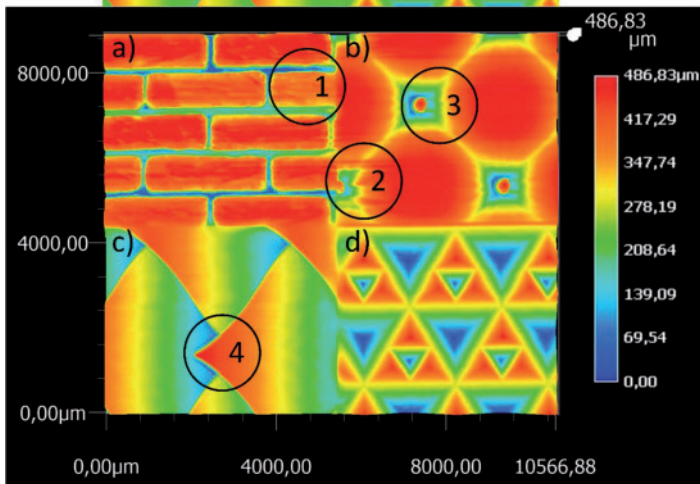
Abbildung 20:
Vergleich der Höhenkarten erster Strukturierungsergebnisse

Oben: Farblich codierte Höhenkarte der Prozessdaten mit den Testmustern:

- a) Backsteinmauer
- b) Chesterfield-Muster
- c) Herzförmige Schuppenstruktur
- d) Doppelpyramide



Unten: Farblich codierte Messung der Höhenkarte des Prozessergebnisses mit markierten Stellen für typische Geometrieabweichungsformen



Die zweite Abweichungskategorie wird um die Kanten der Herzstruktur links unten (c) erkennbar. Wie in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 erklärt wird, sind keine idealen Stufen, wie sie in den Prozessdaten vorkommen, bei senkrechtem Strahleneinfall übertragbar. Es bilden sich sichtbar Übergänge mit begrenzter Steilheit und teilweise Vertiefungen unterhalb der Stufe. Diese sind in der farblich codierten Höhendarstellung des Prozessergebnisses in Abbildung 20 unten, durch die dunkelblaue Umrandung der Spitze

der Herzstruktur erkennbar (4). In Bereichen, in denen die Beschränkungen durch Modulator und Flankensteilheit eingehalten wurden, sind die Strukturen sehr gut und übereinstimmend mit den Prozessdaten in das Werkstück übertragen worden. Dies ist im Bereich der Doppelpyramiden (d) der Fall, da diese nur aus Schrägen mit einem ausreichend großen Wiederholabstand bestehen.

Der abgebildete Ausschnitt ist $9 \times 10,5 \text{ mm}^2$ groß. Die gesamte Strukturierung misst $100 \times 100 \text{ mm}^2$ und ist bis zu $500 \mu\text{m}$ tief. Die Bearbeitung erfolgte mit einem Ultrakurzpulslaser der Firma Amphos bei $1,6 \text{ ps}$ Pulslänge, $6,3 \text{ MHz}$ Pulsfrequenz, $15 \mu\text{m}$ Pulsabstand, 95 m/s Scangeschwindigkeit und 110 W mittlerer Laserleistung. Die Prozessdauer beträgt bei diesen Einstellungen $9,5$ Stunden, in denen die $500 \mu\text{m}$ in 5.000 Schichten abgetragen werden.

Am Anfang des Prozesses beträgt die Abtragsrate $8,8 \text{ mm}^3/\text{min}$, da hier noch die ganze Fläche abgetragen wird. Mit Prozessfortschritt wird der zu bearbeitende Flächenanteil allerdings geringer, so dass die mittlere Abtragsrate bei diesem Prozessbeispiel ca. $4,4 \text{ mm}^3/\text{min}$ beträgt. Gegen Prozessende geht die Abtragsrate gegen 0 , weil nur noch vereinzelte Stellen bearbeitet werden. Mit dem Polygonscannersystem muss trotzdem die ganze Bearbeitungsfläche abgefahren werden. Hätte das Polygonscannersystem einen Wirkungsgrad von 100% , so ergäbe sich für die ganze Fläche eine Abtragsrate von bis zu $17,5 \text{ mm}^3/\text{min}$. Dieser theoretische Wert deckt sich sehr gut mit der maximalen Abtragsrate von $18 \text{ mm}^3/\text{min}$ für Stahl bei einer mittleren Laserleistung von 110 W und einem Fokusbereich von $40 \mu\text{m}$ entsprechend Abbildung 8 und Formel (3). Dieser Vergleich zeigt, dass der Prozess zumindest bis in diesen Leistungs- und Pulsfrequenzbereich gut skaliert werden kann. Hierbei handelt es sich um die maximal erreichbare Abtragsrate, wenn der Laser die ganze Zeit verwendet werden könnte. Dies ist in der Realität mit keinem bekannten Bearbeitungssystem möglich.

5 Geometrieabweichungen bei der polygonscannerbasierten Laserstrukturierung

Die Ursachen für Geometrieabweichung bei der 2,5D-Strukturierung mit Hochleistungs-UKP Lasern mit rasterbasierten Prozessdaten können in die drei folgenden Kategorien eingeteilt werden, welche bereits in Abbildung 2 von Kapitel 2 eingeführt wurden:

1. Abweichungen durch die Berechnung der rasterbasierten Prozessdaten
2. Systembedingte Abweichungen durch örtlich ungenaue Deposition der Laserenergie
3. Prozessbedingte Abweichungen durch ungewünschtes Prozessverhalten

Diese 3 Quellen für Geometrieabweichung werden in den folgenden Kapiteln 5.1 bis 5.3 detaillierter erläutert. Weitere mögliche Abweichungsursachen werden in Kapitel 5.2.2.6 beschrieben.

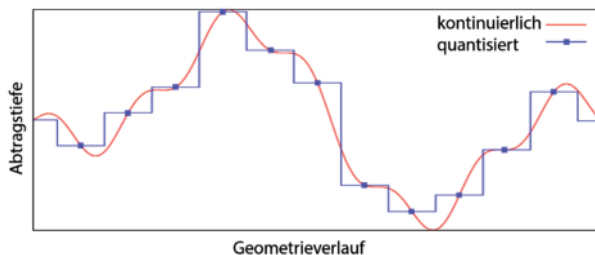
5.1 Quantisierungsabweichungen der Prozessdatenkonvertierung

Die Sollgeometrie, welche durch die Strukturierung abgetragen werden soll, liegt üblicherweise als 3D-CAD Modell vor. Dieses kann nicht direkt verarbeitet werden und muss erst in eine Höhenkarte konvertiert werden. Die Höhenkarte ist ein Bild mit äquidistantem Raster dessen Werte die Sollabtragstiefe für diese Position im Bearbeitungsfeld beschreiben. Eine gängige Darstellung der Sollabtragstiefe mittels Höhenkarten sind Graustufenbilder mit 8-bit Auflösung. Je nach Abtragstiefe kann dies allerdings zu Stufen im Reliefverlauf führen, da zum Beispiel bei einer maximalen Ab-

tragstiefe von 1 mm die Auflösung der Daten $4\text{ }\mu\text{m}$ entspricht. Für eine feinere Abstufung können Graustufenbilder mit 16-bit Auflösung oder Farbbilder mit 24- oder 32-bit Auflösung verwendet werden [36].

Bei der Konvertierung der CAD-Daten in die Höhenkarte wird der kontinuierliche Verlauf der Freiformflächen der Sollgeometrie quantisiert, wobei die laterale Auflösung der erzeugten Prozessdaten dem Puls-zu-Puls Abstand und die vertikale Auflösung dem Abtrag pro Schicht entspricht. Dieses Vorgehen wurde bereits in Kapitel 4.3 beschrieben. Die Höhe dieser Stufen kann bei dem Polygonscannersystem mit 16 bit aufgelöst werden, was einer Tiefenauflösung von 15 nm bei einer Maximaltiefe von 1 mm entspricht. Dies ist deutlich besser als die üblicherweise verwendete Schichthöhe von 100 - 200 nm. Aus diesem Grund stellt die Quantisierung in vertikaler Richtung so gut wie keine Einschränkung dar.

Abbildung 21:
Prinzipielle Darstellung der Quantisierung eines kontinuierlichen Signalverlaufs



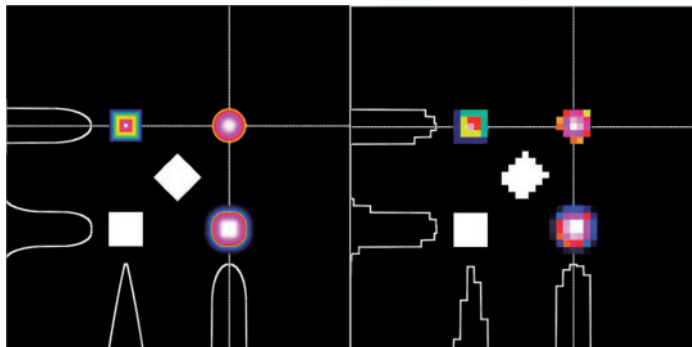
In Abbildung 21 ist das Prinzip der Quantisierung an Hand eines 2D-Verlaufs dargestellt. In diskreten Abständen wird der Wert des Tiefenverlaufs berechnet und für den entsprechenden Rasterpunkt übernommen. Hierdurch wird aus dem kontinuierlichen Geometrieverlauf ein Stufenprofil.

Bei der Strukturierung mit Ultrakurzpulslasern mit Pulsfrequenzen im MHz-Bereich haben sich Pulsabstände im Bereich zwischen $10\text{ }\mu\text{m}$ und $20\text{ }\mu\text{m}$ bei Laserspotdurchmessern von $15\text{ }\mu\text{m}$ - $30\text{ }\mu\text{m}$ als vorteilhaft erwiesen. Da die Pixelgröße dem Pulsabstand entspricht wird die Prozessgeometrie lateral mit

dieser Auflösung quantisiert. Je nach Größe und Lage der Strukturen gehen unvermeidbar Details bei der Quantisierung verloren. Der Vergleich der Auswirkung der Quantisierung mit einer Pixelgröße von $1\text{ }\mu\text{m}$ und $20\text{ }\mu\text{m}$ ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Strukturen haben eine Sollkantenlänge bzw. Durchmesser von $100\text{ }\mu\text{m}$. Deutlich erkennbare Stufenprofile durch Reduktion der lateralen Auflösung sind nur ein Effekt der Quantisierung. Zusätzlich werden die einzelnen Strukturen durch Runden der Position des Punktes der Fläche im Raum leicht vergrößert, verkleinert oder verzerrt.

Abbildung 22:
Auswirkung des
Rasterns auf den
Geometrierhalt

Links: $1\text{ }\mu\text{m}$ Raster
Rechts: $20\text{ }\mu\text{m}$ Raster



Der Pulsabstand ist ein wichtiger Prozessparameter und wird abhängig von Spotgröße, Pulsfrequenz und Energie häufig während der Prozessparameterfindung variiert. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die maximal erreichbare Strukturauflösung durch den Pulsabstand und somit der lateralen Quantisierungsauflösung stark eingeschränkt wird.

5.2 Systembedingte Abweichungen

Die systembedingten Abweichungen führen in erster Linie zu einer ungenauen Deposition der Laserenergie. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und lassen sich in Abweichungen konstanter Größe und Abweichungen mit Zufallsverteilung differenzieren. Das verwendete Fehlermerkmal ist die örtliche Abweichung der deponierten Laserenergie von der Sollverteilung.

Zeitliche Abweichungen werden auf Grund der scannenden Strahlbewegung als örtliche Abweichungen sichtbar.

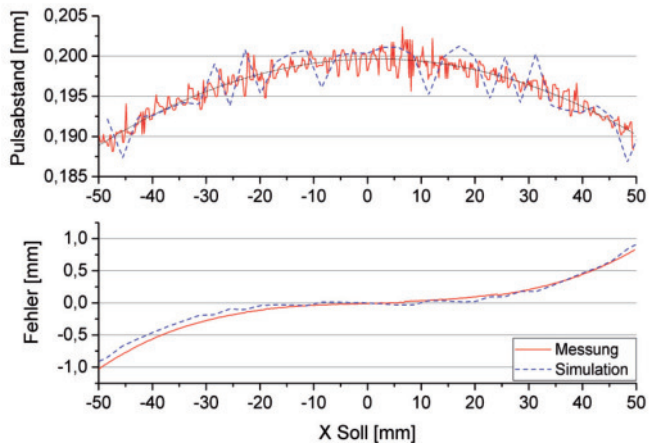
5.2.1 Abweichungsursachen konstanter Größe

5.2.1.1 Optische Verzeichnung

Idealerweise besitzt das Scanobjektiv einen linearen Zusammenhang zwischen Ablenkwinkel durch den Scanner und der resultierenden Verschiebung des Laserspots auf der Werkstückoberfläche entsprechend der F-Theta-Bedingung, damit Scangeschwindigkeit und Pulsabstand bei einer konstanten Polygonrotationsgeschwindigkeit ebenfalls konstant sind [28]. Allerdings weist jedes Objektiv einen Telezentriefehler und eine entsprechende Abweichung von der F-Theta Bedingung auf, wodurch die Position der Laserpulse nicht mehr proportional zum Scanwinkel ist (siehe Anhang A.2.). Die Optikhersteller versuchen dies bei der Auslegung der Objektive zu berücksichtigen [26]. Bei der Bearbeitung entlang einer Linie mit dem Polygonscanner resultieren diese Abweichungen bei einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit und Pulsfrequenz zu variierenden Pulsabständen auf dem Werkstück.

Abbildung 23 zeigt den Verlauf des Pulsabstandes entlang der Scanlinie und der absolut resultierenden Positionsabweichung. Hierbei liegen Simulation und Messergebnis sehr gut übereinander. Bei der absoluten Positionsabweichung sind kleine Abweichungen zu erkennen, was darauf zurückzuführen ist, dass der verwendete Scanbereich nicht symmetrisch zum Mittelpunkt des Objektivs lag. Für die Auswertung wurde ein Punktraster auf einer Kunststoffprobe strukturiert und mit der Simulation eines gescannten Punktrasters in Zemax verglichen (siehe Anhang A.2). Das strukturierte Ergebnis wurde mit Hilfe eines Keyence VHX5000 Mikroskop digitalisiert und die Lage der Punkte mit einer automatischen Bilderkennung in ImageJ ermittelt. Die Schwankungen in der Simulationskurve werden durch die gering gewählte Auflösung der abgespeicherten Simulationsdaten erklärt (siehe Abbildung 62 in Anhang A.2).

Abbildung 23:
Vergleich der Si-
mulation und Mes-
sung der
Verzeichnung des
F-Theta Objektivs



Diese Verzeichnung ist örtlich konstant und kann vermessen werden und ist vergleichbar mit einer kissenförmigen Verzeichnung, wie sie bei Objektiven aus der Fotografie bekannt ist. Da die verwendeten Prozessdaten Bilder sind, können bekannte Algorithmen der Bildverarbeitung zur Reduktion von kissenförmigen Verzeichnungen verwendet werden, um diese Abweichungsursache im Vorfeld aus den Prozessdaten herauszurechnen. Alternativ kann mit einem Hybridscanner, der die Möglichkeit bietet, Abweichungen aktiv zu kompensieren (siehe Kapitel 6.2), diese Positionsfehlerinformation zur Ansteuerung der Kompensationsglieder verwendet werden.

Der Verlauf des Pulsabstandes aus Abbildung 23 lässt sich mit einem Polynom 2. Grades und die absolute Abweichung mit einem Polynom 3. Grades annähern. Mit Hilfe dieser Polynome - entsprechend den Formeln (10) bis (12) - lässt sich diese Abweichung berechnen. Normalerweise werden für das Beschreiben von optischen Verzeichnungen das Brown-Conrady Modell verwendet [37, 38]. Vereinfacht man dieses Modell für eine Verzeichnung rein in Scanrichtung und ohne Verschiebung so ergibt sich für die Abweichungsapproximation ein Polynom, welches nur gerade Potenzen

enthält [38]. Diese Vereinfachung führt allerdings auf Grund der leichten Asymmetrie des verwendeten Aufbaus zu größeren Abweichungen, als ein Polynom 3. Grades. Die Verwendung nur gerader Potenzen würde auf Grund der höhergradigen Potenzen zusätzlich eine höhere Rechenlast bedeuten. Aus diesem Grund wird das Polynom 3. Grades zur Fehlerberechnung verwendet. Die Faktoren der Polygone der Formeln (10) und (11) sind in Tabelle 2 gelistet.

$$d_{\text{Puls}} = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (10)$$

$$E_{\text{Verzeichnung}} = b_3 x^3 + b_2 x^2 + b_1 x + b_0 \quad (11)$$

$$\text{Scanposition}_{\text{Real}} = \text{Scanposition}_{\text{Ideal}} - E_{\text{Verzeichnung}} \quad (12)$$

Tabelle 2: Faktoren des Pulsabstandes und der Verzeichnungsfehler

Faktor	Wert	Faktor	Wert
a_0	0,19965 mm	b_0	-7,467 10^{-4} mm
a_1	-4,04419 10^{-6}	b_1	0,00231
a_2	1,34536 10^{-5} mm $^{-1}$	b_2	-3,70343 10^{-5} mm $^{-1}$
		b_3	6,47613 10^{-6} mm $^{-2}$

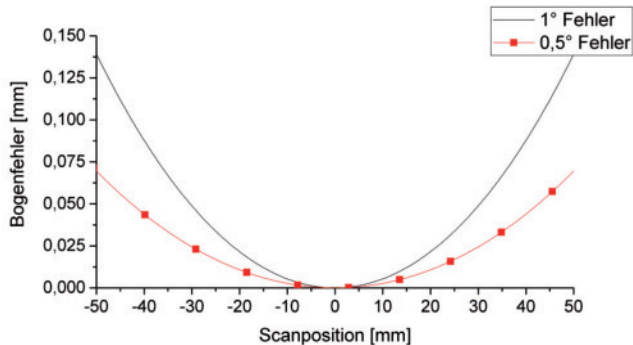
Der auf das Polygon auftreffende und der abgelenkte Laserstrahl müssen sich in einer Ebene senkrecht zur Rotationsachse des Polygons befinden. Abweichungen von dieser Bedingung führen zu einem seitlichen Versatz des fokussierten Laserspots. Dieser Versatz ist vom Scanwinkel abhängig und lässt sich mit Formel (13) berechnen. f steht hierbei für die Brennweite, β für den Justagefehler und Θ_{scan} für den Scanwinkel [28].

$$E_{\text{Bogen}} = f \cdot \sin \beta \left(\frac{1}{\cos \Theta_{\text{scan}}} - 1 \right) \quad (13)$$

Die Winkelabhängigkeit dieser Abweichung führt zu einem bogenförmigen Verlauf der Scanlinie, welcher in Abbildung 24 für eine Brennweite von 163 mm und einem Justagefehler von 1° und 0,5° gezeigt ist. Durch eine

korrekte Justage des eintreffenden Laserstrahls lässt sich diese Abweichung vermeiden. Daher wird der Einfluss dieser Abweichung nicht weiter betrachtet [26].

Abbildung 24: Bogenfehler der Scanlinie bei fehlerhafter Justage bei der Laserstrahleinkopplung

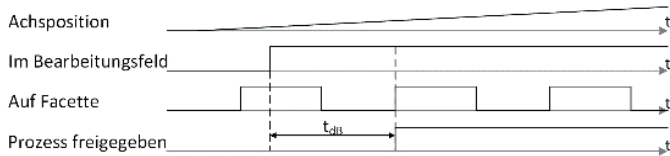


5.2.2 Abweichungsursachen mit statistischer Verteilung

5.2.2.1 Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld

Bei dem verwendeten System dreht das Polygon auf Grund seiner Massenträgheit unabhängig von den anderen Komponenten des Systems. Die Werkstückachse wartet vor dem Bearbeitungsfeld auf die Freigabe des Prozesses. Ist der Prozess freigegeben, beschleunigt die Achse außerhalb des Bearbeitungsfeldes auf die Prozessvorschubgeschwindigkeit und fährt mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Ende des Bearbeitungsfeldes. Die Achse signalisiert der Prozesssteuerung, wenn sie sich innerhalb des Bearbeitungsfeldes befindet. Der Prozess beginnt mit dem Erreichen des nächsten Facettenanfangs nach Eintritt in das Bearbeitungsfeld, wie in Abbildung 25 dargestellt.

Abbildung 25:
Zeitliche Toleranz
des Bearbeitungs-
beginns beim Ein-
tritt der Vorschub-
achse in das Bear-
beitungsfeld



Da nicht bekannt ist, welche Position das Polygon bei Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld haben wird, entspricht die zeitliche Toleranz für den Bearbeitungsbeginn in Vorschubrichtung t_{dB} durch diese Ungenauigkeit 1 Linienabstand d_{Linie} bzw. Pixelgröße d_{Pixel} . Die zeitliche Auflösung des Signals der Achse zum Eintritt in das Bearbeitungsfeld fügt eine weitere Toleranz hinzu. Auf Grund der Auflösung des Signals mit 100 ns gegenüber einer minimalen Linienperiode von 520 μs kann dieser Effekt allerdings vernachlässigt werden. Alle Verzögerungen im Bereich von 0 bis 1 Linienabstand sind somit gleich wahrscheinlich. Diese Abweichung kann nur aktiv während des Prozesses kompensiert werden. Aktive Kompensationsmaßnahmen sind in Kapitel 6.2 beschrieben.

5.2.2.2 Dynamischer Spurfehler des Polygons

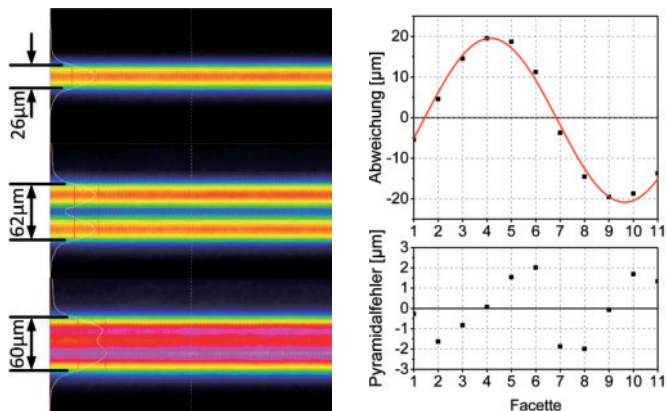
Der dynamische Spurfehler des Polygons ist definiert als die absolute, mechanische Winkelabweichung quer zur Scanrichtung und setzt sich im Wesentlichen aus Taumelfehler, Pyramidalfehler und Lagerfehler zusammen. Der Taumelfehler ist bedingt durch eine nicht perfekt senkrechte Montage des Polygonrades zur Rotationsachse. Durch den Taumelfehler wird eine sinusförmige Abweichung des Abstrahlwinkels mit einer Periode von einer Umdrehung hervorgerufen. Der Pyramidalfehler beschreibt den relativen Winkelfehler der Facetten des Polygons zueinander. Der Pyramidalfehler entsteht durch Zustellfehler beim Fräsen und Schleifen des Polygons und ist deshalb ein konstanter bzw. mit einer Umdrehung periodischer Fehler, welcher für jede Facette individuell ist. Die dritte Komponente, der Lagerfehler, induziert ein zufälliges Taumeln des Polygons und besitzt eine zufällig verteilte Größe, was mit einem Rauschen vergleichbar ist [28].

Die Auswirkung des dynamischen Spurfehlers lässt sich an Hand von Abbildung 26 beschreiben. Auf der linken Seite sind die Spuren eines roten Laserpointers mit einer Kamera mit $2,2\text{ }\mu\text{m}$ großen Pixeln im Laserpointerfokus aufgezeichnet. Bei dieser Messung wurde die gleiche Fokussieroptik mit einer Brennweite von 163 mm verwendet, damit die Ergebnisse den Realfall der Strukturierung mit einem UKP-Laser widerspiegeln. Man erkennt eine deutliche Verbreiterung der Gesamtspur, wenn alle Facetten aktiviert sind.

Abbildung 26:
Messung des dynamischen Spurfehlers des Polygons

Links Linienbreiten von:
Oben: Facette 1
Mitte: Facette 4+9
Unten: alle Facetten

Rechts:
Spur- und Pyramidalfehler einer Umdrehung



Auf der rechten Seite der Abbildung 26 ist die absolute Abweichung vom Mittel jeder Facette aufgetragen. Diese Abweichung hat die Form eines Sinus mit einer Amplitude von ca. $20\text{ }\mu\text{m}$ bei der verwendeten Brennweite von 163 mm und einer Periode von einer Umdrehung des Polygons. Dies lässt auf den Taumelfehler als Hauptursache für diese Abweichung schließen. Die Abweichung von diesem Sinus liegt im Bereich von $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ und stellt den Einfluss des Pyramidalfehlers dar. Der Einfluss des Lagerfehlers ist bei dieser Messung vernachlässigt, da er sich durch die Integrationszeit der Kamera näherungsweise mittelt und bei dieser Messart zu einer Verbreiterung und nicht zu einer Verschiebung der Linie führt. Laut [28] liegt das Rauschen durch das Lager typischerweise im Bereich von $1 - 2\text{ arcsec}$ ($0,79 - 1,58\text{ }\mu\text{m}$ bei $f = 163\text{ mm}$).

Die periodischen Anteile des dynamischen Spurfehlers können aktiv ausgeglichen werden. Dieser Ausgleich kann z.B. mit Hilfe eines weiteren Scanners (Galvanometer, AOD oder EOD) im Strahlengang vor dem Polygonscanner, welcher die Abweichung für jede Facette kompensiert, erfolgen [26] (siehe Kapitel 6.2).

Der dynamische Spurfehler ist für jede Facette verschieden. Die Prozessbearbeitung beginnt mit Beginn der nächsten Facette nach Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld, weshalb von vornherein nicht bekannt ist, welche Bildzeile mit welcher Facette bearbeitet wird. Dies ist statistisch gleich verteilt, weshalb der Einfluss des dynamischen Spurfehlers auf das Prozessergebnis als zufällige Abweichungsursache mit einer bekannten statistischen Verteilung behandelt wird.

5.2.2.3 Genauigkeit des Encoders des Polygonmotors

Der Encoder des Polygonmotors hat eine Auflösung von 1000 Impulsen / Umdrehung bzw. 4000 Zählwerte / Umdrehung mit Quadraturauswertung, wie in Abbildung 27 dargestellt. Bei der Quadraturauswertung wird der Positionswert bei jeder Signalfanke der beiden Encodersignale A und B um ein Positionsinkrement erhöht. Durch den linearen Zusammenhang von Scanwinkel und Scanvorschub entsprechend der F-Theta-Bedingung [28] ergibt sich eine Auflösung auf dem Werkstück von $512\text{ }\mu\text{m}$ pro Zählwert für eine Brennweite von 163 mm. Diese geringe Auflösung macht eine Interpolation zwischen den Zählwerten notwendig.

Abbildung 27:
Prinzip der Quadraturencoderauswertung mit fehlerhafter Zählperiode

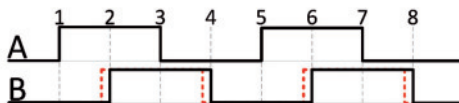
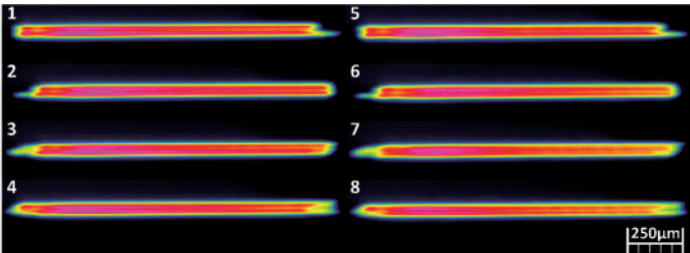


Abbildung 28 zeigt das Ergebnis der Justage der Facettenanfänge und der Untersuchung der Gültigkeit dieser Justage für andere Startpunkte. Teilbild 1 zeigt die Überlagerungen aller Facetten für die justierte Startposition. Die

Scanrichtung ist von links nach rechts und das Bearbeitungsfeld beginnt links. In den anderen Teilbildern ist die Startposition um einen ganzen Zählwert entsprechend der Quadraturauswertung des Encoders verschoben. Auffällig ist, dass sich die Linienanfänge bei anderen Startpositionen relativ zueinander verschieben. Dieses Muster wiederholt sich nach 4 Zählwerten, was einer Periode des Encoders entspricht. Aus diesem Verhalten lässt sich schließen, dass die Signalfanken 2, 3 und 4 des Quadratsignals nicht exakt im Abstand von 25% der Signalperiode erfolgen. Dies ist schematisch in Abbildung 27 für Kanal B dargestellt, bei dem die Signalfolge etwas zu dem Signal auf Kanal A verschoben ist. Hierdurch wird die erfasste Position des Polygons zu früh inkrementiert was zu einer Positionsabweichung innerhalb einer Signalperiode führt.

Abbildung 28:
Vermessung der
Genauigkeit des
Polygonencoders
mit fehlerhafter
Zählperiode



Die zeitliche Auflösung, mit der die Interpolation erfolgt, bestimmt die minimale Toleranz bei der Bestimmung des Linienanfangs. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Auflösung der Positionserfassung für unterschiedliche Scangeschwindigkeiten und Steuerungsfrequenzen. Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, dass die Interpolation möglichst mit 80 MHz oder mehr und bis zu einem 1/1000-tel der Encoderauflösung erfolgen sollte.

Tabelle 3: Interpolierte Encoderauflösung

Scangeschwindigkeit [m/s]	Steuerungsfrequenz [MHz]	Interpolationsauflösung [µm] / [cnts]
360	80	4,8 / 0,0094
360	20	18 / 0,0352
200	80	2,5 / 0,0488
200	20	10 / 0,0195
100	80	1,25 / 0,0024
100	20	5 / 0,0097

Mit Hilfe der Interpolation der Encoderposition kann der Beginn des Bearbeitungsfeldes ausreichend genau eingestellt werden. Ab Beginn des Bearbeitungsfeldes wird die aktuelle Zeile des Prozessbildes mit dem Pixeltakt / Pulsfrequenz ausgegeben, ohne den Encoder weiter auszuwerten. Der Encoder dient nur zur Bestimmung des Beginns des Bearbeitungsfeldes. Die zeitliche Verschiebung der beiden Signalkanäle des Encoders ist produktionsbedingt und verändert sich nicht über die Zeit. Aus diesem Grund führt diese Abweichung zu keiner fehlerhaften Bearbeitung solange die Bearbeitung immer an der kalibrierten Position freigegeben wird.

Sollte es notwendig sein, die Ausgabe innerhalb einer Zeile mit dem Encoder zu synchronisieren, wäre es genauer nur einen Zählwert pro Periode zu verwenden und innerhalb dieser Periode zu interpolieren.

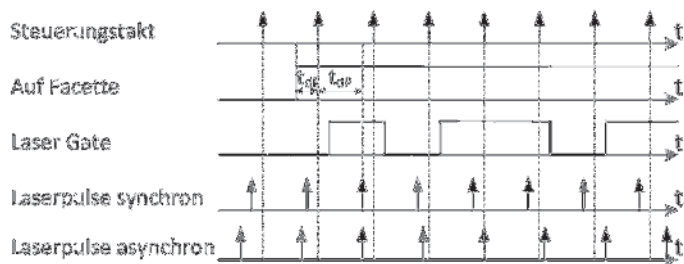
5.2.2.4 Synchronität der Laserpulse zum Linienanfang

Die meisten UKP-Laser besitzen einen freilaufenden Oszillator, der die Pulsfrequenz des Lasers vorgibt. Aus dieser Zahl unverstärkter Laserpulse werden mit einem definierten Teiler Pulse mit einem Pulspicker selektiert und anschließend verstärkt. Diese verstärkten Pulse können mit einem nachgelagerten Modulator moduliert werden. Dieses Vorgehen ist weit verbreitet,

da auf diese Weise eine konstante Leistungsabgabe des Verstärkers sichergestellt wird. Dies ist für einen stabilen Betrieb des Verstärkers notwendig. Die Folge ist allerdings, dass der Zeitpunkt der Laserpulse bzw. des nächsten Laserpulses nicht beeinflussbar ist.

Die Abweichung am Anfang der Bearbeitung einer Scanlinie ist vergleichbar mit dem Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld, beschrieben in Kapitel 0. Anhand der Position des Polygons wird die Bearbeitung ab einer bestimmten Position mit dem nächsten Steuerungstakt freigegeben und der nächste Laserpuls auf das Werkstück geleitet. Das Polygon ist freilau fend, wodurch der Anfang der Linie nicht mit dem Laser- und Steuerungstakt zusammen fällt. Die Verzögerungen bis zum nächsten Facettenanfang t_{dF} und Laserpuls t_{dP} ergeben eine maximale zeitliche Toleranz von einem Steuerungstakt T_{ST} plus einen Lasertakt T_{LT} . Dies ist in Abbildung 29 dargestellt. Das Signal Laser Gate ist um ca. einen halben Steuerungstakt auf Grund der Laufzeit elektronischer Komponenten im Signalpfad verzögert dargestellt. Im synchronen Fall folgt der Steuerungstakt dem Lasertakt. Im asynchronen Fall arbeiten Laser und Steuerung mit unterschiedlichem Takt, weshalb es unweigerlich zu Abweichungen bezüglich zeitlicher Lage und Anzahl durchgelassener oder nicht durchgelassener Laserpulse kommt. Hierdurch wird der vorletzte Puls für den asynchronen Fall auf das Werkstück geleitet und weicht somit von der Vorgabe des Laser Gate Steuerungssignals ab.

Abbildung 29:
Einfluss der Syn-
chronisierung von
Laser und Steue-
rung auf die Laser-
pulsfolge



Die FPGA-Steuerung arbeitet mit einer Zyklusfrequenz von 80 MHz, wodurch t_{dF} maximal $T_{ST} = 12,5 \text{ ns}$ groß ist. Bei einer Laserfrequenz von 10 MHz beträgt T_{LT} 100 ns, wodurch die Gesamtterolanz 112,5 ns bzw. 1,125-mal den Pulsabstand oder der Pixelgröße beträgt.

$$t_d = t_{dF} + t_{dP} \quad (14)$$

$$\text{mit } t_{dF} = 0 \dots t_{ST}$$

$$\text{und } t_{dP} = \begin{cases} 0 \dots T_{LT} & \text{für asynchrone Ansteuerung} \\ konst & \text{für synchrone Ansteuerung} \end{cases}$$

Selbst wenn Laser und Steuerung mit exakt dem gleichen Takt arbeiten, kommt es zu einer Toleranz des Linienanfangs. Der zeitliche Abstand zwischen dem Steuerungstakt, welcher den Linienanfang erkennt und dem nächsten Laserpuls ist konstant. Die zeitliche Auflösung erhöht sich auf einen Lasertakt. Diese Toleranz lässt sich nur verringern, wenn die Steuerung nicht mit dem Takt der verstärkten Pulse arbeitet, sondern mit der Frequenz des Laseroszillators [32]. Hierzu muss der Pulspickertakt, mit dem periodisch Pulse des Oszillators in den Verstärker geleitet werden, von außen manipuliert werden. Zur Kompensation des Linienanfangs muss z.B. nicht durchgehend der 10. Puls verstärkt werden, sondern entsprechend der notwendigen Verschiebung für eine kurze Zeit der 9. oder 11. Eine andere Möglichkeit ist bei manchen Lasern die Oszillatorfrequenz von außen vorzugeben [39]. Alternativ kann der Linienanfang durch eine vorgelagerte Strahlablenkung verschoben werden [40], da die Abweichung durch die Polygonposition und zählen des Lasertakts in der Steuerung berechnet werden kann. Diese Möglichkeiten werden genauer in Kapitel 6.2 beschrieben.

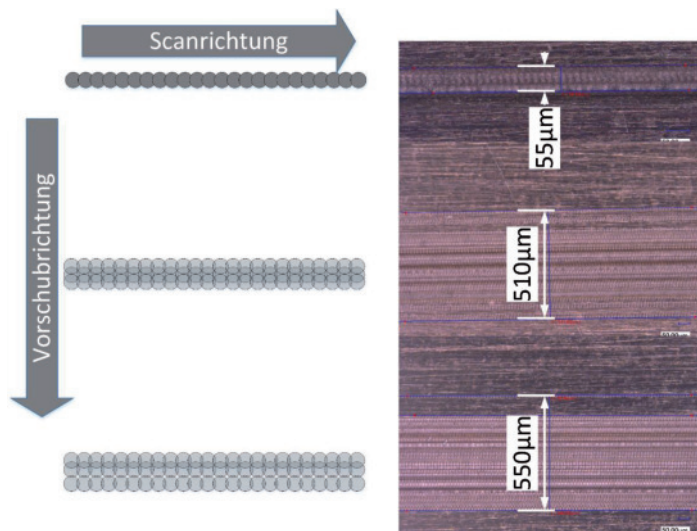
5.2.2.5 Geschwindigkeitsabweichung von Polygonscanner und Achssystem

Bei einem Polygonscannersystem, bei dem die Verschiebung der Scanlinie durch ein Achssystem erfolgt, sind die Geschwindigkeitsregelungen von

Polygonscannermotor und Werkstückachse eigenständig. Wird die Abarbeitung der Prozessdaten nur mit dem Überfahren der Ränder des Prozessfeldes synchronisiert, so integrieren sich selbst kleine Geschwindigkeitsabweichungen eines der Teilsysteme zu einer Positionsabweichung des bearbeiteten Pixels auf dem Werkstück auf. Als Konsequenz nimmt die Streuung der Laserpulse mit zunehmendem Abstand zu den Referenzkanten zu und die Geometriegenauigkeit sinkt.

Relativ einfach lässt sich dieser Effekt anhand eines Linienmusters - wie in Abbildung 30 dargestellt - beobachten. Das Prozessbild besteht aus 3 horizontalen Linien im Abstand von 50 mm mit einer Sollbreite von $20\text{ }\mu\text{m}$. Eine Linie befindet sich am Anfang, eine in der Mitte und die 3. am Ende des Bearbeitungsfeldes. Das Feld wird in diesem Fall aus immer der gleichen Richtung bearbeitet und der Laser bleibt bei der Rückfahrt ausgeschaltet.

Abbildung 30:
Einfluss von Geschwindigkeits-
schwankungen der
Vorschubachse auf die
Linienpositionierungs-
genauigkeit



Auf der linken Seite der Abbildung 30 ist die Streuung der Bildzeilen bzw. Linien in Vorschubrichtung auf Grund von Geschwindigkeitsschwankungen schematisch dargestellt. Auf der rechten Seite sind reale Abtragsergebnisse zu sehen.

Die erste Linie verbreitert sich nach 500 Überfahrten auf Grund der Toleranz beim Eintritt in das Bearbeitungsfeld und des Taumelns des Polygons auf 55 μm . Durch Abweichungen der Vorschubgeschwindigkeit der Achse bezogen auf die Linienfrequenz des Polygons erhöht sich die Linienbreite der 3. Linie nach 100 mm um Faktor 10 auf ca. 550 μm . Ein vergleichbarer Effekt, wenn auch nicht so stark ausgeprägt, lässt sich in Scanrichtung beobachten [16].

5.2.2.6 Weitere potentielle Abweichungsursachen

Einige weitere potentielle Abweichungsursachen werden im Folgenden beschrieben. Der Einfluss dieser Abweichungsursachen ist allerdings entweder vergleichsweise gering oder die Abweichungen lassen sich durch den Einsatz anderer Komponenten beheben. Aus diesen Gründen werden diese Abweichungsursachen im Weiteren nicht bei der Modellbildung berücksichtigt.

Vibrationen

Eine weitere allerdings kaum kompensierbare Abweichungsursache sind Vibrationen jeglicher Art, die eine relative Verschiebung von Werkstück zu Auftreffpunkt des Laserstrahls verursachen. Das Bearbeitungssystem besteht aus einem Achssystem, dem Laser und dem Scankopf inklusive Strahlführung. Alle Komponenten sind auf dem Granitmaschinenbett montiert und somit prinzipiell mechanisch verbunden. Trotzdem können Schwingungen oder Stöße zu einer Lageänderung einzelner Komponenten und somit zu einer Fehlpositionierung von Laserpulsen führen. Diese Ereignisse sind unvorhersehbar und daher auch nicht oder nur durch eine geregelte,

aktive Kompensation mit entsprechender Sensorik und Systemmodell kompensierbar. Nur eine steife und schwingungsgedämpfte Konstruktion der Maschine kann diese Abweichungsursache minimieren.

Jitter

Eine weitere Unsicherheit bei der Positionierung der Laserspulse sind Jitter des Steuerungssystems. Der Jitter des FPGAs liegt im Bereich von 250 ps. Hinzu kommen Toleranzen in den Pegelwandlern und dem kompletten Signalpfad. Diese Zeiten liegen allerdings unter der Zykluszeit des Steuerungsprogramms und fallen daher nicht größer ins Gewicht.

Drift der Strahlage

Ein bekanntes Verhalten von Hochleistungslasern ist, dass die Strahlage des erzeugten Laserstrahls nicht stabil ist. Dies ist vor allem nach dem Einschalten des Lasers ein Problem, da das Innere des Lasers für eine stabile Strahlage thermisch stabil sein muss. Dies bedeutet, dass der Laser nach dem Einschalten teilweise zwischen 1 - 8 Stunden warmlaufen muss, um einen stabilen Prozess zu garantieren. Während des Betriebs ist dafür zu sorgen, dass der Laser thermisch stabil bleibt. Das Gleiche gilt für die gesamte Bearbeitungsmaschine, da thermische Schwankungen zu kleinen Ausdehnungen der Komponenten führen und somit die Strahlage beeinflussen können. Es handelt sich in beiden Fällen um eine langsame Drift, die durch eine aktive Strahlnachführung ausgeregelt werden kann.

Modulatorverhalten

Bei der Modulation des Laserstrahls mit einem Modulator ist die Schaltcharakteristik des Modulators zu berücksichtigen. Es werden hauptsächlich zwei Technologien zum Modulieren von Hochleistungs-UKP Lasern verwendet. Die erste Technologie verwendet den akusto-optischen Effekt. Ein akusto-optischer Modulator besteht aus einem durchsichtigen Festkörper, Glas oder einem Kristall, an dem zur Erzeugung von Schallwellen an einem

Ende ein Piezoelement angebracht ist. Am anderen Ende befindet sich ein Schallabsorber, um Reflexionen zu vermeiden. Die Ablenkung des Lichts in einem akusto-optischen Modulator funktioniert nach dem Prinzip der Beugung von Licht an einem optischen Gitter. Das optische Gitter besteht aus einer periodischen Modulation des Brechungsindex in einem Kristall auf Grund periodischer Dichteänderungen erzeugt durch eine stehende Ultraschallwelle. Die optische Effizienz liegt typischerweise im Bereich von 80%, kann aber auch bis zu 100% erreichen. Die Schaltfrequenz ist begrenzt durch die Laufzeit des Schalls innerhalb des Kristalls. Trifft ein Laserpuls auf eine sich noch verändernde Schallwelle, so wird der Laser in unterschiedliche Winkel gebeugt und der Strahl entsprechend aufgeweitet oder fokussiert [13]. Beides führt zu einer verringerten Fluenz auf dem Werkstück, wodurch der Prozess näherungsweise unterbunden wird.

Der zweite verwendete Modulatortyp ist die Pockelszelle, die den elektro-optischen Effekt verwenden. Der Modulator besteht aus einem doppelbrechenden Material. Das Anlegen einer elektrischen Spannung von bis zu einigen Kilovolt führt zu einer Drehung der Polarisation des Laserstrahls. Mit einem nachgeschalteten Polarisator kann der modulierte Anteil des Laserstrahls herausgefiltert werden. Im Gegensatz zu dem akusto-optischen Effekt kann der Laserstrahl mit dem elektro-optischen Effekt im unteren Nanosekunden- oder sogar Pikosekundenbereich moduliert werden. Begrenzend sind in diesem Fall die Hochspannungstreiber oder mechanische Resonanzen des Kristalls, welche durch periodisches Schalten zu einer mechanischen Schwingung führen können. In der Regel ist allerdings das Schaltverhalten des Treibers der limitierende Faktor. Zum einen gibt es Modulatortreiber, die den Modulator zwar aktiv einschalten, allerdings nicht aktiv ausschalten. In diesem Fall werden nach Ausschalten des Ansteuer-signals noch einige Pulse mit zunehmend geringerer Intensität durchgelassen.

Die andere Limitierung ist ein mögliches Überhitzen des Treibers. Das periodische Umladen der Kapazität des Kristalls mit mehreren Kilovolt führt auf Grund der Umladeströme im Kiloamperebereich zu einer Überhitzung der Schaltelemente und zu einer dauerhaften Schädigung des Treibers. Einzelne kurze Pulse ab 100 ns sind jedoch möglich. Auf diese Art sind einzelne sehr kleine Strukturen realisierbar. Sollen mehrere aufeinanderfolgende Strukturen erzeugt werden, so stellt das häufige Schalten des Modulators eine signifikante Einschränkung dar. Bei einer Laserpulsfrequenz von 10 MHz und einem Pulsabstand von 20 μm führt eine maximale Modulatorschaltfrequenz von 200 kHz zu einem Mindestabstand von 1 mm zwischen feineren Strukturen.

5.3 Prozessbedingte Abweichungen

Das Prozessergebnis hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. So ist der Abtrag pro Schicht stark abhängig von der gewählten Fluenz in Kombination mit dem bearbeitenden Material. Dies hat allerdings in erster Linie Einfluss auf die absolute Abtragstiefe und wird hier nicht weiter behandelt. Die in den nachfolgenden Unterkapiteln behandelten Einflussfaktoren führen durch Laser-Material-Wechselwirkungen zu Abweichungen von der Sollgeometrie.

5.3.1 Energieverteilung im Fokus

Die rasterbasierten Prozessdaten sehen einen Abtrag in Form eines quadratischen Pixels mit konstanter Tiefe vor. In der Realität entspricht die Laserenergieverteilung im Fokus meist näherungsweise einer Gauß-Verteilung. Somit definiert die Mitte eines jeden Pixels den nominellen Schwerpunkt eines auf die Materialoberfläche auftreffenden Laserpulses. Innerhalb des Fokus ist die Intensität in der Mitte am höchsten, weshalb dort auch tendenziell der größte Abtrag erfolgt. Zum Rand des Laserspots nimmt die Intensität und entsprechend der Abtrag ab.

Das Abtragsverhalten eines Laserpulses mit dem üblicherweise vorliegenden Gaußprofil entspricht also nicht den Prozessdaten mit quadratischen Pixeln. Über die Anzahl der Schichten mittelt sich diese Abweichung heraus, da die Pixelgröße üblicherweise 50 - 90% des realen Fokusdurchmessers beträgt. Eine Annäherung des Laserspots an die Prozessdaten könnte mit einem Gauß-Top-Hat Strahlformer [41] erfolgen, um einen näherungsweise quadratischen Laserspot mit homogener Intensitätsverteilung zu erreichen.

$$\Delta V_{TopHat} = 4\omega_0^2 \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi_0}{2\Phi_{th}}\right) = \frac{\pi}{4} \omega_0^2 \delta \cdot \ln^2\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) = \Delta V_{Gauß} \quad (15)$$

Der Vergleich der Abtragsvolumina pro Puls nach Formel (15) zeigt, dass durch eine homogenere Energieverteilung im Spot auch die Abtragsrate für Fluenzen nahe der Abtragsschwellfluenz gesteigert werden kann [14]. Bei einem Arbeitspunkt mit einer Spitzenfluenz der 5-fachen Abtragsschwellfluenz ist der Abtrag mit einem Top-Hat-Profil demnach ca. 1,8-mal so groß wie bei der Verwendung eines Gauß-Profiles. Allerdings ist bei diesem Vergleich die Abtragsfläche des quadratischen Top-Hat-Profiles auch 1,27-mal so groß wie die des runden gaußförmigen Strahlprofils.

5.3.2 Wiederanhaftung

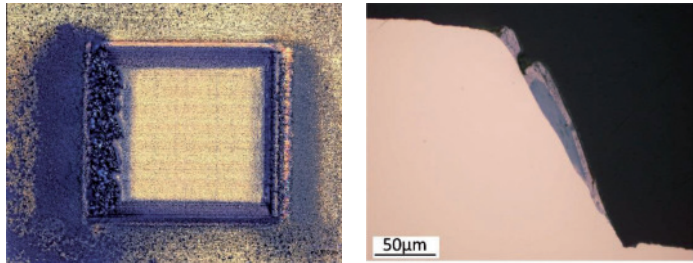
Eine Herausforderung bei der Strukturierung mit hochrepetierenden UKP-Lasern mit hoher mittlerer Leistung ist die vergleichsweise hohe Volumenabtragsrate. In Abbildung 31 links ist die Aufsicht auf eine Rechtecksenkung direkt nach dem Prozess gezeigt. In diesem Fall wurde nur eine Raumabsaugung mit einem Abstand von ca. 30 cm von der Bearbeitungsstelle verwendet. Die Rechtecksenkung hat eine Kantenlänge von 1,6 mm und eine Tiefe von 240 µm. Die Scanrichtung ist von links nach rechts und die Vorschubrichtung von oben nach unten. Es sind deutliche Ablagerungen an der fallenden Flanke in Scanrichtung zu finden. Die Staubablagerung mit einer Höhe von 80 µm und Breite von fast 500 µm außerhalb des Bearbeitungsbereichs kann nach dem Prozess einfach entfernt werden. An der

fallenden Flanke innerhalb des Bearbeitungsbereichs befinden sich auf einer Breite von bis zu 300 μm Ablagerungen, die ungefähr die Ausgangshöhe besitzen. Selbst eine Ultraschallreinigung und ätzen mit 5%-iger Salzsäure kann diese Ablagerungen nur teilweise entfernen.

Abbildung 31:
Problem der Wiederanhaftung an den Flanken einer Rechtecksenkung

Links: Aufsicht einer ungereinigten Rechtecksenkung

Rechts: Querschliff einer Flanke mit Wiederanhaftung



Der Querschliff in Abbildung 31 rechts zeigt, dass das Material teilweise abgetragen wurde und nachträglich wieder an der entstehenden Schräge anhaftete. Durch das Wiederanhaften muss das Material mehrfach abgetragen werden, weshalb eine deutlich flachere Schräge als auf der gegenüberliegenden Seite entsteht. Das in Abbildung 31 gezeigte Beispiel ist extrem, da zur Demonstration keine lokale Absaugung oder sonstige Maßnahmen zur Minderung der Ablagerungen verwendet wurden.

Auffällig ist, dass die Ablagerungen fast ausschließlich an den fallenden Flanken in Scanrichtung bzw. in negativer Scanrichtung von der Bearbeitungsstelle erfolgen. Ein Laserpuls verdampft ein kleines Stück Material. Dieses Material breitet sich auf Grund des Dampfdrucks in Form einer Dampf Wolke nach oben aus. Untersuchungen zum Expansionsverhalten der Dampf Wolke beim Abtrag mit fs- und ps-Pulsen zeigen ein Maximum der Materialemission bei etwa 150 ns nach der Bestrahlung. Bei Transmissionsmessungen des bestrahlten Bereiches konnte eine reduzierte Transmission bis zu 4 μs nach dem Laserpuls beobachtet werden [4]. Im MHz-Bereich verdampft der nächste Laserpuls demnach das nächste Stück Ma-

terial, obwohl die vorherige Dampfwolke noch nicht ausreichend expandiert ist. Die zweite Dampfwolke schiebt daher vermutlich die Partikel des vorherigen Abtrags etwas in negativer Scanrichtung zurück. Diesen Effekt kann man in Abbildung 32 links erkennen.

Abbildung 32:
Visualisierung des
Rückimpulses des
Prozesses anhand
der Orientierung
des Prozessleuch-
tens
Links:
Ohne Druckluft
Rechts:
Mit Druckluft



Die Bilder der Abbildung 32 wurden mit einer Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv und bei einer Belichtungszeit von $1/4000$ s aufgenommen. Die mittlere Laserleistung betrug 120 W bei einer Pulsfrequenz von $6,3$ MHz, Pulsdauer von $1,6$ ps und einer Scangeschwindigkeit von $94,5$ m/s. Die Scanrichtung ist von rechts nach links, während sich das Plasma und das verglühende Material nach rechts orientieren. Die Länge der gezeigten Bearbeitung beträgt 5 mm. Im rechten Bild ist ein starker Luftstrom in Scanrichtung vorhanden, der einen Teil des Rückimpulses kompensiert und im oberen stark expandierten Bereich umkehrt. Hierdurch können Ablagerungen verringert werden und das abgetragene Material, das sich als Staub neben der Bearbeitungsstelle angehäuft hatte, wird in Richtung Absaugung transportiert.

Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Absaugungs- und Prozessgasstrategie einen entscheidenden Einfluss auf das Prozessergebnis haben kann. Bei der Abblasstrategie ist darauf zu achten, dass der Luftimpuls über die gesamte Bearbeitungslänge konstant ist und möglichst keine Verwirbelungen an Strukturen entstehen, welche die Partikel wieder in abgetragene Vertiefungen befördern.

5.3.3 Maximaler Flankenwinkel

Der maximale Flankenwinkel ergibt sich aus der Projektion des Strahlprofils auf die Werkstückoberfläche. Am Anfang des Prozesses ist die Werkstückoberfläche üblicherweise flach und die Energieverteilung entspricht dem Strahlprofil. Mit fortschreitendem Prozess bilden sich z.B. Stufen bzw. Schrägen aus, auf die das Strahlprofil projiziert wird. Entsprechend des bereits bestehenden Winkels und der Propagationsrichtung des Lasers wird die Energie der Laserpulse auf eine größere Fläche verteilt und die Fluenz Φ verringert sich. Unterschreitet die projizierte Fluenz die Abtragsschwellfluenz Φ_{th} kann kein Abtrag mehr stattfinden und es bildet sich keine steilere Flanke aus. Entsprechend dieser vereinfachten, geometrischen Darstellung ohne Berücksichtigung weiterer Effekte, findet ein Abtrag nach Formel (16) statt.

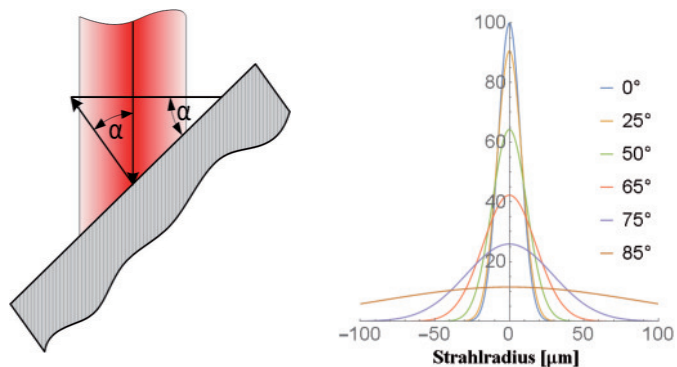
$$\cos \alpha \cdot \phi \geq \phi_{th} \quad (16)$$

Abbildung 33 links zeigt eine schematische Darstellung eines Laserstrahls, der auf eine schräge Ebene trifft. Der Flanken- und Auftreffwinkel α führt dazu, dass sich die projizierte Fläche des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche vergrößert und sich die Energie entsprechend auf einer größeren Fläche verteilt.

Abbildung 33:
Projektion der Laserenergie auf die Werkstückoberfläche

Links: Schematische Darstellung der Projektion des Laserstrahls auf einer Schrägen

Rechts: Projizierte Intensitätsverteilung eines Gaußprofils für



verschiedene Auf-
treffwinkel

In Abbildung 33 rechts ist die resultierende Energieverteilung relativ zur Spitzenintensität bei einem Auftreffwinkel von 0° dargestellt. Trifft der Laserstrahl senkrecht (0°) auf die Werkstückoberfläche, so ist die Spitzenfluenz maximal und der Fokusbereich minimal (in diesem Beispiel 30 µm). Nimmt der Auftreff- bzw. Flankenwinkel zu, so nimmt der Fokusbereich durch die Projektion des Laserstrahls auf die Werkstückoberfläche zu und die Spitzenfluenz ab. So vergrößert sich der projizierte Fokusbereich bei einem Auftreffwinkel von 65° auf 70 µm und die maximale Fluenz beträgt nur noch 42 % der Ausgangsfluenz. Die Fluenz ist proportional zur Fläche des Laserfokus. Eine Verdopplung des Fokusbereichs reduziert die Fluenz um Faktor 4. Ein Abtrag kann nur noch stattfinden, wenn die Fluenz oberhalb der Abtragsschwellfluenz liegt.

Tabelle 4: Brechungsindex und Extinktionskoeffizient ausgewählter Metalle

Material	n	k
Al	1,75	8,5
Cu	0,15	6,93
Fe	3,81	4,44

Zusätzlich zu dem Projektionsmodell für den maximalen Flankenwinkel muss die Winkel-, Polarisations- und Temperaturabhängigkeit von Reflexion und Absorption berücksichtigt werden. Eine Temperaturänderung erfolgt durch Akkumulation der nicht für den Abtrag verwendeten Laserenergie im Material und ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Für Kupfer und Aluminium steigt die Absorption mit der Temperatur, während sie für Stahl leicht abnimmt [42]. Die Fresnelschen Formeln beschreiben die Intensität des reflektierten und transmittierten Lichtes an einer dielektrischen Grenzfläche [13]. Abgeleitet von den Fresnelschen Formeln kann die Reflexion linearpolarisierter Laserstrahlung an Oberflächen mit den Formeln (17) und (18) für senkrechte und parallel Polarisation in Abhängigkeit

des Auftreffwinkels α beschrieben werden, wobei n den Brechungsindex und k den Extinktionskoeffizienten oder Absorptionsindex darstellen [42]. Für Metalle und optisch dichte Materialien gilt für die Absorption Formel (19).

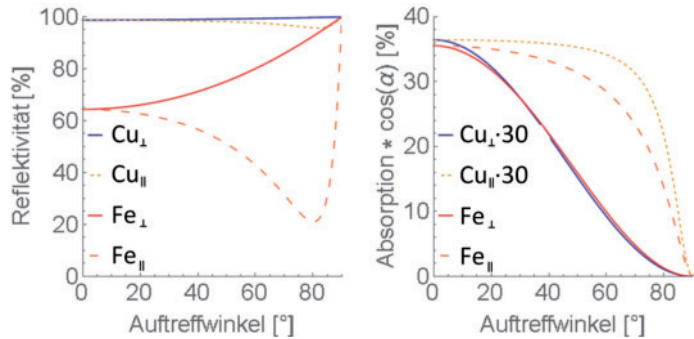
$$R_s = \frac{(n - \cos \alpha)^2 + k^2}{(n + \cos \alpha)^2 + k^2} \quad (17)$$

$$R_p = \frac{\left(n - \frac{1}{\cos \alpha}\right)^2 + k^2}{\left(n + \frac{1}{\cos \alpha}\right)^2 + k^2} \quad (18)$$

$$A_{s,p} = 1 - R_{s,p} \quad (19)$$

Aus dem Verlauf der Reflexionskurven in Abbildung 34 links für senkrecht und parallel polarisierter Laserstrahlung für Stahl und Kupfer wird ersichtlich, dass Reflexion und Absorption teilweise stark vom Auftreffwinkel, der Polarisationsrichtung und Material abhängen.

Abbildung 34:
Winkelabhängig-
keit von Reflexion
und Absorption
der Laserstrahlung



Das Minimum der Reflektivität der parallel zur Einfallsebene polarisierten Anteile wird als Brewster-Winkel bezeichnet und kann nach Formel (20) berechnet werden [13]. Für Metalle liegt der Brewster-Winkel typischerweise im Bereich von gut 80°.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_{Material}}{n_{Luft}}\right) \quad (20)$$

$$\text{mit } n_{Luft} = 1 \text{ und } n_{Material} = \sqrt{n^2 + k^2}$$

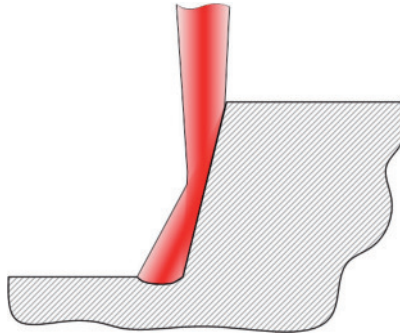
In Abbildung 34 rechts ist die Winkelabhängigkeit der Absorption inklusive des Effekts der beschriebenen Projektion dargestellt. Für parallele Polarisation bleibt die eingekoppelte Energie über einen relativ großen Winkelbereich konstant und fällt bei steileren Flankenwinkeln steil ab. Für senkrecht zur Flanke polarisierte Laserstrahlung nimmt die Energieeinkopplung sehr schnell ab, weshalb sich an diesen Flanken deutlich flachere Winkel einstellen.

Die Laserstrahlung von Hochleistungs-UKP-Lasern ist in der Regel linear polarisiert. Hätte man ein ideales Bearbeitungssystem ohne Positionsabweichungen mit ideal rechteckigen Strahlprofil so könnte man entsprechend des Projektionsmodells und des Reflexionsgrades auf Grund der winkelabhängigen Energieeinkopplung keine ideale Rechtecksenkung realisieren. Aus dem Kurvenverlauf in Abbildung 34 ist zusätzlich erkennbar, dass die Flankenwinkel senkrecht zur Polarisationsrichtung flacher ausfallen werden, als parallel zur Polarisationsrichtung.

5.3.4 Grabenbildung unterhalb von Flanken

Im vorherigen Kapitel wurde dargelegt, dass vor allem auf schrägen Flächen nicht die gesamte Laserenergie absorbiert wird. Ein Teil der Strahlung wird an der Oberfläche reflektiert. Auf schrägen Flächen oder Stufen wird diese Strahlung in Richtung des Bodens einer Vertiefung umgelenkt. Dies ist schematisch in Abbildung 35 skizziert. Diese reflektierte Leistung wird entsprechend unterhalb der Stufe am Grund der Vertiefung absorbiert und kann bei ausreichender Pulsenergie dort zu einem Abtrag führen. Mit der Zeit kann sich auf diese Art nach vielen Überfahrten ein unerwünschter Graben am Fuße der Stufe bilden.

Abbildung 35:
Schematische Darstellung der Reflexion der Laserstrahlung an Flanken des Werkstücks



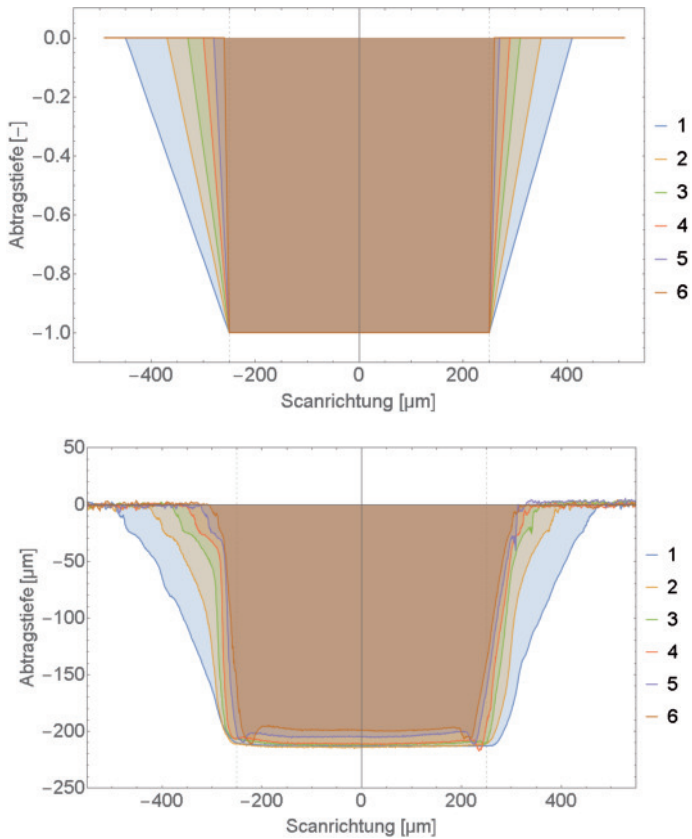
Dieser Effekt wurde mit Hilfe trapezförmiger Profile untersucht. Insgesamt wurden 4 unterschiedliche Abtragstiefen mit je 6 unterschiedlichen Flankensteilheiten untersucht. Abbildung 36 zeigt den Vergleich der Sollprofile und der gemessenen Profile für eine Abtragstiefe von $200\text{ }\mu\text{m}$. Ab einem Flankensollwinkel von ca. 75° (Kurve 4) sind die ersten Gräben unterhalb der Stufe im Messprofil sichtbar.

Allerdings sind vor Allem an der fallenden Flanke (links) deutliche Abweichungen von der trapezförmigen Sollgeometrie erkennbar. Diese Abweichungen sind größtenteils auf Ablagerungen an der Flanke zurückzuführen. Am oberen Rand ist zusätzlich eine leichte Verbreiterung und Ver rundung der Sollstruktur erkennbar, was auf das Schaltverhalten des Modulators zurückzuführen sein dürfte.

Abbildung 36:
Einfluss der Stufensteigung auf
die Grabenbildung

Oben:
Sollkurven

Unten:
Messkurven



Die Ergebnisse dieser Untersuchung können auf Grund der beschriebenen Abweichungen nur entsprechend ihrer Tendenz interpretiert werden. Belastbare Aussagen werden hierdurch allerdings verhindert. Aus diesem Grund und weil in dieser Arbeit die Untersuchung der systembedingten Abweichungsursachen im Vordergrund steht, wird dieser Effekt im Weiteren nicht betrachtet.

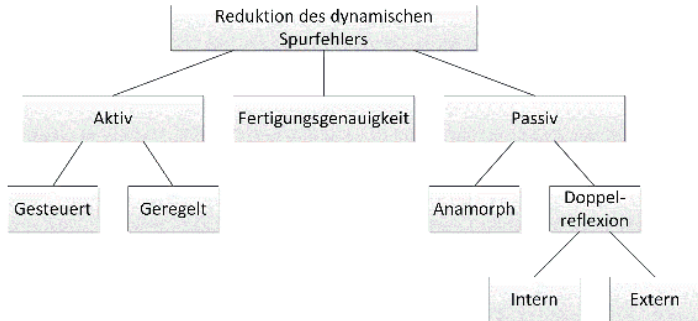
6 Systemkonzepte zur Reduktion von Geometrieabweichungen

In Kapitel 5 wurden die verschiedenen Ursachen, welche Geometrieabweichungen zur Folge haben, beschrieben. Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten behandelt, um den Einfluss dieser Abweichungsursachen bereits während der Systemauslegung zu reduzieren oder Maßnahmen zu treffen, um diese Abweichungsursachen während des Prozesses zu kompensieren.

Die ersten Abweichungen treten auf Grund des Quantisierens bzw. der Berechnung der rasterbasierten Prozessdaten mit einer definierten Pixelgröße auf. Der Einfluss der Quantisierung und Pixelgröße wurde in Kapitel 5.1 erläutert. Die durch diesen Schritt entstehenden Abweichungen können nur durch kleinere Pixel bzw. eine höhere Auflösung verringert werden. Gegebenenfalls kann es sinnvoll sein, die Lage der Pixel an kritischen Strukturen auszurichten. Da designorientierte Texturen als Bitmap erstellt werden, stellt dieses Phänomen nur für technische Strukturen aus 3D-CAD-Modellen ein potentiell Problem dar. Der Designer muss sich die Prozessdaten nach der Konvertierung eines 3D-Modells zu einer pixelbasierten Höhenkarte diesbezüglich genau anschauen.

Die systembedingten Abweichungsursachen aus Kapitel 5.2 sind größtenteils bekannt und können bereits während der Konstruktionsphase des Systems berücksichtigt werden. Der dynamische Spurfehler stellt die Abweichungsursache mit der größten Gewichtung bei dem entwickelten System dar. Abbildung 37 zeigt die Aufteilung möglicher Maßnahmen zur Reduktion des dynamischen Spurfehlers [29]. Zum einen können die Fertigungstoleranzen verringert werden, was allerdings nur bis zu einem gewissen Maß sinnvoll und möglich ist.

Abbildung 37:
Systemkonzepte
zur Reduktion des
dynamischen Spur-
fehlers
[29]



Die konstruktiven Maßnahmen können in aktive und passive Ansätze unterteilt werden. Die aktiven Kompensationsmaßnahmen können gesteuert oder geregelt ausgeführt werden und sind in Kapitel 6.2 beschrieben. Passive Kompensationsmaßnahmen bestehen aus zusätzlichen optischen Komponenten oder konstruktiven Maßnahmen, welche im Rahmen der Fertigung realisiert werden und danach nicht oder nur bedingt anpassbar sind. Diese Gruppe der Kompensationsmaßnahmen ist in Kapitel 6.1 beschrieben. Die in diesen Kapiteln dargestellten Maßnahmen lassen sich teilweise auf weitere systembedingte Abweichungsursachen anwenden. Diese Möglichkeiten werden entsprechend erklärt.

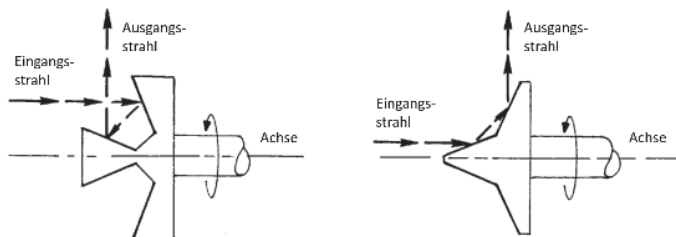
Die prozessbedingten Abweichungsursachen, beschrieben in Kapitel 5.3, sind abhängig von den verwendeten Laserparametern und dem zu bearbeitenden Material. Lediglich die Herausforderung der Wiederanhaftung bzw. des Abtransports des ablatierten Materials ist eine immer vorhandene Aufgabe. Die entstehenden Stäube müssen mit einer geeigneten Absaugung von der Bearbeitungszone entfernt werden. Nur so können neben dem Geometrieerhalt auch die Gesundheit des Benutzers und die Langlebigkeit der Maschine gewährt werden [44]. Ansätze für eine effiziente Absaugung bei der Materialbearbeitung mit einem Polygonscanner werden in Kapitel 6.3 besprochen.

6.1 Passive Reduktion der Positionierabweichungen

Eine passive Hauptabweichungsursache liegt in der Toleranz der Montage des Polygons auf der Motorachse, was zu einem Taumeln des Polygons und entsprechend zu einer periodischen Verschiebung der Scanlinie führt. Die Auswirkungen wurden in Kapitel 5.2.2.2 ausführlich besprochen. Es gibt wenigstens zwei Ansätze – neben der genaueren Montage – resultierende Abweichungen zu reduzieren.

Eine passive Variante zur anamorphen Kompensation ist den Laserstrahl mit einer Zylinderlinse quer zur Scanrichtung auf das Polygon zu fokussieren. Der Effekt der ersten Zylinderlinse muss nach der Ablenkung des Laserstrahls durch das Polygon durch eine zweite Zylinderlinse nah der Scanebene oder einer torischen Linse nah dem Polygon wieder aufgehoben werden. Alle Abweichungen quer zur Scanrichtung werden auf diese Art mit dem Verhältnis der Breite der fokussierten Linie auf dem Polygon zu dem normalen Rohstrahldurchmessers skaliert [28]. Entsprechend der Liniengbreite kann das Polygon schmaler ausgelegt werden. Im Gegenzug erhöht sich die Intensität der Laserstrahlung auf dem Polygon, was vor allem bei der Verwendung von hohen Laserintensitäten, wie sie bei Hochleistungs-UKP-Lasern auftreten, zu einer Schädigung des Polygons führen kann.

Abbildung 38:
Interne Doppelreflexion an Polygonspiegeln zur Kompensation des Taumelfehlers [29]

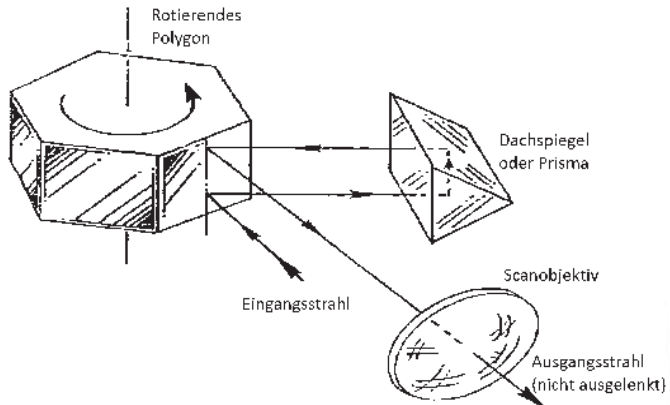


Eine passive bzw. konstruktive Möglichkeit zur Kompensation des dynamischen Spurfehlers bedingt durch das Taumeln des Polygons ist eine Doppelreflexion. Hier gibt es interne und externe Varianten. Zum einen kann das Polygon so gefräst werden, dass der Laserstrahl über mindestens zwei rotierende Spiegelflächen umgelenkt wird. Diese Möglichkeit ist in Abbildung 38 links als „Butterfly“ und rechts als „Offener Spiegel“ Scanner dargestellt [29]. Durch diese interne Doppelreflexion wird der Taumelfehler aufgehoben, da sich die beiden Spiegelflächen gemeinsam bewegen. Beide Spiegelflächen besitzen unabhängige Schleiffehler, weshalb sich diese Schleiffehler addieren oder aufheben können.

Bei diesen beiden Polygonausführungen erfolgt die Laserstrahleinkopplung parallel anstatt senkrecht zur Rotationsachse: Hierdurch verringert sich die Projektionsfläche des Laserstrahls auf dem Polygon in Rotationsrichtung, was einen positiven Effekt auf die Effizienz des Polygons hat. Allerdings ist die Facettenform trapezförmig, weshalb die Facettenlänge an Stellen nahe der Rotationsachse deutlich verkürzt. Dies hebt den eben genannten Vorteil der Effizienz unter Umständen wieder auf. Zusätzlich ist der Fertigungsaufwand und entsprechend die Kosten deutlich höher als bei dem in dieser Arbeit verwendeten System.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines externen Retroreflektors, der den abgelenkten Strahl auf die gleiche Facette zurückwirft. Dies ist in Abbildung 39 dargestellt. Durch die zweifache Reflexion auf der gleichen Facette hebt sich der dynamische Spurfehler auf. Allerdings verdoppelt sich der Ablenkwinkel, wodurch die Facetten kürzer ausgelegt werden können oder müssen [29], damit der maximal nutzbare Scanwinkel des Objektivs nicht überschritten wird. Zusätzlich wandert der zweite Auftreffpunkt auf dem Polygon durch die Scanbewegung der ersten Reflexion. Hierdurch würde der Laserstrahl schneller auf zwei Facetten aufgeteilt werden, was wiederum zu einem verringerten Wirkungsgrad des Polygons führt (vergleiche Kapitel 4.2).

Abbildung 39:
Externe Doppelreflexion eines Polygonscanners zur Kompensation des dynamischen Spurfehlers [29]



Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für einige Abweichungsursachen passive konstruktive Maßnahmen sinnvoll sind. Auf Grund der mechanischen Komplexität und/oder Einschränkungen durch optische Zerstörschwellen, sind die konstruktiven Maßnahmen bei der Verwendung von Hochleistungs-UKP-Lasern nur bedingt anwendbar. In den meisten Fällen sind die aktiven Maßnahmen aus dem folgenden Kapitel sinnvoller, da mit diesen Fertigungstoleranzen im Betrieb ausgeglichen werden können. Zusätzlich können mit den aktiven Maßnahmen teilweise Funktionalitäten, wie das temporäre Kompensieren einer Werkstückbewegung, ergänzt werden.

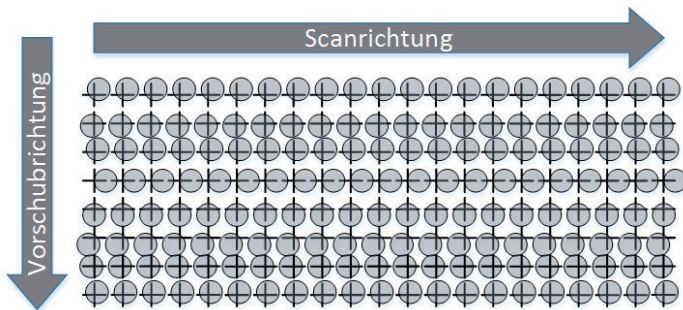
6.2 Aktive Kompensation der Positionsabweichungen

Positionsabweichungen entstehen unter anderem, da die Teilsysteme Vorschubachse, Polygonscanner und Laser für sich freilaufend sind. Zusätzlich existieren Abweichungen, welche auf Fertigungstoleranzen des Polygons und der optischen Komponenten zurück zu führen sind. Die Abweichungsursachen in Vorschub- und Scanrichtung sind unabhängig voneinander und zugehörige Kompensationsmaßnahmen können getrennt betrachtet

werden. Der Anfang des Bearbeitungsfeldes ist über eine Achsposition definiert. Die Steuerung wertet das Positionssignal der Achse aus und berechnet die aktuelle Bildzeile in Abhängigkeit der aktuellen Achsposition, des eingestellten Linienabstandes und der Startposition des Bearbeitungsfeldes. Entsprechend der Abweichungsbetrachtung aus Kapitel 5.2.2.1 existiert eine Abweichung von bis zu einem Linienabstand in Vorschubrichtung beim Eintritt in das Bearbeitungsfeld bei jeder Überfahrt. Dieser Abweichung in Vorschubrichtung ist der dynamische Spurfehler, beschrieben in Kapitel 5.2.2.2, überlagert.

Dem Beginn jeder Facette ist eine Polygonposition zugeordnet. Ab dieser Position werden die Daten der aktuellen Bildzeile mit der Laserpulsfrequenz oder dem Ausgabetakt pixelweise ausgegeben und der Lasermodulator angesteuert. Da Polygonposition und Lasertakt nicht synchronisiert sind, existiert in Scanrichtung eine Abweichung von etwas mehr als einem Pulsabstand, wie in Kapitel 5.2.2.4 hergeleitet wurde.

Abbildung 40:
Schematische Darstellung der Positionierabweichungen der Laserpulse

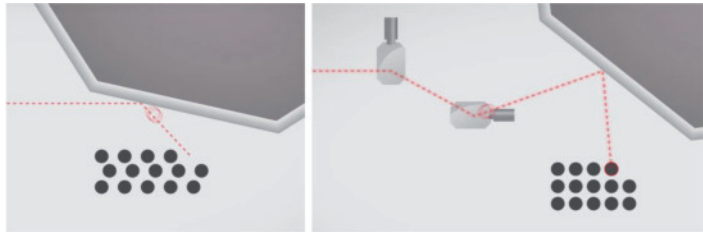


Vereinfacht können die Positionierabweichungen so zusammengefasst werden, dass jede Scanlinie in Vorschub- und Scanrichtung etwas verschoben ist. Dies ist in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Die Kreuze stellen die Sollposition und die Kreise die reale Position der Laserpulse dar. Diese Verschiebung wird von optischen Verzeichnungen des Objektivs und von Geschwindigkeitsvariationen in Scan- und Vorschubrichtung überlagert.

Es gibt prinzipiell zwei Herangehensweisen um Positionierabweichungen aktiv zu kompensieren. Eine Möglichkeit besteht darin einen Hybrid-Scanner zu verwenden, um auftretende Positionierabweichungen aktiv zu kompensieren. Eine Alternative stellt das Eingreifen in den Ablauf zweier Teilsysteme in Abhängigkeit des Status des dritten Teilsystems dar. Ziel beider Ansätze ist das Raster der platzierten Laserpulse äquidistant zu erhalten und die Raster aller Bearbeitungsschichten exakt zueinander auszurichten. Dies ist am Beispiel des Hybridscanners im Vergleich zum nicht aktiv kompensierten Fall in Abbildung 41 dargestellt.

Abbildung 41:
Kompensation der
Positionierabweichung mit einem
Hybridscanner

Quelle: [45]



Der Ansatz des Hybridscanners verwendet als zusätzliche Komponenten einen zweiachsigen Galvanometerscanner vor dem Polygonscanner, um auftretende Positionsabweichungen auszugleichen. Diese Positionsabweichungen werden anhand der aktuellen Polygon- und Achsposition sowie des Zeitpunktes der Laserpulse berechnet. Abbildung 41 links zeigt die Platzierung der Laserpulse im nicht kompensierten Betrieb mit der resultierenden Streuung vergleichbar mit Abbildung 40. Durch die Verwendung eines Hybridscanners (Abbildung 41 rechts) können die Pulse positionsgenau platziert werden. Durch die überlagerte Scanbewegung des Hybridscanners können alle bekannten dynamischen Positionsabweichungen des Bearbeitungssystems ausgeglichen werden. Der Einfluss der Abweichungsursachen optische Verzeichnung des Objektivs, Synchronisierungsabweichungen in Vorschub und Scanrichtung, sowie des dynamischen Spurfehlers kann mit einem Hybridscanner während der Bearbeitung auf ein Minimum reduziert werden.

Diesen Ansatz verfolgen Scanlab [45], Lincoln Laser [46] und Raylase [40]. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Kompensation innerhalb des Polygonscanners ohne Anpassung der anderen Teilsysteme erfolgen kann. Lediglich der Lasertakt und die Positions- oder Geschwindigkeitssignale der Achse und des Polygonscanners müssen vorliegen. Die Positions- oder Geschwindigkeitssignale sind bereits für den nicht kompensierten Betrieb notwendig. Eine Schnittstelle für den Lasertakt ist in der Regel vorhanden oder einfach nachrüstbar. Des Weiteren ergeben sich bei einem Hybridscanner die Möglichkeiten einen Vorschub des Werkstücks für mehrfache Linienüberfahrten temporär zu kompensieren oder auf eine Vorschubachse für das Bewegen des Werkstücks zu verzichten.

Den Ansatz der Kopplung der Teilsysteme über den Eingriff in den Ablauf zweier Teilsysteme in Abhängigkeit des dritten Teilsystems verfolgt Nextscan mit seiner SuperSync™ Technologie [32]. Zum einen wird die Vorschubachse so verzögert, dass der Eintritt in das Bearbeitungsfeld synchron mit dem Beginn der ersten Facette erfolgt. Die Achse folgt einem virtuellen Encodersignal, welches durch die Polygonscannersteuerung erzeugt wird. Zusätzlich könnte die Vorschubgeschwindigkeit der Achse entsprechend dem dynamischen Spurfehler des Polygons mit einer kleinen Oszillation überlagert werden, um die Abweichungen in Vorschubrichtung aktiv zu kompensieren. Hierdurch würden alle Scanlinien in Vorschubrichtung exakt übereinanderliegen.

Viele Hochleistungs-UKP-Laser arbeiten mit einer deutlich höheren und konstanten Oszillatorfrequenz als die verwendete Laserpulsfrequenz. So arbeitet der PicoBlade der Firma Time Bandwidth Products (inzwischen Lumentum) intern mit 82 MHz, die maximale Ausgangspulsfrequenz beträgt allerdings 8,2 MHz [33]. Um die Synchronität der Laserpulse zum Linienanfang sicherzustellen läuft zum einen die Polygonscannersteuerung mit dem Laseroszillatortakt, zum anderen wird in die Steuerung des Pulspickers eingegriffen.

Abbildung 42:
Schematische Darstellung des Syper-Sync™ Prinzips

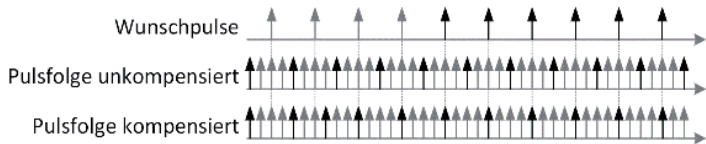


Abbildung 42 zeigt den prinzipiellen zeitlichen Verlauf dieser Kompensationsart. In diesem Beispiel ist die Laseroszillatorfrequenz 4-mal so hoch wie die gewünschte Pulsfolge. Verstärkte bzw. gewünschte Pulse sind in schwarz und unterdrückte Pulse in grau dargestellt. Trifft der Facettenanfang nicht genau auf einen Laserpuls, so ist in diesem Beispiel die komplette Pulsfolge der Scanlinie um einen halben Pulsabstand verschoben. Bei der Kompensation wird vorausschauend zweifach der 3. statt dem 4. Laseroszillatorpuls in den Verstärker geleitet, so dass der Zeitpunkt der verstärkten Laserpulse mit dem der Wunschkpulse übereinstimmt.

Alternativ kann die Oszillatorfrequenz bei einigen Lasern von außen vorgegeben werden [39], so dass auch hier minimale Verschiebungen der Pulsfolge möglich sind. Der Vorteil dieses Kompensationsansatzes ist, dass kaum zusätzliche Komponenten benötigt werden. Allerdings müssen die beiden Teilsysteme Vorschubachse und Laser entsprechend modifiziert sein bzw. diese Möglichkeiten zulassen. Diese Lösung ist somit nicht in allen Systemen realisierbar.

6.3 Reinigung der Werkstückoberfläche

In Kapitel 5.3.2 wurde deutlich gezeigt, dass das abgetragene Material für eine saubere Struktur aus der Prozesszone entfernt werden muss. Bei der Bearbeitung von Stahl mit 500 kHz und einem Pikosekundenlaser konnten vor allem Partikel mit einer Größe von 70 nm bei mittlerer bis hoher Konzentration nachgewiesen werden. Bei 200 kHz lag der Schwerpunkt der Partikelgröße bei 100 nm mit einem Spektrum der Partikelgröße von 30 – 160 nm [44]. Da sich die Partikelgrößen hauptsächlich im Nanometerbereich befinden, können sie die Lunge-Blut-Barriere überwinden und stellen ein hohes Gesundheitsrisiko dar [47].

Neben der Gefährdung des Benutzers durch die Stäube, kann die Bearbeitungsmaschine Schaden nehmen. Die nicht erfassten Partikel können Optiken und Spiegeln verschmutzen und durch die Absorption von Laserstrahlung auf der Oberfläche irreversible Schäden verursachen. Zusätzlich können Lager der Antriebselemente oder Elektronik der Maschine durch abgelagerte Partikel in ihrer Funktion beeinträchtigt werden, was zu einer Reduktion der Maschinenausfallzeit führt.

In jedem Fall ist zu gewährleisten, dass die Erfassungseinrichtung sehr nah am Entstehungsort der Schadstoffe positioniert wird und gegebenenfalls bei örtlich veränderbaren Prozessen automatisch nachgeführt wird [44]. Der Vorteil des Polygonscannersystems ist, dass die Bearbeitungsstelle entlang der Scanlinie geometrisch konstant zu dem Bearbeitungskopf angeordnet ist, weshalb sich – im Vergleich zu der Strahlablenkung mit einem zweiachsigen Scanner – mehr Möglichkeiten bezüglich der Absaugung ergeben.

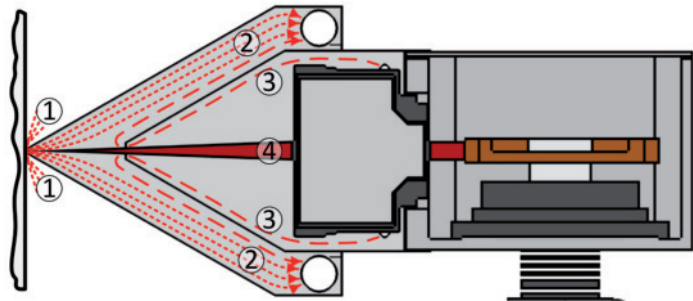
Bei der Bearbeitung mit einem Polygonscanner wird der Laserstrahl entlang einer Linie mit bekannter Länge abgelenkt und ist bei einer typischen Brennweite von 163 mm und einem Rohstrahldurchmesser von bis zu 20 mm 5 mm oberhalb des Fokus nur noch 0,6 mm breit. Daher können

sehr konzentrierte und lokale Absaugungsstrategien für dieses Bearbeitungssystem entwickelt und angewendet werden. Der Querschnitt einer solchen Schlitzabsaugung ist in Abbildung 43 illustriert.

Die koaxiale Absaugung besteht aus einer geschachtelten Düsen- / Absaugungskombination. Die schlitzförmige Absaugung ist so gestaltet, dass die Luft auf einem schmalen Streifen dicht oberhalb der Werkstückoberfläche abgesaugt wird. Die Luft strömt seitlich über das Werkstück zu der Bearbeitungsstelle ① und durch die schmale schlitzförmige Öffnung der Absaugung, wodurch ein Unterdruck an der Bearbeitungsstelle erzeugt wird. Dieser fällt allerdings abhängig von der Absaugung und dem verbindenden Rohr- bzw. Schlauchsystem relativ gering aus. Entsprechend niedrig ist der Luftstrom. Die abgesaugte Luft ② wird zu zwei seitlich liegenden Absaugstutzen durch den Zwischenraum zwischen Absaugung und Schutzdüse geleitet. Die innenliegende, schlitzförmige Düse ist dicht mit dem Scannergehäuse verbunden und besitzt zwei Druckluftzugänge. Die Fokussieroptik wird von dieser Düse umschlossen. Durch den Schutzluftstrom ③, welcher die Düse kollinear mit dem fokussierten Laserstrahl ④ passiert, werden Partikel effizient von der Fokussieroptik ferngehalten. Nachdem der Schutzluftstrom die Düse verlassen hat, wird er gemeinsam mit der abgesaugten Luft und den Partikeln zu den beiden Absaugstutzen geleitet.

Abbildung 43:
Konzeptskizze der
getesteten Koaxi-
alabsaugung für
einen Polygo-
nscanner

- 1: Zuströmende
Luft
- 2: Abgesaugte
Luft
- 3: Schutzluftstrom
- 4: Fokussierter La-
serstrahl



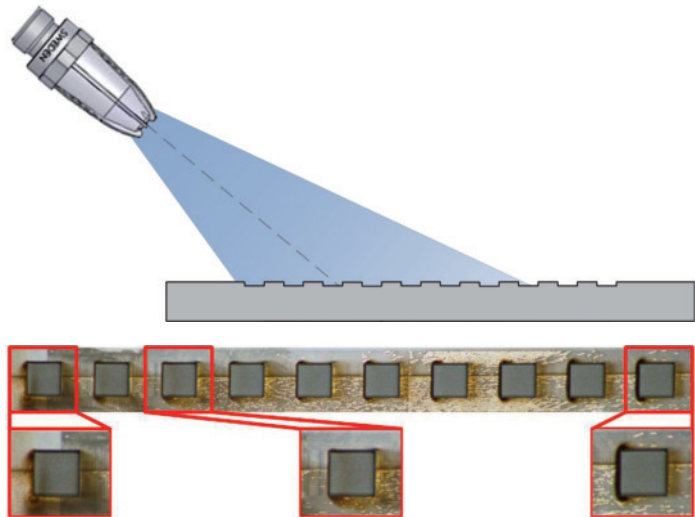
Die schmale Schlitzdüse fängt die Partikel, welche sich auf Grund des Dampfdrucks vom Werkstück entfernen gut ein und leitet sie zur Absaugung. Allerdings ist der Luftstrom auf Grund des geringen Unterdrucks und Querschnitts sehr gering und die Ablagerungen auf dem Werkstück bleiben bestehen bzw. werden nicht entfernt.

Um diese Partikel zu entfernen wird ein Impuls benötigt, welcher nur mit Druckluftdüsen zu erreichen ist. Abbildung 32 in Kapitel 5.3.2 zeigt den Einfluss des Druckluftimpulses auf das Prozessplasma sehr anschaulich. Die Auswirkung des Luftstroms einer punktförmigen Lavaldüse auf das Ablagerungsverhalten bei Rechtecksenkungen wurde mit der Anordnung aus Abbildung 44 oben untersucht. Der Luftstrom einer Lavaldüse trifft schräg auf das Werkstück auf und transportiert die abgetragenen Partikel vom Bearbeitungspunkt fort. Das Ergebnis ist in Abbildung 44 unten zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Maß der Ablagerungen vom Abstand der Bearbeitung zum Auftreffpunkt des Luftstroms abhängt. Kurz hinter dem Auftreffpunkt zwischen dem 2. und 3. Quadrat der Abbildung 44 ist ein Bereich erkennbar, in dem kaum Ablagerungen zu finden sind. Die Scanrichtung wie auch die Drucklufttrichtung ist auf der Abbildung von links nach rechts. Auf dem Grund der Senkungen ist allerdings eine diffuse Schattierung mit der Farbe der Ablagerungen sichtbar. Dies lässt darauf schließen, dass der schräg von oben auftreffende Luftstrom die Partikel zwar von der Hauptablagerungszone – der Flanke – entfernt, ein Teil der Partikel allerdings in die Vertiefung gedrückt wird. Mit zunehmenden Abstand zum Auftreffpunkt des Luftstroms nehmen die Ablagerungen an der fallenden Flanke wieder deutlich zu.

Abbildung 44:
Einfluss eines
punktförmigen
Luftstroms auf
Materialablagerun-
gen

Oben:
Schematische An-
ordnung von
Werkstück, Düse
und Luftstrom

Unten:
Ablagerungen im
Prozessergebnis
abhängig von der
Lage zum Luft-
strom



Die vorangegangenen Betrachtungen führen zu den folgenden drei Anforderungen an die Absaugung:

1. Konstanter Impuls durch den Luftstrom über die komplette Bearbeitungslinie
2. Hoher Querschnitt des Absaugungssystems für einen hohen Volumenstrom
3. Geführte und beschränkte Ausbreitungsrichtung des Luftstroms, damit alle Partikel durch die Absaugung eingefangen werden.

Die bisherigen Anordnungen erfüllen immer nur Anforderung 2 oder 3. Um alle Anforderungen zu erfüllen müssen mehrere Druckluftdüsen beidseitig der Bearbeitungslinie so angeordnet werden, dass sich die einzelnen Luftströme zu einem konstanten hohen Luftstrom in Scanrichtung vereinen. Dieser Luftstrom muss zu der Absaugung mit einem großen Querschnitt geführt werden. Hierfür sind seitliche Leitstrukturen mit integrierten

Düsen und eine Schlitzblende notwendig. Die Schlitzblende schließt den Luftkanal nach oben hin ab und besitzt einen schmalen Schlitz, der so gestaltet ist, dass der abgelenkte Laserstrahl ungehindert passieren kann. Hierbei handelt es sich um Designrichtlinien für die Prozessgasführung für Polygonscannersystem, welche in zukünftigen Projekten angewendet werden sollten.

Ein weiterer Aspekt sind Partikel, die sich trotzdem auf der Bearbeitungsstruktur ablagern. Diese können teilweise nur durch den Abtragsprozess selbst entfernt werden. Beim schichtweisen 2,5D-Abtrag nimmt die zu bearbeitende Fläche mit fortschreitender Prozessdauer ab. Auf den Flächen, die nicht mehr bearbeitet werden und seitlich des Bearbeitungsfeldes liegen, lagern sich daher zunehmend Partikel ab.

Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laser besitzen bedingt durch die Laserkristalleigenschaften linear polarisierte Laserstrahlung. Leistungsmodulatoren, die auf dem Pockelseffekt basieren, rotieren bei Anlegen einer Spannung die Polarisationsrichtung des durch den Modulator geleiteten Strahls. Der Anteil der gedrehten Polarisation kann mit einem Polarisationsfilter herausgefiltert werden, so dass in Kombination von Pockelszelle und Polarisator eine Leistungsmodulation realisiert werden kann. Das Verhältnis des Leistungsanteils der linearen Polarisation des Lasers liegt in der Regel oberhalb von 100:1, weshalb immer ein gewisser Anteil der Laserleistung den Leistungsmodulator passieren kann. Bei mittleren Laserleistungen von mehreren 100 Watt kann hierdurch eine kontinuierliche Laserleistung von bis zu mehreren Watt auf das Werkstück geleitet werden. Die Leistung dieser Laserstrahlung ist in der Regel nicht ausreichend für einen ungewollten Abtrag, kann allerdings zu einer farblichen Veränderung der Oberfläche, verstärkter Anhaftung der bereits abgetragenen Partikel und einer Erwärmung der Werkstückoberfläche führen. Neben der Änderung der optischen Eigenschaften der Oberfläche kann die Erwärmung der Materialoberfläche zu einer Verschlechterung der Abtragsqualität führen.

Die Partikel und optisch veränderte Oberfläche lassen sich nicht mit Salzsäure, sondern nur durch einen flächigen Laserabtrag entfernen. Aus diesem Grund wurden Reinigungsüberfahrten in den Prozessablauf integriert. Der Benutzer hat die Möglichkeit z.B. alle 256 Schichten die Werkstückoberfläche von Partikeln und Anlauffarben zu reinigen. Während einer Reinigungsüberfahrt, wird der Laser innerhalb des gesamten Bearbeitungsfeldes freigegeben, so dass auf der gesamten Fläche eine dünne Schicht abgetragen wird. Hierdurch werden flächig abgelagerte Partikel und Anlauffarben ausreichend entfernt. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass hierdurch die Geometrie verfälscht werden kann. Der Benutzer muss daher darauf achten, dass das Verhältnis von Reinigungsabtrag zu Nutzabtrag in einem sinnvollen Verhältnis liegt.

7 Konzepte zur statistischen Abweichungskompensation und Erhöhung der Abtragsgenauigkeit

In den vorangegangenen Kapiteln 5 und 6 sind die wichtigsten Ursachen für Geometrieabweichungen beim schichtweisen und rasterbasierten Abtrag mit Ultrakurzpulslasern und einem Polygonscannersystem und aktive, hardwarebasierte Maßnahmen zur Reduktion dieser Abweichungen beschrieben. Im einleitenden Kapitel wurde die Frage gestellt, ob die auftretenden Abweichungen mit Hilfe der Abweichungskennnisse simuliert und gegebenenfalls kompensiert oder vermindert werden können. Hierfür wird in den folgenden Kapiteln 7.1 und 7.2 die statistische Gesamtfehlerfunktion des Bearbeitungssystems berechnet und mit realen Abtragsergebnissen verglichen. Anschließend wird in den Kapiteln 7.3 und 7.4 die Vorgehensweise zur softwarebasierten Vorkompensation der Abweichungen und deren Effektivität beschrieben.

Während des Prozesses bzw. der Übertragung der Daten in das Werkstück, werden die Daten entsprechend der Übertragungsfunktion des Systems übertragen. Vergleicht man das Höhenbild der Solldaten mit dem Höhenbild des Prozessergebnisses, kann die Übertragungsfunktion für die systembedingten Geometrieabweichungen als Punktspreizfunktion dargestellt werden. Aus Sicht der Signal- oder Bildverarbeitung werden die Solldaten bzw. das Sollhöhenbild durch die Bearbeitung mit der Punktspreizfunktion des Bearbeitungssystems gefaltet, um das Prozessergebnis zu bilden.

Diese Darstellung ist nur für die Punktspreizfunktion gültig und nicht für die Geometrieabweichungen bedingt durch Wiederanhaftung, den maximalen Flankenwinkel und die zugehörige Grabenbildung. Die Wiederanhaftung ist ein Phänomen, das durch eine geeignete Absaugstrategie und entsprechenden konstruktiven Maßnahmen zu vermeiden oder zumindest zu minimieren ist. Der maximale Flankenwinkel stellt eine physikalische

Grenze für die erreichbare Flankensteilheit dar und ist durch das Zusammenspiel von Material und Laserparametern gegeben. Im Gegensatz zu der linearen und ortsunabhängigen Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems – beschrieben durch dessen Punktspreizfunktion – ist der Einfluss des maximalen Flankenwinkels und der Grabenbildung abhängig von der Lage des aktuellen Bearbeitungspunktes zu der bisherigen Bearbeitung. Beide Abweichungsursachen wirken z.B. bei einer Rechtecksenkung bei einer fallenden Flanke in bzw. bei einer steigenden Flanke entgegen der Scanrichtung. Die Grabenbildung ist zusätzlich an die Bedingung geknüpft, dass sie nur am unteren Ende von Stufen mit begrenzter Steilheit auftritt.

Der Zusammenhang zwischen Prozessdaten und Prozessergebnis für diese beiden Abweichungsursachen ist somit nichtlinear und ortsabhängig. Aus diesem Grund gibt es hierfür keine faltbare Übertragungsfunktion und keine Umkehrfunktion. Der Fokus dieser Arbeit auf der Analyse und Kompensation der systembedingten, linearen Abweichungsursachen, weshalb diese Abweichungsursachen nicht in das Modell einfließen.

7.1 Berechnung der Punktspreizfunktion

Wie bereits in Kapitel 2 einleitend erklärt wurde, beschreibt die Punktspreizfunktion oder Punktantwort des Systems, wie ein Bildpunkt der Prozessdaten entsprechend der Gesamtfehlerverteilung für alle Fehler des Systems in das Werkstück statistisch übertragen und entsprechend gestreut wird. Während des Prozesses treten eine Reihe Fehler mit einer statistischen Verteilung auf, welche in Kapitel 5 beschrieben sind. Die einzelnen Fehler sind unterschiedlichen Ursprungs, weshalb sie als unabhängig angenommen werden können. Die Summenfunktion der Summe zweier unabhängiger Zufallsvariablen erhält man durch Faltung ihrer Einzelverteilungen [48]. Auf diese Art kann aus den einzelnen Fehlerverteilungen eine Gesamtfehlerverteilung berechnet werden. Der Einfachheit wird bei dieser Beschreibung eine ideale Gaußverteilung des Laserspots verwendet. Jede

gemessene Energieverteilung, die in ein Bild mit der Auflösung der Prozessdaten umgerechnet werden kann, kann für eine genauere Berechnung verwendet werden.

Folgende Einzelverteilungen gehen in die Fehlersummenfunktion ein:

1. Die Abweichung in Vorschubrichtung durch den Eintritt der Achse in das Bearbeitungsfeld ist durch PSF_{Eintritt} beschrieben (siehe Kapitel 5.2.2.1) und ist mit der Breite eines Spurbabstandes d_{Linie} gleichverteilt.
2. Der dynamische Spurfehler PSF_{Spur} wirkt in Vorschubrichtung und entspricht der gemessenen Verteilung aus Kapitel 5.2.2.2 gefaltet mit dem Rauschen des Lagers. Dies wurde mit einer Gaußverteilung mit einer Breite von $1,5 \mu\text{m}$ abgeschätzt.
3. Der Linienanfang in Scanrichtung wird, wie in Kapitel 5.2.2.3 beschrieben, genau eingestellt, weshalb der Fehler durch die Genauigkeit des Encoders vernachlässigt wird bzw. der Restfehler in PSF_{Sync} enthalten ist.
4. Der Fehler durch Synchronitätsabweichungen am Linienanfang in Scanrichtung PSF_{Sync} entspricht der Faltung der Gleichverteilungen der zeitlichen Auflösung der Steuerung und des Pulsabstandes, wie in Kapitel 5.2.2.4 beschrieben.
5. Die Fehlergröße PSF_{Spot} beschreibt die Energieverteilung im Laserfokus aus Kapitel 5.3.1., welcher in Vorschub- und Scanrichtung wirkt. Der Einfachheit wird der Laserfokus mit einer Gaußverteilung mit Durchmesser $(1/e^2)$ $32 \mu\text{m}$ bzw. $44 \mu\text{m}$ modelliert.

Abbildung 45 zeigt die Einzelfehlerverteilungen $PSF_{\text{Spur}} * PSF_{\text{Eintritt}}$ und PSF_{Sync} , welche für das Polygonscannersystem markant sind. In der linken Ansicht ist die statistische Streuung der Scanlinien in Vorschubrichtung dargestellt.

Hierbei sind der Taumelfehler (PSF_{Spur}) und die Toleranz der Lage der ersten Scanlinie bei Eintritt in das Bearbeitungsfeld ($\text{PSF}_{\text{Eintritt}}$) für einen Linienabstand von $15\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Brennweite von 163 mm berücksichtigt. Der Gesamtfehler in Vorschubrichtung $\text{PSF}_{\text{Vorschub}}$ in y-Richtung berechnet sich nach Formel (21), wobei PSF_{Spur} der gemessenen Taumelverteilung des Polygons aus Kapitel 5.2.2.2 und dem Spurabstand d_{Linie} entsprechen.

$$\begin{aligned}\text{PSF}_{\text{Vorschub}}(y) &= \text{PSF}_{\text{Spur}}(y) * \text{PSF}_{\text{Eintritt}}(y) \\ &= \text{PSF}_{\text{Spur}}(y) * \text{rect}\left(\frac{y}{d_{\text{Linie}}}\right)\end{aligned}\quad (21)$$

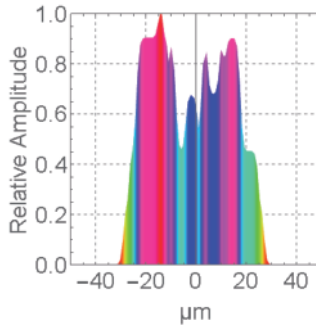
In der rechten Ansicht von Abbildung 45 ist die statistische Streuung der Laserpulse entlang der Scanlinie in x-Richtung auf Grund der Synchronitätsabweichungen am Anfang der Linie (PSF_{Sync}) für einen Pulsabstand von $15\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt.

$$\text{PSF}_{\text{Sync}}(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{T_{\text{LT}} \cdot v_{\text{Scan}}}\right) * \text{rect}\left(\frac{x}{T_{\text{ST}} \cdot v_{\text{Scan}}}\right)\quad (22)$$

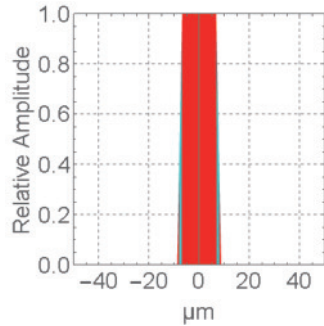
Zu beachten ist, dass die zeitlichen Toleranzen durch den Lasertakt T_{LT} und dem Steuerungstakt T_{ST} durch die Scanbewegung in einer Positionsabweichung resultieren. Hierfür müssen die zeitlichen Toleranzen mit der Scan­geschwindigkeit $v_{\text{Scan}} = 100\text{ m/s}$ multipliziert werden.

Von den beschriebenen Einzelverteilungen wirken $\text{PSF}_{\text{Eintritt}}$ und PSF_{Spur} in Achsvorschubrichtung und PSF_{Sync} in Scanrichtung. Auf Grund des Taumels des Polygons sind die zu erwartenden systembedingten Abweichungen in Vorschubrichtung deutlich größer als in Scanrichtung. Die Ausbreitung des Laserspots PSF_{Spot} bewirkt Abweichungen in beide Richtungen.

Abbildung 45:
Fehlerverteilungen
des Bearbeitungs-
systems in Scan-
und Vorschubrich-
tung



Streuung der Scanlinien in Vorschub-
richtung ($PSF_{Vorschub} = PSF_{Spur} * PSF_{Eintritt}$)



Streuung der Laserpulse in Scanrich-
tung (PSF_{Sync})

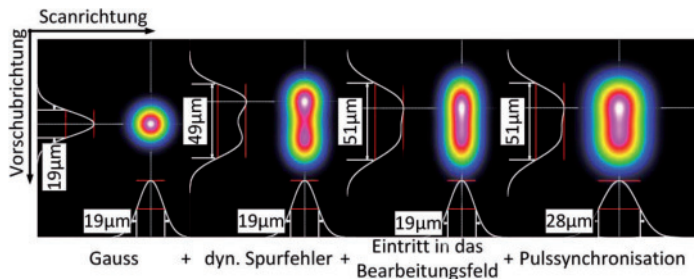
Die Summenfunktion aller Abweichungsursachen entspricht der Punktspreizfunktion beschrieben in Formel (23). Entsprechend der Assoziativ- und Kommutativgesetze der Faltung ist die Reihenfolge der Operationen vertauschbar, da die Abweichungsursachen unabhängig sind [49].

$$PSF_{System} = PSF_{Spur} * PSF_{Eintritt} * PSF_{Sync} * PSF_{Spot} \quad (23)$$

Abbildung 46 zeigt die Punktspreiz- oder Fehlerverteilungsfunktionen des ruhenden idealen Laserfokus im Vergleich zu der virtuellen Energieverteilung durch die Gesamtfehlerverteilungsfunktion. Die beschriebenen Positionierungsfehler bewirken eine deutliche und asymmetrische Vergrößerung der statistischen Verteilung der Laserenergie nach vielen Schichten. Zur Verdeutlichung des Effekts wurde ein Laserfokusbereich von $32 \mu m$ ($1/e^2$) verwendet. Da die virtuellen, statistischen Strahlprofile nicht mehr mit einem Gauß-Profil vergleichbar sind, ist in Abbildung 46 die Halbwertsbreite des virtuellen Strahlprofils dargestellt.

Abbildung 46:
Entwicklung des
virtuellen Bearbei-
tungsfokus durch
die statistischen
Abweichungsver-
teilungen

Links: idealer La-
serfokus
Rechts: virtuelle
Energieverteilung
während der Bear-
beitung



In Abbildung 46 links ist ein ideales Gauß-Profil des Laserstrahls mit einem Laserfokusbereich von $19\mu\text{m}$ ($1/2$) bzw. $32\mu\text{m}$ ($1/e^2$) dargestellt. Auf Grund der statistischen Verteilung des dynamischen Spurfehlers des Polygons verbreitert sich der virtuelle Fokus in Vorschubrichtung auf einen Fokusbereich von $49\mu\text{m}$ ($1/2$) bzw. $65\mu\text{m}$ ($1/e^2$). Die Abweichung beim Eintritt in das Bearbeitungsfeld vergrößert diesen virtuellen Fokus in Vorschubrichtung auf $51\mu\text{m}$ ($1/2$) bzw. $71\mu\text{m}$ ($1/e^2$), dargestellt im 3. Bild von links. In der Darstellung ganz rechts ist zusätzlich die Streuung der Pulse in Scanrichtung auf Grund der Synchronisationsabweichungen berücksichtigt, wodurch der virtuelle Fokus in Scanrichtung auf $28\mu\text{m}$ ($1/2$) bzw. $47\mu\text{m}$ ($1/e^2$) anwächst.

Die Konsequenz dieser Streuung der Laserenergie mit jeder einzelnen Schicht auf Grund der beschriebenen Abweichungsursachen ist, dass die Geometriegenauigkeit des Abtrags sinkt. Statistisch gesehen entspricht das Bearbeitungsergebnis mit dieser gestreuten Laserenergie einer Bearbeitung mit einem idealen Bearbeitungssystem ohne Positionierabweichungen, welches ein Strahlprofil entsprechend der Punktspreizfunktion des Bearbeitungssystems verwendet. Infolgedessen steigt die Auflösungsgrenze und somit die minimale Strukturgröße an.

7.2 Validierung der theoretischen Punktspreizfunktion

Die theoretische Betrachtung der Streuung der Laserenergie in den Kapiteln 5.2 und 7.1 führen zu der Erkenntnis, dass die Toleranzen des Bearbeitungssystems statistisch in einer Vergrößerung des Bearbeitungspunktes - wie in Abbildung 46 dargestellt – resultieren. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass sich die Streuungen der Energieeinbringung jeder einzelnen Bearbeitungsschicht zu dieser Gesamtverteilung aufsummieren. Nun gilt es zu prüfen, ob diese Annahme in der Realität zutrifft. Die Berechnung der PSF basiert auf der Messung der Facettenfehler und des Tauwinkels des Polygons. Alle weiteren Größen basieren auf theoretischen Annahmen, welche von den System- und Prozessparametern abgeleitet sind.

Abbildung 47 zeigt die Auswirkung der Punktspreizfunktion auf das Abtragsergebnis einer Rechtecksenkung mit einer Kantenlänge von 100 μm . Die Energieverteilung entspricht nicht der Pixelgröße und Form weshalb ideale Stufen nicht realisierbar sind. Dies resultiert in einem begrenzten Flankenwinkel und einer Verrundung der Kanten. Der Vergleich des Abtragsergebnisses und der Simulation zeigt eine relativ gute Übereinstimmung. Der Fehler in Vorschubrichtung fällt in der Simulation allerdings etwas größer aus, als in der Realität. In dieser Simulation sind maximaler Flankenwinkel und Grabenbildung durch Reflexion nicht berücksichtigt. Die Verrundung der Flanken und die Grabenbildung kompensieren sich teilweise.

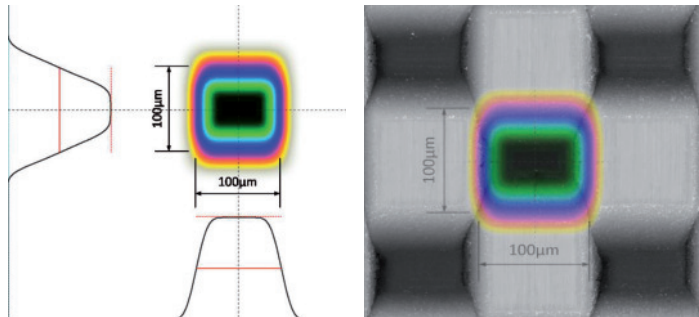
Das Beispiel der Rechtecksenkung entspricht dem Testfall der Sprungantwort des Bearbeitungssystems für steigende und fallende Flanken in beide Richtungen. Dieser Testfall enthält allerdings nicht nur die Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems, sondern auch alle physikalischen Limitierungen des Prozesses. Auf diese Art lassen sich der begrenzte Flankenwinkel bedingt durch die Übertragungsfunktion des Systems nicht von dem

Einfluss des maximalen Flankenwinkels - beschrieben durch das Fresnell-sche Reflexionsgesetz - trennen. Hinzu kommt, dass sich an den Flanken teilweise abgetragenes Material wieder anhaftet (siehe Kapitel 5.3.2), was eine belastbare Messung der Sprungantwort des Systems verhindert.

Abbildung 47:
Einfluss der PSF
auf eine
100 x 100 μm
Rechteckvertiefung

Links: Simulation der Abtrags-geometrie einer Rechteckvertiefung

Rechts: Überlagerung von Simulation und Abtragsergebnis

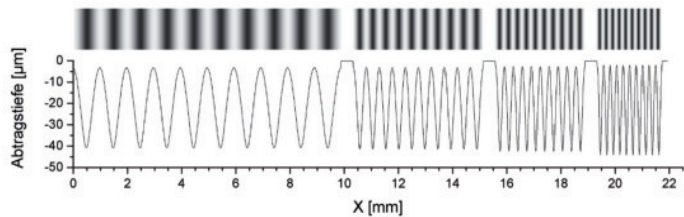


Eine alternative Methode zur Validierung der Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems stellt die Messung des Amplitudengangs dar. Der Amplitudengang stellt das Verhältnis der Amplituden sinusförmiger Signale von Eingangs- und Ausgangssignal in Abhängigkeit der Frequenz dar [50]. Das Ergebnis entspricht dem Realteil der Fourier-Transformierten der Impulsantwort des Systems [50]. Dies ist im Bereich der Systemidentifikation eine übliche empirische Vorgehensweise zur Identifikation linearer, unbekannter Systeme [51]. Im Bereich optischer Systeme wird häufig die Modulationsübertragungsfunktion verwendet, welche den Bildkontrast sinus- oder streifenförmiger Intensitätsverteilungen beurteilt [52]. Es handelt sich hier um die gleiche Vorgehensweise aus unterschiedlichen Fachbereichen.

Für die Messung des Amplitudengangs werden sinusförmige Geometrien als Prozessgeometrie gewählt. Abbildung 48 oben zeigt einen Ausschnitt der erstellten Prozessdaten zur Messung des Amplitudengangs. Gezeigt sind Felder mit eindimensionalen und sinusförmigen Teststrukturen mit Pe-

riodenlängen von 990 μm bis 120 μm . Abbildung 48 unten zeigt das zugehörige Profil der Sollkontur. Insgesamt wird der Bereich von 990 μm bis 30 μm untersucht. Kleinere Periodenlängen sind auf Grund der gewählten und typischen Pixelgröße von 15 μm nicht möglich.

Abbildung 48:
Prozessdaten zur
Messung des
Amplitudengangs

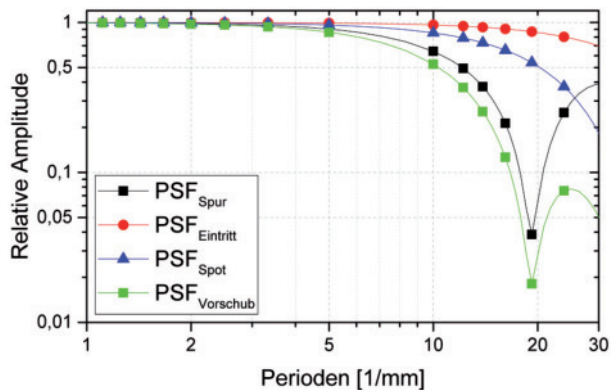


Der Vorteil der Messung des Amplitudengangs im Vergleich zur Sprungantwort ist, dass nur die Amplitude bzw. der Kontrast relevant ist. Es handelt sich um eine Vereinfachung der Analyse der Systemantwort, da die Systemantworten der einzelnen Frequenzen getrennt gemessen werden. Zusätzlich werden die Systemantworten für beide Richtungen getrennt erfasst. Eine mögliche Verfremdung der Form auf Grund von Flankenwinkeln oder Ablagerungen wie in Kapitel 5.3 erläutert wird bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

Das Übertragen der Sinusstrukturen in Scanrichtung erfordert eine hohe Modulationsrate der Laserintensität. Die maximale Modulationsfrequenz des vorhandenen Lasermodulators beträgt 200 kHz. Die gewählte Pulsfrequenz für diese Versuche beträgt 6,3 MHz, weshalb bei einer Pixelgröße von 15 μm die kleinste, übertragbare Sinusperiode 472 μm bzw. 2,1 Perioden/mm beträgt. Die Streuung der Laserpulse durch das Bearbeitungssystem ist auf Grund des Taumelns des Polygons in Vorschubrichtung deutlich größer als in Scanrichtung. Aus diesem Grund und der begrenzten Modulationsfrequenz wird der Amplitudengang exemplarisch in Vorschubrichtung quer zur Scanrichtung untersucht.

Analog zur Betrachtung der Fehlerkette zum Berechnen der Punktspreizfunktion, wird analysiert, welche Abweichungsursachen den größten Einfluss auf den Amplitudengang haben. Abbildung 49 zeigt den simulierten Amplitudengang in Vorschubrichtung mit einem Spurb Abstand von $15\text{ }\mu\text{m}$, einer Brennweite von 163 mm und einem Laserfokusbereich von $44\text{ }\mu\text{m}$. Bei einer Pixelgröße von $15\text{ }\mu\text{m}$ können keine Signalperioden kleiner $30\text{ }\mu\text{m}$ bzw. 33 Perioden/mm artefaktfrei dargestellt werden, da mindestens zwei Pixel pro Periode vorhanden sein müssen. Aus diesem Grund beträgt die maximale untersuchte Frequenz 33 Perioden/mm .

Abbildung 49:
Simulierter
Amplitudengang
in Vorschubrichtung



Der Amplitudengang in Abbildung 49 zeigt, welche Abweichungsursachen den größten Einfluss auf das Abtragsergebnis in Vorschubrichtung haben. Je früher der Amplitudengang abfällt, umso größer sind die Abweichungen an Übergängen. Kleinere Strukturen können ab einer gewissen Größe nicht mehr oder nur mit verringerter Strukturtiefe übertragen werden. Aus dem gezeigten Verlauf des Amplitudengangs in Vorschubrichtung ($\text{PSF}_{\text{Vorschub}}$) in Abbildung 49 wird ersichtlich, dass die größte Fehlerquelle der dynamische Spurf Fehler (PSF_{Spur}) bzw. das Taumeln des Polygons darstellt, gefolgt von dem Durchmesser des Laserfokus (PSF_{Spot}). Der Spurb Abstand ($\text{PSF}_{\text{Eintritt}}$) und

analog der Pulsabstand und Synchronisierungsfehler in Scanrichtung nehmen eine untergeordnete Rolle ein. Lediglich für Applikationen bei denen der Spur- bzw. Pulsabstand größer ist als der Fokusbereich (wie zum Beispiel das Hochratebohren) ist eine aktive Kompensation dieser beiden Fehler lohnenswert.

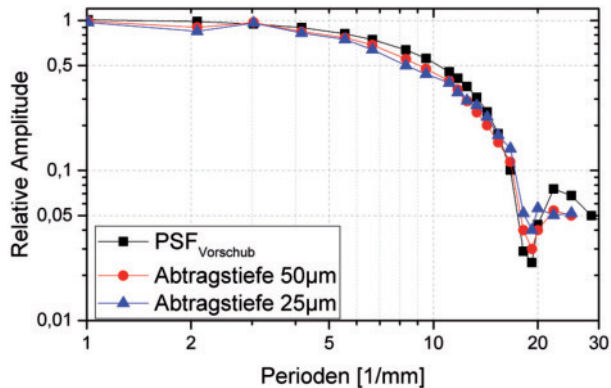
Für die Messung des Amplitudengangs wurde ein Testbild entsprechend Abbildung 48 erstellt. Untersucht wurden Sinusperioden im Bereich von 1 bis 33 Perioden/mm mit den Abtragstiefen 50 μm und 25 μm . Die verwendeten Prozessparameter zur Texturierung der polierten Stahlprobe sind:

- Wellenlänge: 1030 nm
- Mittlere Laserleistung: 120 W
- Pulsfrequenz: 6,3 MHz
- Pulsenergie: 19 μJ
- Spitzenfluenz: 2,4 J/cm²
- Pulslänge: 2 ps
- Brennweite: 163 mm
- Fokusbereich: 44 μm
- Pixelgröße / Pulsabstand: 15 μm
- Scangeschwindigkeit: 94 m/s
- Anzahl Schichten: 500
- Abtrag / Schicht: 120 nm

In Abbildung 50 sind der simulierte und die beiden gemessenen Amplitudengänge des Abtragsergebnisses logarithmisch dargestellt. Die beiden gemessenen Verläufe sind auf 50 μm bzw. 25 μm Abtragstiefe normiert. Die gemessenen Amplitudengänge in Vorschubrichtung – dargestellt in Abbildung 50 – stimmen sehr gut mit dem simulierten Verlauf überein. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Berechnung der systembedingten Geometrieabweichung anhand der statistischen Punktspreizfunktion angewendet werden kann. Der Amplitudengang verdeutlicht auch, dass bei der verwendeten Systemkonfiguration auf Grund der statistischen Laserenergieverteilung über alle Prozessschichten Strukturen mit einer Größe von

10 Perioden/mm nur mit halber Amplitude übertragen werden. Strukturen mit noch kleineren Perioden bzw. Abständen sind teilweise nicht mehr erkennbar.

Abbildung 50:
Amplitudengänge
für die gemessenen
Abtragstiefen
50 μm und 25 μm
im Vergleich zur
Simulation in Vor-
schubrichtung



7.3 Prinzip der Entfaltung

Da für die beiden Abweichungsursachen maximaler Flankenwinkel und Grabenbildung keine lineare Übertragungsfunktion existiert, werden sie bei dem faltungsbasierten Ansatz zur Berechnung der Geometrieabweichungen, der Umkehrfunktion der Punktspreizfunktion und deren Anwendung auf die Prozessdaten nicht berücksichtigt.

Das Scanergebnis durch das kontrollierte Bewegen eines Laserstrahls kann durch die Faltung einer bekannten Bewegungsfunktion mit der Laserintensitätsverteilung beschrieben werden [29]. Analog erfolgt die Übertragung der Prozessdaten D in Form eines Höhenbildes in das Werkstück durch Faltung mit der Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems PSF_{System} . Das Prozessergebnis PE wird von weiteren nicht vorhersehbaren Störungen beeinflusst, welche als zeitlich veränderliches Rauschen $n(t)$ zusammengefasst sind. Formel (24) beschreibt diesen mathematischen Zusammenhang.

$$D * \text{PSF}_{\text{System}} + n(t) = \text{PE} \quad (24)$$

In der Bildverarbeitung ist es üblich unscharfe Fotos nachträglich scharf zu zeichnen. Eine Methode stellt hierfür das Entfalten mit der geschätzten oder bekannten linearen Fehlerfunktion dar. Bei dieser Methode wird das inverse Faltungsproblem gelöst um die Unschärfe des Bildes nachträglich heraus zu rechnen. Problematisch ist in diesem Fall allerdings das Bildrauschen, da dieses störend verstärkt wird [53]. Entsprechend der Assoziativ- und Kommutativgesetze der Faltung ist die Reihenfolge der Operationen vertauschbar [49]. Dies bedeutet, dass das inverse Faltungsproblem in dem Fall des Bearbeitungssystems unter Vernachlässigung des Rauschanteils auch vor dem Prozess auf die Prozessdaten angewendet werden kann, um theoretisch nach der Bearbeitung ein fehlerfreies Abtragsergebnis zu erhalten.

Die vorkompensierten Prozessdaten erhält man entsprechend Formel (25) durch die inverse Fouriertransformation der fouriertransformierten Prozessdaten $\widehat{D}$ geteilt durch die Fouriertransformierte der Punktspreizfunktion $\widehat{\text{PSF}}_{\text{System}}$.

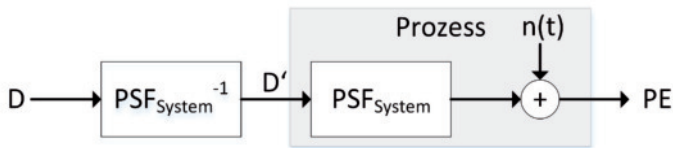
$$D' = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\widehat{D}}{\widehat{\text{PSF}}_{\text{System}}} \right) \quad (25)$$

Neben der direkten Berechnung der vorkompensierten Prozessdaten über die Fouriertransformierten können verschiedene Algorithmen wie z.B. Wiener- oder Richardson-Lucy-Dekonvolution verwendet werden. Bei der direkten Berechnung über die Fouriertransformierten tritt das Problem auf, dass die Fouriertransformierte der Punktspreizfunktion $\widehat{\text{PSF}}_{\text{System}}$ gegen 0 abfällt und die Gleichung somit nicht lösbar wird. Die genannten Dekonvolutionsalgorithmen sind in den meisten Mathematikprogrammen wie z.B. Mathematica oder Matlab implementiert und können direkt auf die Prozessdaten bzw. Höhenbilder angewendet werden. Der Wiener-Dekonvolutions Rechenansatz verwendet das Signal-Rausch-Verhältnis als Regularisierungsparameter und entspricht für den Fall des unendlichen Signal-

Rausch-Verhältnisses, wie in diesem Anwendungsfall der Datenvorverarbeitung, Formel (25) [54]. Der Richardson-Lucy-Dekonvolution Algorithmus berechnet iterativ die wahrscheinlichste Lösung. In Mathematica sind noch weitere Algorithmen zur Entfaltung von Bildern implementiert, welche alle das Ziel verfolgen die Unschärfe in Bilder mit Hilfe der Punktspreizfunktion, welche die Entstehung der Unschärfe beschreibt, wieder herauszurechnen. Falls die angegebene Punktspreizfunktion nicht korrekt ist, ist das Bild nicht vollständig rekonstruierbar und es können unerwünschte Artefakte bei der Rekonstruktion entstehen.

Abbildung 51 zeigt den Signalfluss von den originalen Prozessdaten, über die Vorverarbeitung den Prozess inklusive Rauschen auf dem Weg zum Prozessergebnis dar. Da das Rauschen $n(t)$ erst während des Prozesses zu Abweichungen führt, stellt es für die Entfaltung bei der Datenvorverarbeitung kein Problem dar. Allerdings kann es bei der Vorverarbeitung auch nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 51:
Signalfluss des
Prozesses und Pro-
zesssystems mit
Vorverarbeitung
der Prozessdaten



Verwendet man im Prozess anstelle der originalen Prozessdaten D die vorverarbeiteten Prozessdaten D' , so entspricht das Prozessergebnis PE im Idealfall den originalen Prozessdaten. In der Realität lassen sich Abweichungen von der statistischen Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems PSF_{System} nicht vermeiden. Diese Abweichungen sind in Formel (26) als Störungen und Rauschen $n(t)$ zusammengefasst.

$$PE = D' * PSF_{System} + n(t) = D + n(t) \quad (26)$$

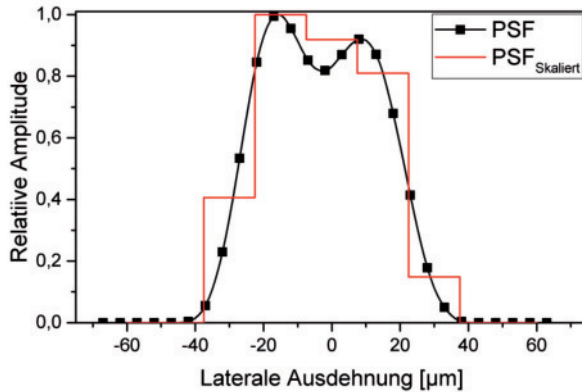
7.4 Berechnung des vorkompensierten Bearbeitungsbildes

Die systembedingten Abweichungsursachen, welche in der Punktspreizfunktion des Bearbeitungssystems PSF_{system} zusammengefasst sind, werden bei der Vorverarbeitung der Prozessdaten berücksichtigt. Die PSF_{system} wird für das ganze Bearbeitungsfeld als konstant angenommen. Die optische Verzeichnung ist in Vorschubrichtung konstant, da die Bearbeitung immer nur auf einer Scanlinie erfolgt. In Scanrichtung ist der Fehler durch die optische Verzeichnung ortsabhängig und kann nach der Vorverarbeitung der Prozessdaten z.B. mit einem Bildverarbeitungsprogramm ausgeglichen werden.

Um das Problem etwas zu vereinfachen und Verfälschungen durch das Modulatorverhalten auszuschließen wurde die Vorkompensation der Prozessdaten nur in Vorschubrichtung angewandt und analysiert. In dieser Richtung sind durch das Bearbeitungssystem keine Einschränkungen gegeben und das simulierte Übertragungsverhalten des Bearbeitungssystems konnte mit Hilfe von Abtragsversuchen in Kapitel 7.2 validiert werden.

Die in Kapitel 7.1 berechnete Punktspreizfunktion besitzt eine laterale Auflösung von $1\text{ }\mu\text{m}$. Da die Pixelgröße der Prozessdaten im Rahmen dieser Arbeit $15\text{ }\mu\text{m}$ beträgt, muss die Punktspreizfunktion in ihrer lateralen Auflösung zuerst an die Pixelgröße des Bildes angepasst werden. Hierbei handelt es sich um eine Quantisierung der Fehlerfunktion, wie sie in Kapitel 5.1 bereits für die Prozessdaten beschrieben wurde. Feinheiten des Verlaufs der Punktspreizfunktion gehen auf diese Art verloren und es kann zu einer Verfälschung der Form oder des Schwerpunktes der Verteilung kommen. Dies ist in Abbildung 52 dargestellt. Je nach Fokusbereich dominiert der Taumelfehler oder die Spotgeometrie die Form des Gesamtfehlers.

Abbildung 52:
Quantisierung der
Punktspreizfunk-
tion mit der Pixel-
größe als
Abtastabstand



Da die Prozessdaten für diesen Versuch auf die Vorschubrichtung beschränkt wurden, lässt sich der Effekt der Vorkompensation auf die Abtragsgeometrie gut im Profil darstellen. Die Vorverarbeitung der Prozessdaten zur Reduktion von der Geometrieabweichung erfolgt durch die Entfaltung der Prozessdaten mit der statistischen Gesamtfehlerverteilung – der PSF – wie in Kapitel 7.3 erläutert. Für den 1-dimensionalen Fall des Profils des Geometrieverlaufs wurde der Befehl `ListDeconvolve` in Mathematica verwendet. Für eine Vorkompensation in beide Richtungen des 2-dimensionalen Falls kann der Befehl `ImageDeconvolve` verwendet werden. Formel (27) zeigt die Syntax des verwendeten Befehls. PSF_{Vorschub} muss für die Berechnung bereits entsprechend der Pixelgröße des Konturverlaufs angepasst sein.

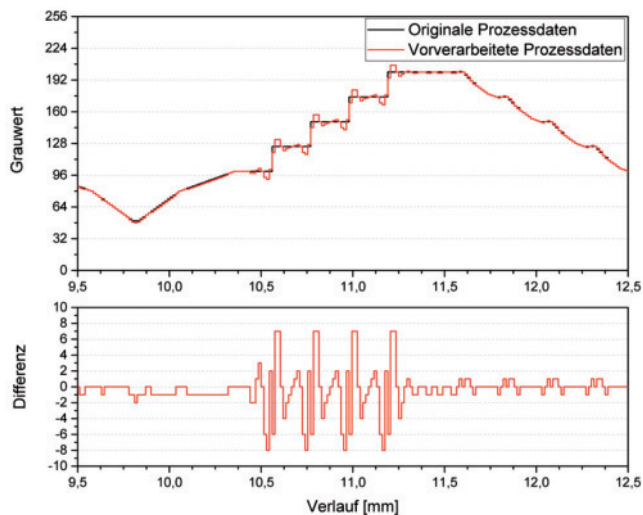
$$\text{Kontur}_{\text{Kompensiert}} = \text{ListDeconvolve}[PSF_{\text{Vorschub}}, \text{Kontur}]; \quad (27)$$

Prinzipiell kann auch der Ansatz über die Fouriertransformation verwendet werden. Hierbei muss die Fouriertransformierte der Prozessdaten durch die der Punktspreizfunktion geteilt werden. Da letztere zu den Rändern hin gegen 0 abfällt, ist dieser Rechenweg nicht lösbar. Außerdem muss die

Lösung nicht eindeutig sein. Die vorhandenen Dekonvolutions-Algorithmen in Mathematica basieren auf der Lösung des inversen Faltungsproblems, sind allerdings unempfindlicher gegen Rauschen und eine endliche Fehlerfunktion.

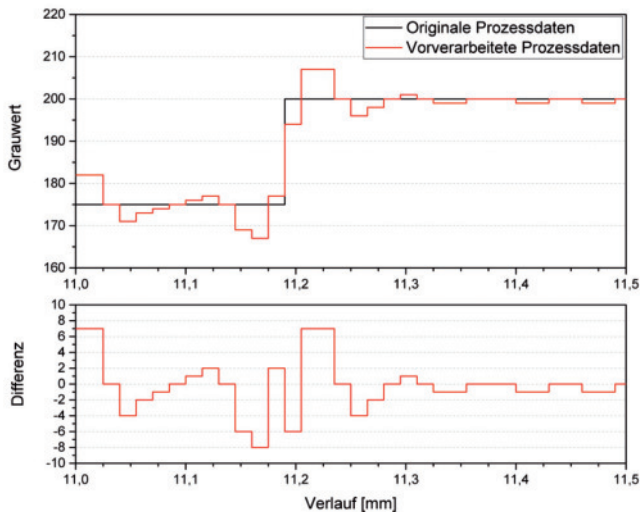
In Abbildung 53 ist der Konturverlauf von Testprozessdaten im Vergleich zu den zugehörigen vorkompensierten Prozessdaten gezeigt. In x-Richtung ist der Konturverlauf in mm und in y-Richtung die relative Abtragstiefe als Grauwert eines 8-bit Höhenbildes dargestellt. Die reale Abtragstiefe wird erst beim Laden und skalieren der Prozessdaten am Bearbeitungssystem eingestellt. Die Vorkompensation führt zu Über- und Unterschwingen an Stufen und Knicken im Verlauf. Bereiche mit langsamen Änderungen werden nicht verändert, da das Bearbeitungssystem diese unverfälscht übertragen kann. In dem dargestellten Ausschnitt ist allerdings eine gewisse Welligkeit von ± 1 Grauwerten in flachen Bereichen feststellbar, welche auf Rundungsfehler zurückzuführen ist.

Abbildung 53:
Profilverlauf der
vorverarbeiteten
Prozessdaten im
Vergleich zu den
Originaldaten



Die Welligkeit, reduzierte Flankensteilheit und die Überschwinger zur Kompensation der systembedingten Geometrieabweichungen sind in der vergrößerten Ansicht des Profilausschnitts einer Stufe in Abbildung 54 gut zu erkennen. Der untere Graph der Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen jeweils den Unterschied zwischen den Originalprozessdaten und den vor-kompensierten Daten.

Abbildung 54:
Ausschnitt des
Profilverlaufs der
vorverarbeiteten
Prozessdaten im
Vergleich zu den
Originaldaten



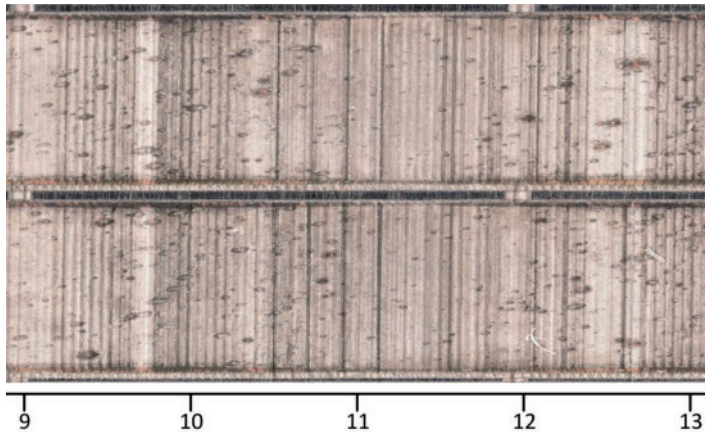
Durch die Überhöhung der Stufen sollten beim Prozess auftretende systembedingte Geometrieabweichungen reduziert werden. Der verwendete Algorithmus zur Lösung des inversen Faltungsproblems bei der Prozessdatenvorverarbeitung muss so ausgewählt oder angepasst werden, dass die Welligkeit und die Reduzierung der Flankensteilheit nicht auftreten.

8 Vergleich der Prozessergebnisse mit und ohne Abweichungsvorkompensation

In dem vorangegangenen Kapitel 7.4 wurde die Berechnung der vorkompensierten Prozessdaten gezeigt. Es wurden die gleichen Parameter wie bei der Validierung der Punktspreizfunktion in Kapitel 7.2 verwendet. Abbildung 55 zeigt einen Ausschnitt einer strukturierten Stahlprobe. Im oberen Streifen wurden die originalen Prozessdaten in das Werkstück übertragen. Im unteren Streifen ist das Prozessergebnis zu sehen dessen Prozessdaten entsprechend der Punktspreizfunktion PSF_{Vorschub} für einen Fokusbereich von $44\text{ }\mu\text{m}$ vorverarbeitet wurden.

Neben der Welligkeit der Strukturierung, sind für die Auswertung vor allem die in Abbildung 55 zu sehenden kegelförmigen Artefakte störend. Diese Artefakte können bei bestimmten Legierungen beim Abtrag mit ultrakurzen Pulsen entstehen. Meist ist ein sehr schmales Prozessfenster bezüglich der Fluenz und Pulsfrequenz vorhanden, in dem sie nicht auftreten. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den Konturveränderungen durch Toleranzen des Bearbeitungssystems liegt, wurde dieser prozess- und materialspezifische Umstand dieser Probe ignoriert. Die Tiefenauflösung der Prozessdaten beträgt ca. $1\text{ }\mu\text{m}$ für eine Abtragstiefe von $250\text{ }\mu\text{m}$. Dies führt bei flachen Übergängen zu feinen Stufen im Profil. Um diese feinen Stufen zu vermeiden müssen die Ausgangsdaten eine höhere Tiefenauflösung besitzen.

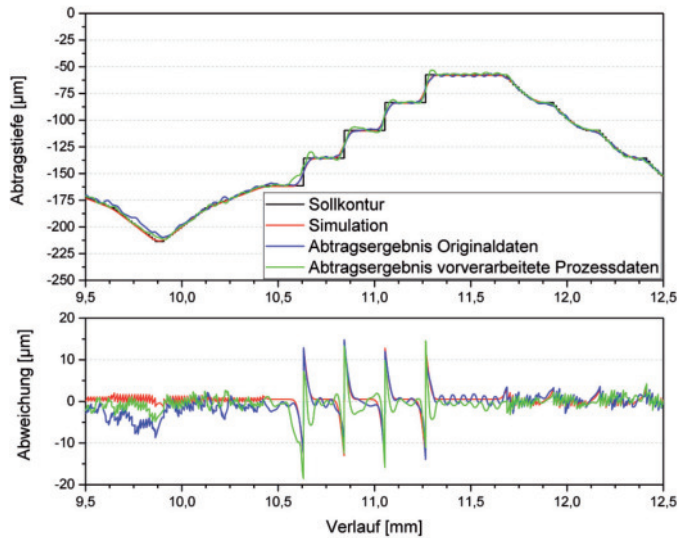
Abbildung 55:
Aufnahme der
Probe zum Geo-
metrievergleich
(oben originale,
unten vorverarbei-
tete Prozessdaten,
Skala in mm)



Bei der Bewertung des Strukturprofils sind im Rahmen dieser Arbeit vor allem zwei Kriterien interessant. Zum einen gilt es zu prüfen, ob die bereits in Kapitel 7.2 validierte Übertragungsfunktion auch geeignet ist, die bei der Übertragung der Prozessdaten in das Werkstück entstehenden Geometrieabweichungen zu simulieren. Die Abweichungen zwischen Prozesssimulation und Abtragsergebnis sind zu vergleichen. Des Weiteren muss geprüft werden, ob die Vorverarbeitung der Prozessdaten zu einer geringeren Geometrieabweichung führt.

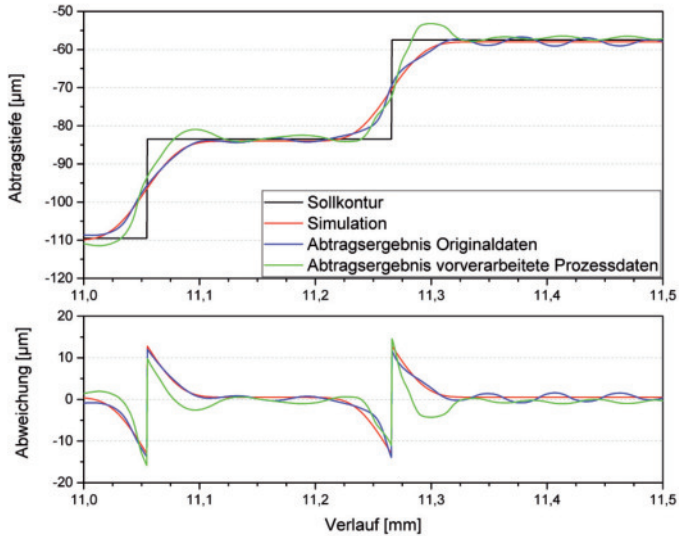
In Abbildung 56 ist oben ein Ausschnitt des strukturierten Profils der vorverarbeiteten und der originalen Prozessdaten im Vergleich zu dem Sollverlauf und dem simulierten Verlauf dargestellt. Im unteren Graph sind die Abweichungen der gemessenen und des simulierten Verlaufes von der Sollgeometrie abgebildet.

Abbildung 56:
Profilvergleich von
Sollkontur, Simula-
tion und den Pro-
zessergebnissen
der originalen und
vorverarbeiteten
Prozessdaten



Der Vergleich der Simulation mit dem gemessenen Strukturprofil des Abtrags der unvorverarbeiteten Prozessdaten zeigt eine gute Übereinstimmung bezüglich des relativen Verlaufs an den markanten Punkten des Geometrieverlaufs. Das Verrunden von Stufen und Knickpunkten des Verlaufs kann somit sehr gut simuliert werden. Allerdings sind Abweichungen der absoluten Abtragstiefe in Bereichen ohne starke Verlaufsänderung auffällig. Diese Abweichungen fallen teilweise größer aus, als die Abweichungen bedingt durch die Streuung der eingebrachten Laserenergie.

Abbildung 57:
Ausschnitt des
Profilvergleichs
von Sollkontur,
Simulation und den
Prozessergebnissen
der originalen
und vorverarbeiteten
Prozessdaten



Aus dem Verlauf des Strukturprofils der vorverarbeiteten Prozessdaten in Abbildung 56 und Abbildung 57 ist erkennbar, dass die Flankensteilheit durch die Vorverarbeitung leicht erhöht werden konnte. Auch die Vorsprünge auf der rechten Seite des Verlaufs in Abbildung 56 sind durch die Datenvorverarbeitung etwas markanter übertragen worden. Der gesamte Profilvergleich von Sollkontur, Simulation und den Prozessergebnissen der originalen und vorverarbeiteten Prozessdaten und weitere Ausschnitte sind in Anhang A.5 zu finden.

Bei höheren Stufen ist allerdings eine leichte Überhöhung der abgetragenen Stufe erkennbar. Dies lässt darauf schließen, dass die Abweichungen zur Berechnung der vorkompensierten Prozessdaten in der Realität etwas kleiner ausfallen. Dies könnte unter anderem auf die reduzierte Genauigkeit der Übertragungsfunktion nach der Anpassung an die Pixelgröße zurückzuführen sein. In der Bildbearbeitung ist es üblich eine leichte

Kantenüberhöhung bei Fotos hinzuzufügen, damit diese schärfer aussehen. Der Umstand, dass hohe Stufen mit einer kleinen Überhöhung nach der Datenvorverarbeitung übertragen werden, könnte sich daher auch positiv auf das Erscheinungsbild des Prozessergebnisses für das menschliche Auge herausstellen.

Des Weiteren wird die Flankensteilheit nur bedingt gesteigert. Aus dem Verlauf der vorkompensierten Prozessdaten in Abbildung 53 ist erkennbar, dass die Flankensteilheit bereits in den berechneten Daten im Vergleich zum Ausgangsverlauf verringert ist. Hier gibt es sicherlich noch Potenzial die Vorverarbeitung so zu optimieren, dass die Flankensteilheit weiter gesteigert wird, während die Überhöhungen vermieden werden. Zusätzlich ist der gewählte Berechnungsansatz nicht kompatibel zu den nichtlinearen Geometrieabweichungen durch reflexionsbedingte Flankensteilheit und Grabenbildung.

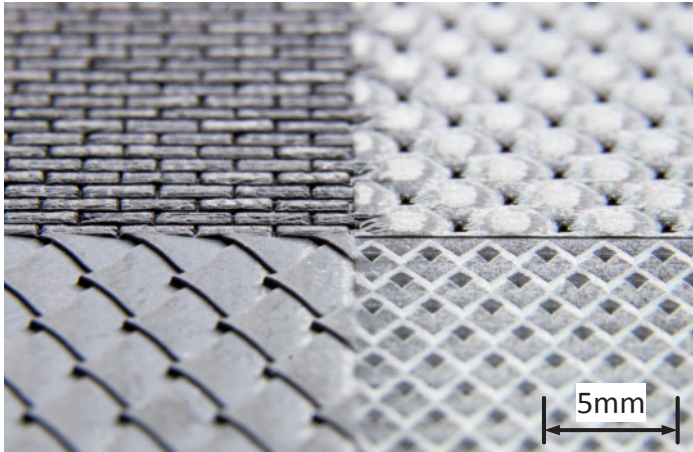
9 Zusammenfassung und Ausblick

Einleitend in Kapitel 1 wurde dargestellt, weshalb es notwendig ist die aktuell verfügbare Bearbeitungsgeschwindigkeit für eine sinnvolle Nutzung der UKP-Strukturierung deutlich zu erhöhen. Durch den Abtrag mit ultrakurzen Pulsen können sehr gute Oberflächenqualitäten erreicht werden. Allerdings ist die erreichbare Abtragsrate für viele Anwendungsgebiete nicht ausreichend um eine wettbewerbsfähige Produktivität zu erreichen. Es sind inzwischen Ultrakurzpulslaser mit mittleren Laserleistungen von bis zu 1,5 kW realisierbar [55]. Bei der Bearbeitung muss die verfügbare Laserenergie auf dem Werkstück verteilt werden, damit das Material nicht überhitzt und die Oberflächenqualität erhalten bleibt. Hierfür werden Laserstrahlablenkensysteme für Bearbeitungsgeschwindigkeiten von über 1 km/s notwendig sein [25].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Laserstrukturierungssystem aufgebaut, das einen Polygonscanner zur Laserstrahlablenkung verwendet. Bei der Brennweite von 163 mm werden Bearbeitungsgeschwindigkeiten von bis zu 360 m/s erreicht. Der verwendete Ultrakurzpulslaser ist von der Firma Amphos und ermöglicht die Bearbeitung mit bis zu 400 W mittlerer Leistung, 40 MHz Pulsfrequenz und Pulslängen im Bereich von 1 - 10 ps [57]. In Abbildung 58 ist beispielhaft ein Prozessergebnis der Strukturierung einer Stahlplatte mit diesem System gezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass die Abtragsrate bei gleich bleibender Oberflächenqualität deutlich gesteigert werden kann, wenn bei konstanter Fluenz oder Pulsenergie die Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Pulsfrequenz und mittlere Laserleistung erhöht werden. Bei diesem Versuch wurde auf Grund der begrenzten Modulationsfrequenz eine Bearbeitungsgeschwindigkeit von nur 95 m/s, bei 110 W mittlerer Laserleistung und 6,3 MHz Pulsfrequenz gewählt. Die the-

oretische Abtragsrate unter Vernachlässigung der Totzeiten betrug bei diesen Parametern $17,5 \text{ mm}^3/\text{min}$, was fast der theoretischen maximalen Abtragsrate dieses Arbeitspunktes entspricht.

Abbildung 58:
Nahaufnahme von
mit dem Polygo-
nscannersystem
abgetragenen Bei-
spielstrukturen



Da nur etwa ein Drittel der verfügbaren Leistung und Geschwindigkeit des Bearbeitungssystems genutzt wurde, können in Zukunft noch höhere Abtragsraten erwartet werden. Bei Pulsfrequenzen jenseits des gezeigten Bereichs tritt die Wechselwirkung des Plasmas mit dem nächsten Laserpuls zunehmend in den Vordergrund. In wie weit die Prozessgeschwindigkeit durch höhere Pulsfrequenzen mit entsprechend höherer Scangeschwindigkeit gesteigert werden kann, muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

Eine Alternative zu höheren Scangeschwindigkeiten stellt die Parallelisierung dar. Auf Grund der bildbasierten Prozessdaten und der fixen Bewegungsrichtung eignet sich das Polygonscannersystem hervorragend für die Strukturierung mit mehreren Teilstrahlen, die in einer Linie quer zur Scanrichtung angeordnet sind. Voraussetzung ist, dass jeder Teilstrahl über einen eigenen Modulator geschaltet werden kann. Werden 8 Teilstrahlen mit einer Gesamtleistung von 1 kW bei den ansonsten gleichen Parametern wie

der Probe von Abbildung 58 verwendet, so erhöht sich die zu erwartende, theoretische Abtragsrate auf $140 \text{ mm}^3/\text{min}$. Die zu erwartende mittlere Abtragsrate unter Berücksichtigung typischer Prozessdaten und Totzeiten läge bei ca. $35 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Die Scanlinien der äußeren Teilstrahlen werden einen kleinen, aber merklichen Bogenfehler besitzen, welcher konstant und messbar ist. Daher könnte dieser Fehler gut in die Punktspreizfunktion als weitere Fehlerquelle integriert werden.

Bei der Laserstrukturierung im MHz-Bereich werden die Toleranzen der Synchronisation aller Teilsysteme als Positionsabweichungen sichtbar. Zusätzlich ist der Polygonscanner ein starres System, weshalb der Einfluss von Fertigungstoleranzen nur durch komplizierte konstruktive Maßnahmen oder zusätzliche vorgeschaltete Scanner reduziert werden kann. Die Scanbewegung des Polygonscanners selbst kann auf Grund dessen Massenträgheit nicht beeinflusst werden. Bei der Auslegung des Bearbeitungssystems wurde auf konstruktive und aktive Kompensationsmaßnahmen, welche in Kapitel 6 beschrieben wurden, verzichtet. Alle relevanten Abweichungsursachen, welche zu einer Abweichung der Strukturierung von der Sollgeometrie beitragen, wurden analysiert und in die drei Kategorien Prozessdatenkonvertierung, systembedingte und prozessbedingte Abweichungsursachen gruppiert. Den Hauptteil der systembedingten Ursachen für Geometrieabweichungen bei der Strukturierung stellen Abweichungsursachen mit statistischer Verteilung dar. Diese Abweichungsursachen treten während des Prozesses auf und lassen sich statistisch erfassen.

Das Polygonscannersystem verarbeitet Höhenkarten, also Bilder, deren Grauwerte der gewünschten Abtragstiefe entsprechen. Der Abtrag erfolgt schichtweise mit einer typischen Schichthöhe im Bereich von $50 - 200 \text{ nm}$. Die gewünschte, maximale Abtragstiefe wird normalerweise erst nach $200 - 5.000$ Schichten erreicht. Dieser Umstand erlaubt den Ansatz die sta-

tistische Verteilung der systembedingten Abweichungsursachen als Grundlage zur Simulation der hierdurch bedingten Geometrieabweichungen zu verwenden.

Auf Basis der statistischen Einzelverteilungen der systembedingten Abweichungsursachen wurde die Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems berechnet. Der Amplitudengang dieser Übertragungsfunktion und der Anteil jeder Fehlerquelle wurde analysiert und an Hand von Strukturierungsergebnissen validiert. Den größten Anteil an der zu erwartenden Geometrieabweichung verursachen das Taumeln des Polygons auf der Motorwelle und die Ausdehnung des Laserspots. Abweichungen bedingt durch eine nicht vollständige Synchronisation der Teilsysteme spielen im Vergleich zu den beiden genannten Abweichungsursachen bei dem aktuellen Bearbeitungssystem eine untergeordnete Rolle. Die Analyse des Amplitudengangs der Übertragungsfunktion des Bearbeitungssystems zeigt weiterhin, dass Strukturen mit einer Periode von unter $100\text{ }\mu\text{m}$ in Vorschubrichtung nur mit der halben Amplitude in das Werkstück übertragen werden können. In Scanrichtung liegt diese Grenze bei ca. $70\text{ }\mu\text{m}$. Diese Werte gelten speziell für das in dieser Arbeit entwickelte System mit den Spezifikationen aus Tabelle 1.

Der Vergleich des Abtragsprofils und der Simulation zeigt eine hohe Übereinstimmung der Geometrieabweichungen an den relevanten Verlaufsstellen. Fehler, welche durch Positionierabweichungen, Synchronisierungsfehler und Fokusgeometrie hervorgerufen werden, können zielsicher simuliert werden. Allerdings sind generelle Abweichungen bezüglich der Abtragstiefe teilweise größer, weshalb es wichtiger ist diese Abweichungen zu verstehen und das zugehörige Prozessverständnis zu entwickeln. Des Weiteren stellen bei der Laserstrukturierung mit Ultrakurzpulslasern mit Pulsfrequenzen im MHz-Bereich Ablagerungen ein Problem dar, weshalb effiziente Abblas- und Absaugstrategien verwendet werden müssen.

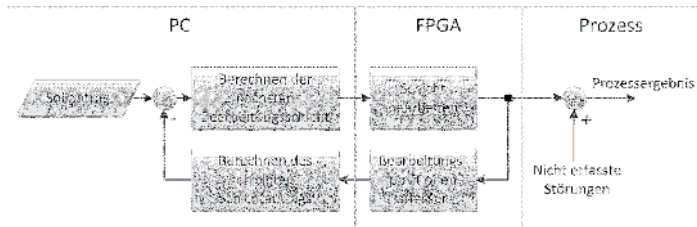
Mit Hilfe der Punktspreizfunktion können die systembedingten Geometrieabweichungen des Prozessergebnisses gut simuliert werden. Die Höhenkarte wird auf Grund der gestreuten Energieverteilung bei der Übertragung bzw. Strukturierung weichgezeichnet. Die Punktspreizfunktion kann zusätzlich verwendet werden, die statistisch zu erwartenden Abweichungen durch Lösen des inversen Faltungsproblems vor dem Prozess aus den Prozessdaten herauszurechnen. Hierdurch wird die Höhenkarte bildlich scharfgezeichnet und die geometrischen Abweichungen des Prozessergebnisses fallen geringer aus als bei Prozessdaten ohne Vorverarbeitung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur die systembedingten Abweichungsursachen simuliert und bei der Prozessdatenvorkompensation berücksichtigt. Die reflexionsbedingten Abweichungsursachen maximaler Flankenwinkel und Grabenbildung wurden nur beschrieben. Bei der Modellbildung wurden diese Abweichungsursachen auf Grund ihrer nichtlinearen Natur nicht berücksichtigt. Anstatt das inverse Faltungsproblem im Rahmen der Datenvorverarbeitung zu lösen, könnte zukünftig ein iterativer Ansatz verfolgt werden. Bei diesem Ansatz würden auf Basis der simulierten Abweichungen (inklusive der reflexionsbedingten) überarbeitete Prozessdaten berechnet werden. Durch mehrfaches Wiederholen dieser Berechnung mit z.B. dem Optimierungskriterium der kleinsten Fehlerquadrate könnte eine vollständigere Prozessdatenvorkompensation realisiert werden.

Alle bisherigen Ansätze zielen entweder auf eine Erhöhung der Abtragsgenauigkeit durch eine genauere Platzierung der gepulsten Laserenergie oder wie im Rahmen dieser Arbeit der Simulation und Datenvorverarbeitung zum verbesserten Geometrieerhalt. Durch die Programmiermöglichkeiten der FPGA-basierten Steuerung kann die absolute Lage der Laserpulse auf den Scanlinien in Scan- und die Lage der Linie in Vorschubrichtung während der Bearbeitung erfasst werden. Auf Basis der Erfahrungen der Simulation des Abtragsergebnisses ergibt sich hieraus die Möglichkeit der fehlertoleranten Prozessführung, um den Geometrieerhalt des Abtragsergebnisses zu verbessern.

Mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Simulationsansatzes kann dann der erfolgte Abtrag der letzten Bearbeitungsschicht berechnet werden. Der erfolgte Schichtabtrag wird in der Software der Prozessführung von dem Sollabtrag abgezogen und die nächste Bearbeitungsschicht berechnet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis das Sollabtragsergebnis entsprechend der Systemrückmeldung erreicht ist. Dieser Regelkreis ist in Abbildung 59 dargestellt. Störungen und Abweichungsursachen, die nicht erfasst werden und Abweichungen der letzten Bearbeitungsschicht können nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 59:
Ablauf der fehler-
toleranten Prozess-
führung



Folgenden Abweichungsursachen könnten berücksichtigt werden:

- Eintritt in das Bearbeitungsfeld
- Taumeln des Polygons
- Abweichungen der Achsvorschubgeschwindigkeit
- Start der Scanlinie
- Abweichungen von Pixel- / Pulsfrequenz
- Abweichungen der Scangeschwindigkeit
- Geometrie des Laserfokus
- Begrenzung der Modulationsfrequenz
- Geometrische Verzeichnungen des Objektivs (auch bei einer Mehrstrahlbearbeitung)

Bei Scansystemen mit Galvanometern fallen die Positionierfehler deutlich kleiner aus. Allerdings sind diese teilweise ebenfalls nicht vernachlässigbar

und der Einfluss der Laserfokusgeometrie ist mit dem dieser Arbeit identisch. Werden bildbasierte Prozessdaten verwendet, so lässt sich die hier beschriebene Vorgehensweise direkt anwenden. Der vorgestellte Simulationsansatz basiert auf der Unabhängigkeit der einzelnen Abweichungsursachen, wie sie für die meisten systembedingten Abweichungsursachen zutrifft. Aus diesem Grund können diese Fehler einzeln untersucht und vermessen werden. Mittels Faltung der Einzelfehlerfunktionen kann die statistische Gesamtfehlerfunktion für den schichtweisen Abtragsprozess berechnet und die einflussreichsten Ursachen identifiziert werden. Für die in dieser Arbeit verwendete Systemkonfiguration sind dies das Taumeln des Polygons und die Geometrie bzw. Ausdehnung des Laserfokus.

Bei einer vektorbasierten Prozessstrategie zum Strukturieren, müsste die Wunschgeometrie vor der Ableitung der Bearbeitungsvektoren entsprechend vorverarbeitet werden. Die Übertragung des Ansatzes dieser Arbeit zur Simulation und Reduktion von Geometrieabweichungen bei Strukturierungsprozessen mit gepulster Laserstrahlung auf andere Bearbeitungsverfahren ist zu untersuchen. Die Anwendung dieses Ansatzes auf additive Verfahren wie das selektive Laserschmelzen, Laserauftragschweißen oder stereolithographische Prozesse ist in der Zukunft denkbar.

Anhang

A.1 Berechnung der Abtragseffizienz

Die Fluenz im Material nimmt entsprechend der Absorption der Laserstrahlung nach Lambert-Beer (Formel (28)) ab. Die optische Eindringtiefe δ entspricht dem Kehrwert des Absorptionskoeffizienten der Laserstrahlung im Material α . Der Laserabtrag findet bis zu einer Tiefe statt, bei der die Fluenz $\Phi(z)$ größer als die Abtragsschwellfluenz Φ_{th} des Materials ist. Mit Hilfe dieser Grenzwertbetrachtung kann die maximale Abtragstiefe z_{abtr} durch Auflösen nach z_{abtr} für die Fluenz eines Punktes an der Materialoberfläche Φ berechnet werden.

$$\Phi(z) = \Phi \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \text{ mit } \delta = \frac{1}{\alpha} \quad (28)$$

$$\Phi_{th} = \Phi \cdot e^{-\frac{z_{abtr}}{\delta}}$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{th}} = e^{\frac{z_{abtr}}{\delta}}$$

$$z_{abtr} = \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_{th}}\right) \quad (29)$$

Für ein Strahlprofil mit Top-Hat-Verteilung ist die Fluenz Φ idealerweise über die komplette Abtragsfläche A konstant. Daher berechnet sich das Abtragsvolumen für ein quadratisches Top-Hat-Profil mit der Kantenlänge $2w_0$ nach Formel (30).

$$\Delta V_{TopHat} = A \cdot z_{abtr}$$

$$= 4 \cdot \omega_0^2 \cdot \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_{th}}\right) \quad (30)$$

Für ein gaußförmiges Strahlprofil muss das Abtragsvolumen entsprechend der Energieverteilung über das Volumen integriert werden. Das Lösen des Integrals für das Abtragsvolumen $\Delta V_{Gau\beta}$ aus Gleichung (31) resultiert in Formel (32).

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{Gau\beta} &= \int r \, dV = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} \int_0^{z_{abtr}} r \, d\varphi dr dz \quad (31) \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} r \, z_{abtr}(r) \, d\varphi dr \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} r \, \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi(r)}{\Phi_{th}}\right) \, d\varphi dr \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} r \, \delta \cdot \ln\left(\frac{\Phi_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}}{\Phi_{th}}\right) \, d\varphi dr \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} r \, \delta \cdot \left[\ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) - \frac{2r^2}{\omega_0^2} \right] \, d\varphi dr \\
 &= \int_0^{2\pi} \delta \cdot \left[\frac{r^2}{2} \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) - \frac{2r^4}{4\omega_0^2} \right]_0^{r_a} \, d\varphi \\
 &= \int_0^{2\pi} \delta \frac{\omega_0^2}{2} \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) \left[\frac{1}{2} \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) - \frac{1}{2\omega_0^2} \frac{\omega_0^2}{2} \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) \right] \, d\varphi \\
 &= \int_0^{2\pi} \delta \frac{\omega_0^2}{8} \ln^2\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}}\right) \, d\varphi
 \end{aligned}$$

$$\Delta V_{Gau\beta} = \frac{\pi}{4} \cdot \delta \cdot \omega_0^2 \cdot \ln^2 \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}} \right) \quad (32)$$

Zum Lösen des Integrals werden die nachfolgenden Formeln verwendet. Der Verlauf der Fluenz für ein gaußförmiges Strahlprofil ist durch Formel (33) definiert. Die Spitzenfluenz Φ_0 in Abhängigkeit der Pulsenergie E_P erfolgt mit den Formeln (34) und (35). Formel (36) beschreibt den Radius r_a , in dem ein Abtrag mit einem gaußförmigen Strahlprofil stattfindet.

$$\Phi(r) = \Phi_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} \quad (33)$$

$$\Phi_0 = \frac{2 \cdot E_P}{\pi \cdot \omega_0^2}, \quad (34)$$

$$E_P = \frac{P_M}{f_P} \quad (35)$$

$$r_a^2 = \frac{\omega_0^2}{2} \ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}} \right) \quad (36)$$

Basierend auf dem Abtrag / Puls eines gaußförmigen Strahlprofils aus Formel (32) berechnet sich die Abtragseffizienz nach Formel (37).

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \dot{V}_{Gau\beta}}{P_M} &= \Delta V_{Gau\beta} \cdot \frac{f_P}{P_M} \\ &= \frac{1}{4} \pi \cdot \delta \cdot \omega_0^2 \cdot \ln^2 \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}} \right) \cdot \frac{2 \cdot f_P}{\Phi_0 \cdot \pi \cdot \omega_0^2 \cdot f_P} \\ &= \frac{\delta}{2 \cdot \Phi_0} \ln^2 \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

A.2 Optische Simulationen des Polygonscannersystems

Abbildung 60:
Anordnung zur Si-
mulation der Scan-
wegs und
Telezentriefehlers
für das F-Theta
Objektiv

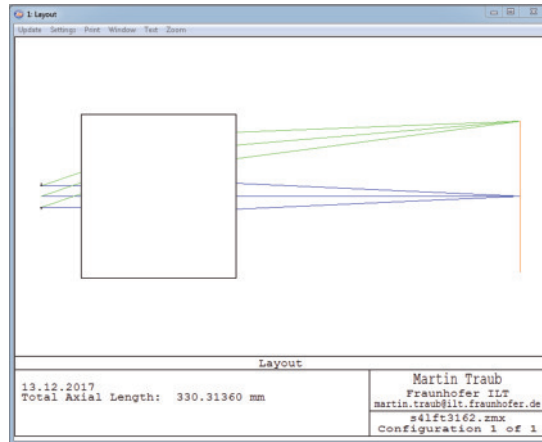


Abbildung 61:
Simulationsergeb-
nis der Scanlänge
und des Tele-
zentriefehlers

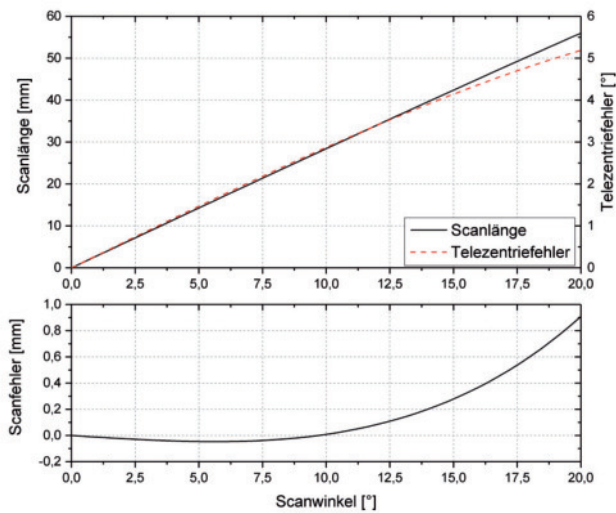
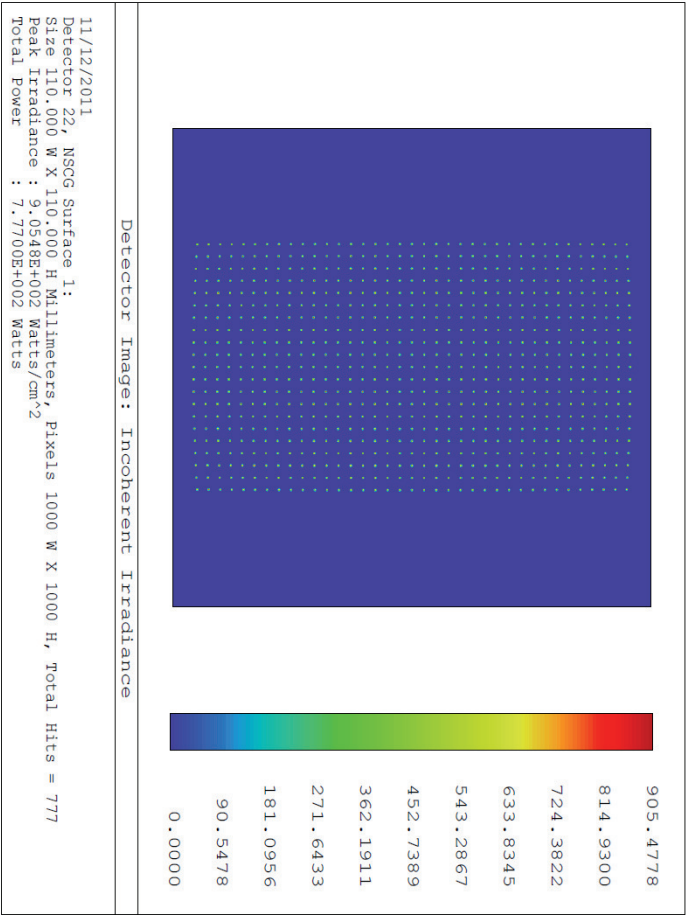
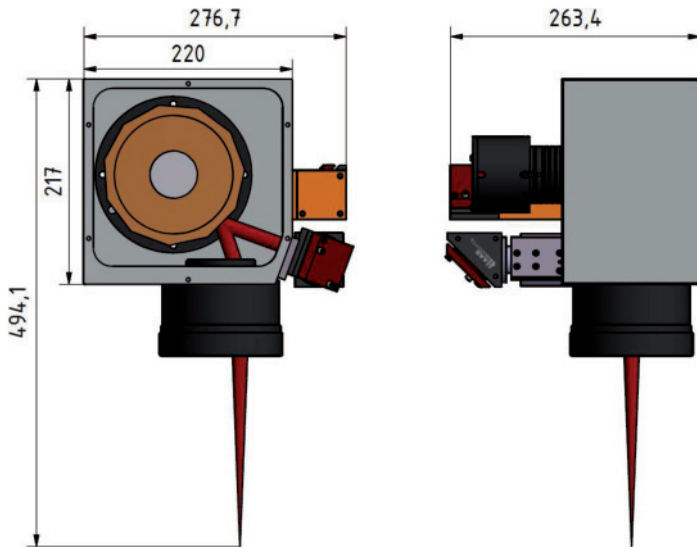


Abbildung 62:
Simulationsergeb-
nis der optischen
Verzeichnung im
Scanfeld des F-
Theta Objektivs



A.3 Konstruktionsübersicht des Polygonscanners

Abbildung 63:
Konstruktions-
übersicht des Poly-
gonscanners mit
Einkoppelspiegel

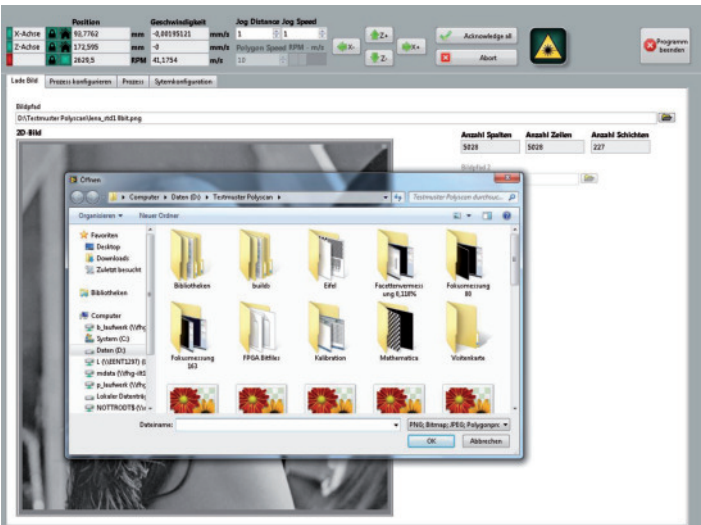


A.4 Programmierung der Steuerung

Die Benutzeroberfläche und Echtzeitsteuerung des Polygonscannersystems ist in LabView programmiert, wobei für den Echtzeitteil das LabView FPGA Modul verwendet wurde. Der Programmablauf ist in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

Abbildung 64 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche. Im oberen Bereich können die X-Achse für den Vorschub des Werkstücks, die Z-Achse zur Fokuseinstellung und das Polygon manuell betrieben werden. Im Hauptbereich werden die Prozessdaten geladen. Die Prozessdaten bzw. Höhenbilder können als bmp, png oder jpg vorliegen werden.

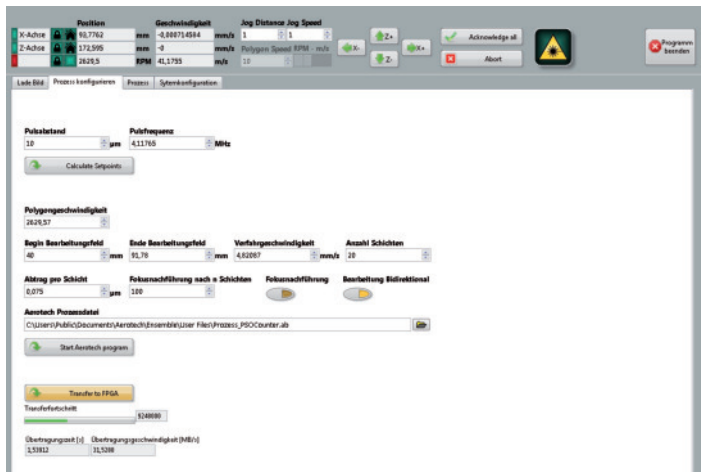
Abbildung 64:
Screenshot der Benutzeroberfläche –
Laden der Prozess-
daten



Im zweiten Schritt der Datenverarbeitung müssen Laserpulsfrequenz, Pixelgröße und Bearbeitungsbereich eingestellt werden. Zusätzlich gibt es die

Möglichkeit die Bearbeitung in eine oder beide Verfahrrichtungen, sowie eine Fokussachführung zu aktivieren. Im Anschluss müssen die eingestellten Parameter und die Prozessdaten in die Steuerung der Achse und in die Echtzeitsteuerung übertragen werden, wie in Abbildung 65 dargestellt.

Abbildung 65: Screenshot der Benutzeroberfläche – Definieren und Übertragen der Prozessparameter in die Echtzeitsteuerung



In Abbildung 66 ist die Benutzeroberfläche während der Bearbeitung dargestellt. Der Prozessfortschritt und die aktuelle Bearbeitungsschicht werden gezeigt. Die Möglichkeit den Prozess am Ende einer Überfahrt zu pausieren besteht.

Damit die Bearbeitung präzise erfolgt müssen vor allem die Linienanfänge der Facetten einzeln eingestellt werden. Dies erfolgt über die Facettenkonfigurationswerte auf der rechten Seite in Abbildung 67. Zur Kalibrierung können die Facetten einzeln aktiviert werden.

Abbildung 66:
Screenshot der Be-
nutzeroberfläche –
Ansicht der aktuell-
en Bearbeitungss-
schicht und
Prozessvorschritt

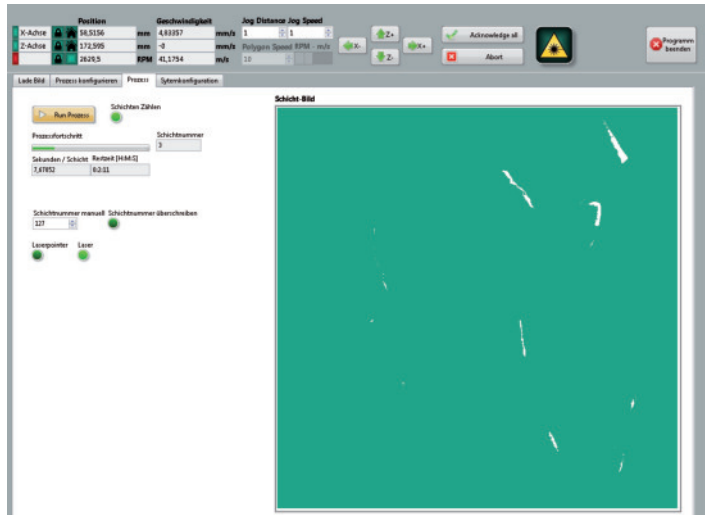
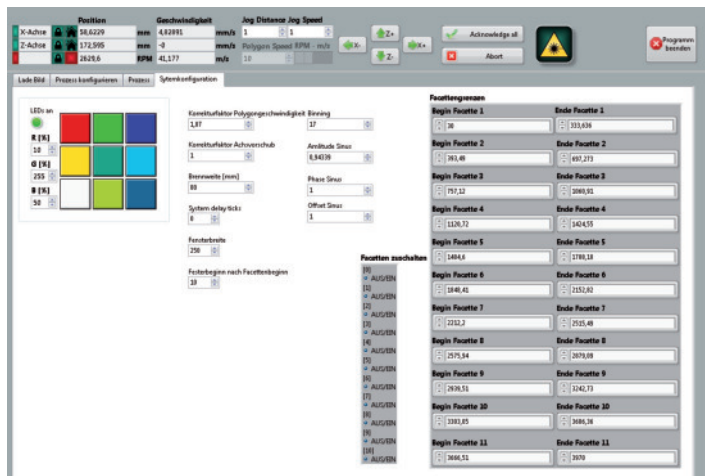


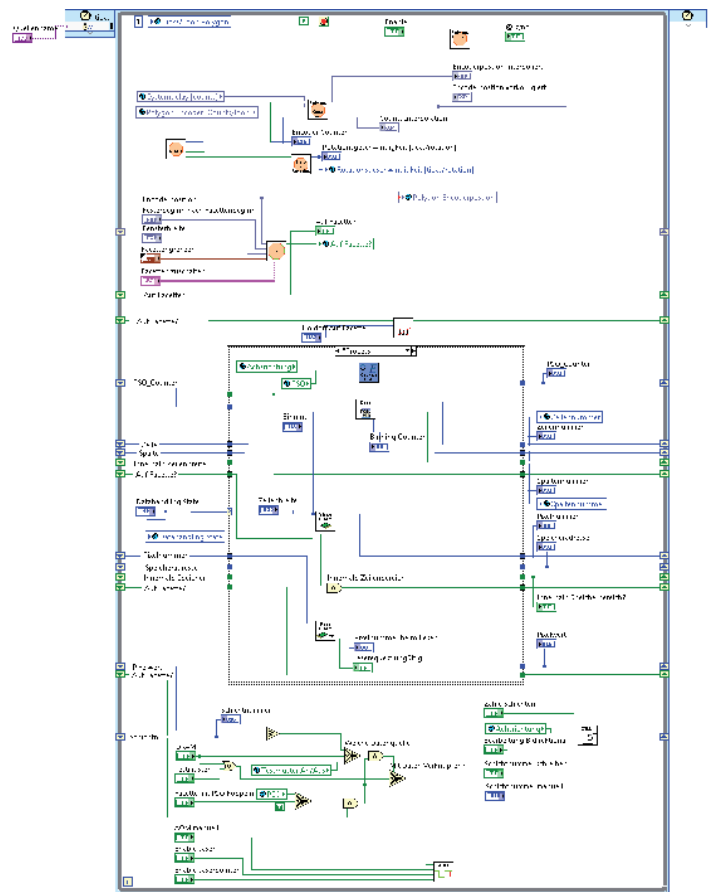
Abbildung 67:
Screenshot der Be-
nutzeroberfläche –
Konfiguration und
Kalibrierung des
Bearbeitungssys-
tems



Die Hauptschleife der Echtzeitsteuerung auf dem FPGA in Abbildung 68 verwendet keine Synchronisationsregister in der Logik innerhalb eines

Schleifendurchlaufs. Die Ergebnisse eines Durchlaufs werden mit dem nächsten Takt weiterverwendet wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, was durch Rechtecke mit Dreiecken am Rahmen der Schleife symbolisiert ist.

Abbildung 68:
Screenshot des
Hauptpro-
grammablaufs
auf dem FPGA der
Echtzeitsteuerung



A.5 Weitere Darstellungen des Vergleichs der Prozessergebnisse mit und ohne Abweichungsvorkompensation

Abbildung 69:
Gesamter Profil-
vergleich von Soll-
kontur, Simulation
und den Prozess-
ergebnissen der ori-
ginalen und
vorverarbeiteten
Prozessdaten

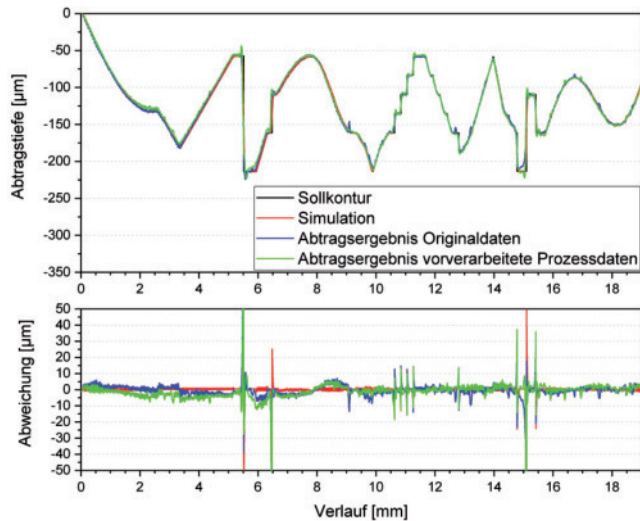


Abbildung 70:
Ausschnitt des
Profilvergleichs
von Sollkontur, Si-
mulation und den
Prozessergebnis-
sen der originalen
und vorverarbeiteten
Prozessdaten
im Bereich
5,25 - 6,75 mm

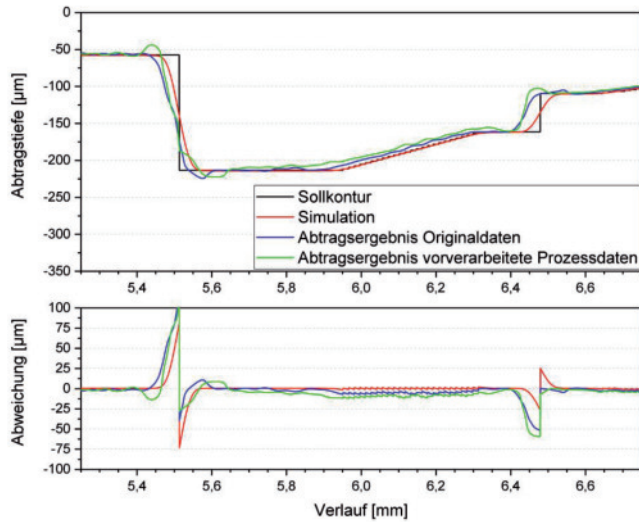


Abbildung 71:
Ausschnitt des
Profilvergleichs
von Sollkontur, Si-
mulation und den
Prozessergebnis-
sen der originalen
und vorverarbeiteten
Prozessdaten
im Bereich
9,5 – 10,5 mm

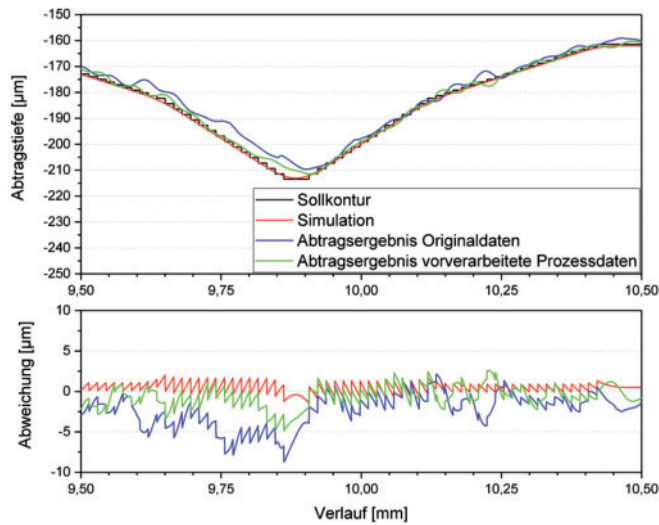


Abbildung 72:
Ausschnitt des
Profilvergleichs
von Sollkontur, Si-
mulation und den
Prozessergebnis-
sen der originalen
und vorverarbeit-
ten Prozessdaten
im Bereich
11,5 – 12,0 mm

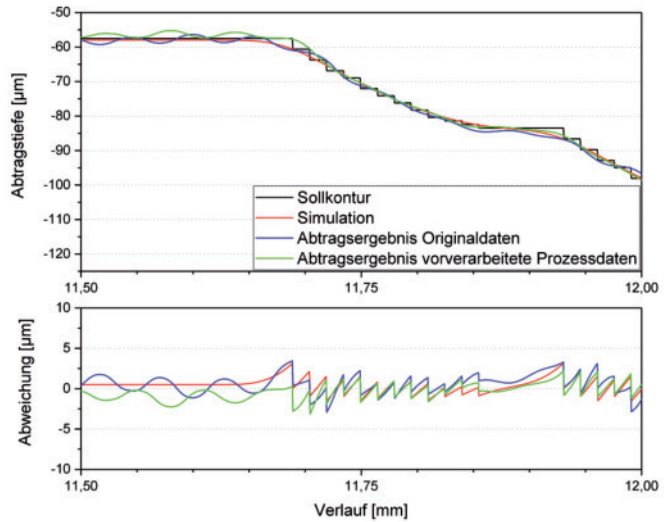
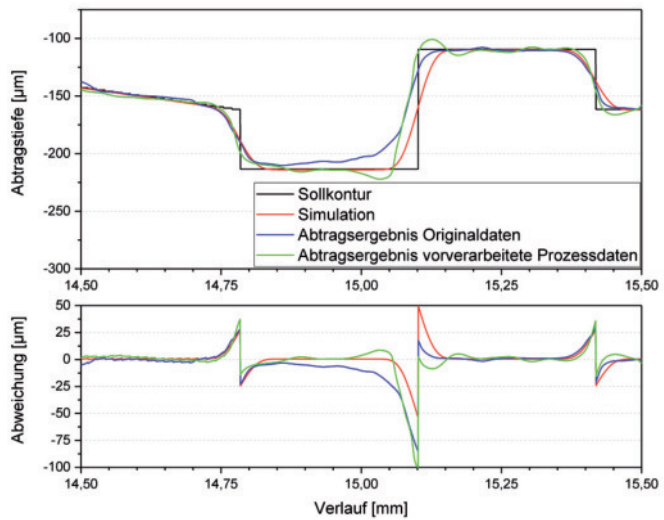


Abbildung 73:
Ausschnitt des
Profilvergleichs
von Sollkontur, Si-
mulation und den
Prozessergebnis-
sen der originalen
und vorverarbeit-
ten Prozessdaten
im Bereich
14,5 – 15,5 mm



A.6 Datenblätter der Komponenten

Die Echtzeitsteuerung des Polygonscannersystem besteht aus folgenden Hardware-Modulen von National Instruments:

1. PXIe-1073, PXI-Chassis mit 5 Steckplätzen
2. PXIe-7962R, PXI-FPGA-Modul für FlexRIO mit Virtex-5-SX50T-FPGA, 512 MB DRAM
3. NI-6581, Digital-I/O-Adaptermodul für FlexRIO mit 54 Single-ended-Kanälen, 100 MHz

Zur Programmierung der Steuerung und der FPGA-basierten Hardware wurden die NI Developer Suite mit der FPGA Deployment Option verwendet.

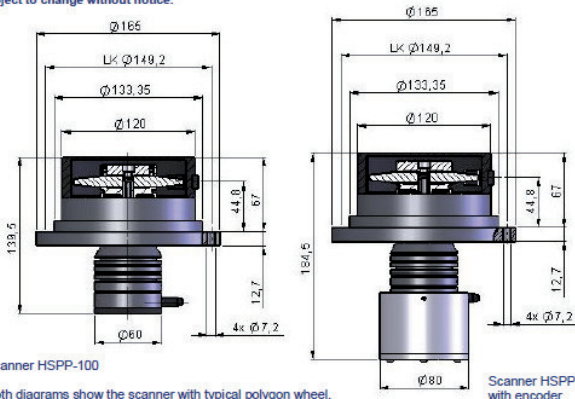
Abbildung 74:
Datenblatt des Po-
lygonscanners der
Firma Kugler
GmbH [59]

TECHNICAL DATA



	HSPP-100	HSPP-100 / Encoder
Spindle		
Bearing Type	high speed ball bearings	
Shaft	precision ground hardened steel	
Motor	DC brushless, 6-pole (4-pole for high speed)	
Commutation	Hall encoder	1000 line incremental encoder (sine commutation), and Hall
Maximum speed	25.000 rpm (40.000 rpm optional)	
Minimum Speed	1000 rpm (typical)	100 rpm (typical)
Polygon Mirror		
Material	aluminum; optional nickel plating	
Typical diameter	50 mm - 150 mm	
Typical thickness	5 mm - 20 mm	
Number of facets	6 - 36 typical	
Flatness of facets PV	60 nm - 250 nm (depending on size of facets)	
Roughness Ra	< 6 nm (< 3 nm depending on aluminum alloy and/or plating)	
Pyramidal Error	relative error < 10 arcsec (typical)	
Reflectivity	depending on surface coating; typically > 98% for a visible light or near infrared wavelengths	
Complete Unit		
Balancing	< 0.03 mm/sec	
Scanning accuracy	better 15 arcsec	

Subject to change without notice.



Technical drawings of the HSPP-100 scanner. The left drawing shows the scanner with a typical polygon wheel, and the right drawing shows the scanner with an encoder. Both drawings include dimensions for the scanner body and the polygon wheel.

Dimensions for the scanner body (common to both):

- Overall height: 139.5
- Overall width: $\varnothing 165$
- Internal width: $\varnothing 149.2$
- Internal width: $\varnothing 133.35$
- Internal width: $\varnothing 120$
- Mounting flange thickness: 4.4
- Mounting flange diameter: $\varnothing 7.2$
- Base diameter: $\varnothing 80$
- Base height: 12.7

Dimensions for the polygon wheel (common to both):

- Overall height: 6.7
- Overall width: $\varnothing 165$
- Internal width: $\varnothing 149.2$
- Internal width: $\varnothing 133.35$
- Internal width: $\varnothing 120$
- Mounting flange thickness: 4.4
- Mounting flange diameter: $\varnothing 7.2$

Scanner HSPP-100

Scanner HSPP-100 with encoder

Both diagrams show the scanner with typical polygon wheel.

Abbildung 75:
Datenblatt der Beschichtung des Polyscanners [60]



Datenblatt/ Data Sheet

Hartgold / Hard Gold

1. Schichtaufbau / Coating Design*

Plasmaunterstützt aufgedampfte Goldschicht.
Plasma assisted deposition of Gold.

2. Reflexion/ Reflection*

630-635nm	R > 82,0 %	±2,5%	AOI 45° r-pol
1-2 µm:	R > 95,0 %	±1,0%	AOI 45° r-pol
> 2 µm	R > 98,0 %	±0,5%	AOI 45° r-pol
10,6 µm	R > 99,0 %	±0,2%	AOI 0°
	R > 99,1 %	±0,2%	AOI 45° s-pol
	R > 98,4 %	±0,2%	AOI 45° p-pol

3. Phasenschiebung / Phase Shift *

Wellenlänge/ Wavelength: 10,6 µm
Einfallswinkel / AOI: 45 °
Phasenschiebung / Phase Shift: < 2 °

4. Schichteigenschaft*

Haftung:
Adhesion: MIL-F-48616 § 4.6.8.1

Luftfeuchte:
Humidity: MIL-F-48616 § 4.6.8.2

Härte:
Abrasion: vorsichtig reinigen, clean carefully
zerkratzt leicht, scratches easily

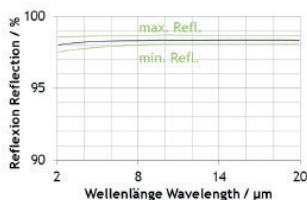
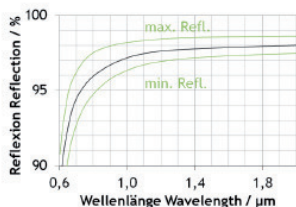
Temperatur:
Temperature: MIL-F-48616 § 4.6.9.1

5. Zerstörschwelle / Damage Threshold

Wellenlänge/ Wavelength: 10,6 µm
Einfallswinkel / AOI: 45 °
Zerstörschwelle / Damage Thres.: 750 kW / cm²

Wellenlänge / Wavelength: 1064 nm
Einfallswinkel / AOI : 0 °
Zerstörschwelle / Damage Thres.: 7,2 J/cm²

6. Spektren / Spectra:



* empirische Werte aus 2012 gemessen an Witness-P.
Reflexionsschwankungen prozessbedingt und aufgrund
von Oberflächeneigenschaften (Rauigkeit, Mikrostruktur).

Empiric data of 2012 measured on witness pieces.
Process-related variations are based on surface properties
(roughness, micro structure).

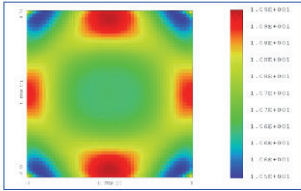
Abbildung 76:
Datenblatt der Fo-
kussieroptik des
Polygonscanners
S4LFT3162/328
von Sill Optics [61]

DATA SHEET



specifications	
article number	S4LFT3162/328
design wavelength [nm]	1064
effective focal length [mm]	163.5
max. entrance beam-Ø [mm]	15.0
optical scan angle [±°]	22.9
scan length [mm] (1 mirror system)	127.3
aperture stop distance [mm]	27.7
working distance [mm]	201.5
scan area for a 2 mirror system with mirror distance from lens housing for mirror 2 / mirror 1	90 x 90 19.7 / 35.7
max. telecentricity error [°]	5.6
total transmission [%]	> 97
lens material	fused silica
LIDT (coating)	5.0 J/cm² per 1ns pulse at 50Hz 5.0 MW/cm² cw
SP and USP usable [✓/✗]	✓
weight [kg]	1.80
cover glass	S4LPG4160/328
accessory	---

spot



- spot radius in µm at 86% level for a Gaussian laser beam ($M^2=1$) with 15 mm diameter at $1/e^2$, clipped at $1/e^2$
- field size and mirror distances as given above for a 2 mirror scan system
- PRAM parameters: mechanical mirror scan angle

notes

The aperture stop given is the point where the scan mirrors should be placed symmetrically around in order to reach best performance. In a 1 mirror system it is the position of the scan mirror.
Aperture stop distance = front focal point in telecentric f-theta lenses

The calculations of the scan length and scan areas of our f-theta lenses are based on the geometric design of typical scan systems with a certain mirror spacing. The values given assume a vignetting of less than 1%. If used with non-typical scan systems or with scan systems which have been designed for larger or smaller laser beams, different scan lengths and scan areas will result.

Effective focal length and working distance have a tolerance of +/- 1.5%
Graphs given by design

LIDT = Laser Induced Damage Threshold, valid for the coating at design wavelength and gaussian intensity profil
General LIDT for lenses without SP/USP compatibility (short pulse or ultra short pulse) can be lower, depending on material and internal reflections.

Abbildung 77:
Spezifikation der
Linearachse mit ei-
nem Fahrweg
von 200 mm zum
Verfahren des
Werkstücks von
Aerotech Inc. [58]

PRO225LM Series SPECIFICATIONS

Mechanical Specifications		PRO225LM					
Travel		100	150	200	250	300	400
Accuracy ⁽¹⁾	Standard	±4 µm	±6 µm	±8 µm	±9 µm	±10 µm	±12 µm
	Calibrated	±1 µm	±1 µm	±1 µm	±1 µm	±1 µm	±1 µm
Resolution (Min. Incremental Motion)		5 nm (-E1 Encoder), 10 nm (-E3 Encoder)					
Bidirectional Repeatability ⁽²⁾		±0.3 µm	±0.4 µm	±0.4 µm	±0.4 µm	±0.4 µm	±0.4 µm
Horizontal Straightness ⁽³⁾		±1.5 µm	±2 µm	±2.5 µm	±3 µm	±3.5 µm	±4.5 µm
Vertical Straightness ⁽³⁾		±1.5 µm	±2 µm	±2.5 µm	±3 µm	±3.5 µm	±4.5 µm
Pitch		26 µrad (5.2 arc sec)	29 µrad (6 arc sec)	39 µrad (8.0 arc sec)	44 µrad (9.1 arc sec)	50 µrad (10.3 arc sec)	60 µrad (12.4 arc sec)
Roll		27 µrad (5.6 arc sec)	29 µrad (6 arc sec)	39 µrad (8.0 arc sec)	44 µrad (9.1 arc sec)	50 µrad (10.3 arc sec)	60 µrad (12.4 arc sec)
Yaw		27 µrad (5.6 arc sec)	29 µrad (6 arc sec)	39 µrad (8.0 arc sec)	44 µrad (9.1 arc sec)	50 µrad (10.3 arc sec)	60 µrad (12.4 arc sec)
Maximum Speed ⁽⁴⁾		2 m/s					
Maximum Acceleration ⁽⁴⁾		3 g					
Maximum Force, Continuous		153 N – Standard 251.6 N – With Air Cooling (20 psig)					
Load Capacity ⁽⁴⁾	Horizontal	100 kg					
	Side	100 kg					
Moving Mass		8.4 kg					
Stage Mass		23.8 kg	25.4 kg	26.9 kg	28.5 kg	30.1 kg	33.3 kg
Material		Anodized Aluminum					
MTBF (Mean Time Between Failure)		20,000 Hours					

Notes:
1. Certified with -PL1 option.
2. Requires the selection of an appropriate amplifier with sufficient voltage and current.
3. Axis-orientation for on-axis loading is listed.
4. Specifications are for single-axis systems measured 25 mm above the tabletop. Performance of multi-axis systems is payload and workpoint dependent. Contact factory for multi-axis applications.

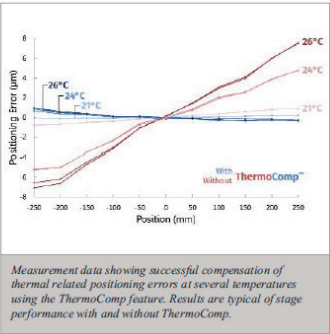
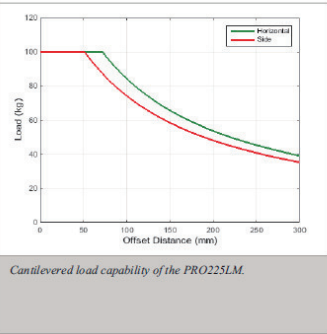
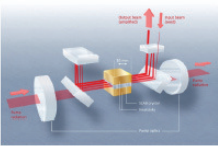


Abbildung 78:
Datenblatt des ver-
wendeten Lasers
[57]

AMPHOS 400



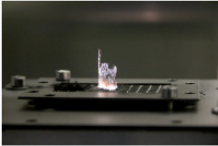
Parameter	Average output power	Wave-length	Pulse duration	Repetition rate	Max. pulse energy	Beam quality
	> 400 W	1030 nm	< 1 ps ... > 10 ps	800 kHz ... 40 MHz	> 500 µJ	M ² < 1.5



InnoSlab amplification scheme:
Compact, simple, scalable



Control unit:
19" rack with 28HU



Machining of CFRP with AMPHOS 400

Features

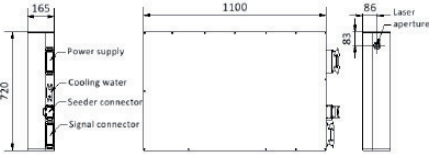
- High repetition rate EOM
- Power setting unit
- Flexible pulse duration and repetition rate by software
- Integrated high power optical isolator

Options

- Higher Pulse energy
- Seedlaser: fs, ps, ns, cw
- Additional amplifier stage to achieve 1000W output power
- Frequency conversion
- Amplifier-only version

Applications

- OPCPA
- Micromachining
- Thin film PV patterning
- Laser scribing
- Laser dicing
- Silicon edge isolation
- Microfluidic devices
- SLE process



165
720
1100
86
83
Laser aperture

Power supply
Cooling water
Seedler connector
Signal connector

Dimension, Interfaces

- Laser Head
- Width: 72 cm
- Height: 16,5 cm
- Length: 111 cm
- TCP/IP cs
- Fast external modulator
- Cooling water

©02/2016 AMPHOS GmbH – Kaiserstraße 100 – 52134 Herzogenrath – +49 241 565292 10 – info@amphos.de
All specifications are typical data and subject to change without notice in order to provide the best product possible.

Literaturverzeichnis

- [1] ML Engraving srl: Wer kein D.R.E.® hat, hat nur Maschinen, 2013. <http://www.mlen-graving.com/de/surface-texture/laser-texturing>, abgerufen am: 18.05.2016
- [2] Trumpf: TruMicor Serie 5000, 2016. <http://www.de.trumpf.com/de/produkte/laser-technik/produkte/festkoerperlaser/kurz-und-ultrakurzpuls laser/trumicro-serie-5000.html>
- [3] Coherent: Picosecond Lasers, 2016. <http://www.coherent.com/products/index.cfm?2184/Picosecond-Lasers>
- [4] König, J.: Abtragsprozesse bei Bestrahlung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen, Universität Jena, Phys.-Astronom. Fakultät 2006, Dissertation
- [5] Weber, P., Nippgen, S.: UKP-Laser-Fertigung schneller als ein Lidschlag. Ultrakurzpuls-Laser revolutionieren die Mikrofertigung, Made in Germany 2015/16. <http://www.scanlab.de/sites/default/files/Presse/Pressespiegel/Made-in-Germany-2015-Produktion-Scanlab-UKP-laser-s78.pdf>, abgerufen am: 11.09.2016
- [6] Hofmann, L., Häfner T: Einsatz der Simulation zur Optimierung der Abtragsrate beim Strukturieren mittels Pikosekundenlaser, Tagungsband des 16. Seminars LEF 2013 Vol. 16 pp. 51-55 (2013)
- [7] Johnson, R.: Radar Analogies For Optics. Effective Utilization of Optics in Radar Systems (1977) Proc. SPIE 128
- [8] Naumann, H., Schröder, G: Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2014
- [9] Randy Culp: Telescope Equations, 2012. <http://www.rocketmime.com/astronomy/Telescope/ResolvingPower.html>, abgerufen am: 05.03.2017
- [10] Wikipedia: Beugungsscheibchen, 2017. <https://de.wikipedia.org/wiki/Beugungsscheibchen>, abgerufen am: 05.03.2017
- [11] National Instruments: Impulse Response, 2012. https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/ivanlsconcepts/lvac_impuse_response/, abgerufen am: 05.03.2017
- [12] Wiley: Time response. <http://highereducs.wiley.com/legacy/college/nise/0471794759/justask/Q37.html#detailed>, abgerufen am: 05.03.2017
- [13] Eichler, J. u. Eichler, H.-J.: Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen : mit 57 Tabellen, 164 Aufgaben und vollständigen Lösungswegen. Berlin [u.a.]: Springer 2006
- [14] Neuenschwander, B. (Hrsg.): Processing of metals and dielectric materials with ps-laserpulses: results, strategies, limitations and needs, Proc. SPIE 7584, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing XV, 75840R (2010)
- [15] Russ, S.: Shorter than short. Influence of the pulse duration on the process efficiency of conductive materials?, Paper161, Lasers in Manufacturing 2015, (2015)
- [16] Neuenschwander, B.: High speed scanning of an ultra short pulsed laser for high throughput surface structuring, AILU workshop "Power beam delivery and manipulation: achieving high flexibility and productivity with lasers" 2013

- [17] Brüning, S.: High precision laser processing of steel surfaces with sub-ns-lasers. *Physics Procedia* (2014) 56, S. 919–926
- [18] lightmotif: Laser surface texturing, 2014. <http://www.lightmotif.nl/texturing/>, abgerufen am: 08.06.2016
- [19] Bonse, J., Krüger, J., Höhm, S. u. Rosenfeld, A.: Femtosecond laser-induced periodic surface structures. *Journal of Laser Applications* 24 (2012) 4, S. 42006
- [20] Breitling, D.: Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung, Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, 2010
- [21] Finger, J., Reininghaus, M.: The role of pulse to pulse interactions during USP-laser ablation with high average power and repetition rates, *Opt. Express* 22, 18790-18799 (2014)
- [22] Raciukaitis, G.: Efficiency Aspects in Processing of Metals with High-repetition-rate Ultra-short-pulse Lasers. In: *Proceedings of ICALEO, M403*, 2008
- [23] Scanlab AG: intelliSCAN data sheet. http://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Daten/Data-Sheets/Scan-Systems/intelliSCAN%2BintelliSCANde_EN.pdf, abgerufen am: 13.03.2016
- [24] Scanlab AG: excelliSCAN data sheet, abgerufen am: 13.03.2016
- [25] European Technology Platform Photonics21: Towards 2020 - Photonics Driving Economic Growth in Europe. Multiannual Strategic Roadmap 2014 – 2020. http://www.photonics21.org/download/Brochures/Photonics_Roadmap_final_low-res.pdf, abgerufen am: 13.03.2016
- [26] Sagan, S.: Optical Systems for Laser Scanners. In: *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Second Edition. Optical Science and Engineering. CRC Press 2011, S. 69–132
- [27] Eifel, S.: Effizienz- und Qualitätssteigerung bei der Lasermikrobearbeitung mit UKP-Lasern durch neue optische Systemtechnik. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2015. Ergebnisse aus der Lasertechnik. Aachen: Apprimus-Verl 2015
- [28] Stutz, G.: Polygonal Scanners. In: *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Second Edition. Optical Science and Engineering. CRC Press 2011, S. 247–280
- [29] Beiser, L.: Unified optical scanning technology. A Wiley-Interscience publication. Hoboken, NJ: Wiley 2003
- [30] Beckhoff: XFC - eXtreme Fast Control Technology. XFC – The new class of Control Performance. ftp://ftp.beckhoff.de/Document/XFC/XFC_Einleitung.pdf, abgerufen am: 06.06.2016
- [31] Beckhoff: XFC: EtherCAT-PLC mit 12,5 µs Zykluszeit. Beckhoff: Ultraschnell mit Standardkomponenten, PC-Control 2012. www.ethercat.de/download/documents/pcc_0212_xfc_d.pdf, abgerufen am: 13.03.2016
- [32] De Loor, R.: Polygon Scanner System for Ultra Short Pulsed Laser Micro-Machining Applications. *Physics Procedia* (2013) 41, S. 544–551
- [33] Time-Bandwidth Products: Duetto User Manual, 2013

- [34] Kesel, F., Bartholomä, R.: Entwurf von digitalen Schaltungen und Systemen mit HDLs und FPGAs: Einführung mit VHDL und SystemC, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [35] Bergmann Messgeräte Entwicklung KG: Pockels cell drivers. High repetition-rate systems, 2016. <http://www.bme-bergmann.de/pockel.htm>
- [36] Wikipedia: Heightmap, 2017. <https://en.wikipedia.org/wiki/Heightmap>, abgerufen am: 04.03.2017
- [37] Brown, D.: Decentering distortion of lenses. In: Photogrammetric Engineering. 32 (3), S. 444–462
- [38] Hugemann, W.: Correcting Lens Distortions in Digital Photographs. In: 10th International ITAI Conference, Leeds, UK (2011) pp., S. 217–230
- [39] Lumentum: Argos High-power picosecond Laser datasheet, 2016. <https://www.lumentum.com/sites/default/files/technical-library-items/argoshppslaser-ds-cl-ae.pdf>
- [40] Raylase: Ultra-high-speed scanner, 2016. <http://www.raylase.de/de/produkte/2-achsen-ablenkeinheiten/ultra-high-speed-scanner/>
- [41] Topag: FBS Gauß-zu-Top Hat Strahlformer, 2015. <http://www.topag.de/de/beam-shaping/gauss-to-top-hat-diffractive/340-fbs-gauss-to-top-hat-focus-beam-shaper.html>, abgerufen am: 13.03.2016
- [42] Steen, W., Mazumder, J.: Laser material processing. London, New York: Springer 2010
- [43] Matthias, A., Reichling, M., Siegel, J., Käding, O., Petzoldt, S., Skurk, H., Bizenberger, P.: The influence of thermal diffusion on laser ablation of metal films, Appl. Phys. A58 (1994) 129
- [44] Jakschik, S.: Reine Luft für Ultrakurzpuls-Laser. Verfahrensforschung zur Charakterisierung der Partikelphase bei Ultrakurzpuls-Lasern. http://www.ult.de/images/content/download/05_fachbeitraege/FA_Reine_Luft_fuer_UKP.pdf, abgerufen am: 20.03.2016
- [45] Scanlab AG: <http://www.scanlab.de/news-termine/pressemitteilungen/polygon-scanner-macht-ukp-laser-zu-sprintern>. <http://www.scanlab.de/news-termine/pressemitteilungen/polygon-scanner-macht-ukp-laser-zu-sprintern>, abgerufen am: 13.03.2016
- [46] Lincoln Laser Company: hyperScan datasheet. <http://www.lincolnlaser.com/files/hyper-scan-datasheet-20150817.pdf>, abgerufen am: 11.07.2016
- [47] Jakschik, S.: Laserrauch bei Femtosekunden-Laserprozessen - Produkt-, Prozess- und Umweltbetrachtungen. http://www.ult.de/images/content/download/05_fachbeitraege/FA_Laserrauch_bei_FS_Laserprozessen_de.pdf, abgerufen am: 20.03.2016
- [48] Kühlmeyer, M.: Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure. Mit Praxisbeispielen. VDI-Buch. Berlin: Springer 2001
- [49] Süsse, H.: Bildverarbeitung und Objekterkennung. Computer Vision in Industrie und Medizin. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [50] Girod, B., Rabenstein, R. u. Stenger, A.: Einführung in die Systemtheorie. Signale und Systeme in der Elektrotechnik und Informationstechnik ; mit 113 Beispielen sowie 200 Übungsaufgaben. Lehrbuch Elektrotechnik. Wiesbaden: Teubner 2007

- [51] Kümmeke, H. (Hrsg.): Einführung in die Systemtheorie. Wikibooks 2014, https://de.wikibooks.org/wiki/Einführung_in_die_Systemtheorie, abgerufen am 20.6.2016
- [52] Nasse, H.: Wie liest man MTF-Kurven, 2008. https://www.zeiss.com/content/dam/Photography/new/pdf/de/cln_archiv/cln30_de_web_special_mtf_01.pdf, abgerufen am: 06.06.2016
- [53] Bredies, K. u. Lorenz, D.: Mathematische Bildverarbeitung. Einführung in Grundlagen und moderne Theorie. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011, 2011
- [54] GF Machining Solutions Management SA: Laser texturing. http://www.gfms.com/country_US/en/Products/laser-texturing.html
- [55] Bauer, A.: Produktivitätssteigerung bei UKP-Lasersystemen, 2015. http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Pressemeldungen/pm2015/PM_UKP-Laser_Pulskompressor_LASER_2015.pdf, abgerufen am: 02.07.2016
- [56] Nolte, S., Momma, C., Jacobs, H., Tünnermann, A., Chichkov, B., Wellegehausen, B., Welling, H.: Ablation of metals by ultrashort laser pulses, Journal of the Optical Society of America B14 (1997), Nr 10, S. 2716-2722
- [57] AMPHOS GmbH: AMPHOS 400 data sheet, <http://www.amphos-usa.com/sites/default/files/Amphos%20400%20Feb2016.pdf>, abgerufen am 29.11.2017
- [58] Aerotech Inc.: Produktdatenblatt PRO225LM Mechanisch gelagerter Linearmotortisch, <https://www.aerotechgmbh.de/media/3067299/pro225lm.pdf>, abgerufen am 29.11.2017
- [59] Kugler GmbH: Data Sheet Scanner HSPP-100, <https://www.kugler-precision.com/index.php?Scanner-fuer-die-Leiterplatteninspektion-#>, abgerufen am 29.11.2017
- [60] Kugler GmbH: Datenblatt Hartgold, <https://www.kugler-precision.com/index.php?Laserbeschichtungen-#>, abgerufen am 29.11.2017
- [61] Sill Optics GmbH & Co. KG: S4LFT3162/328 data sheet, http://www.siloptics.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Datasheet/S4LFT3162-328.pdf, abgerufen am 29.11.2017

Lebenslauf

Beruflicher Werdegang

Seit 08/2009	Wissenschaftlicher Mitarbeiter zur Promotion am Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT, Aachen Projektmanager und Entwicklungsingenieur mit den Themenschwerpunkten • Leiten und bearbeiten von Industrie- und Forschungsprojekten • Systemdesign und Aufbau von Laserbearbeitungsanlagen und -Modulen • Entwicklung von Sensorik und Sensormodulen zur Echtzeitüberwachung und Regelung von Laserprozessen inklusive Elektronik für die Signalaufbereitung und Kommunikation • Entwicklung eines Hochgeschwindigkeitslaserscansystems inkl. Steuerung und Benutzersoftware • Entwicklung und Programmierung von (Hochgeschwindigkeits-) Steuerungen für die Lasermaterialbearbeitung • Schreiben von Anträgen für neue Forschungsprojekte • Akquisition von neuen Industriekunden
--------------	--

Studium

Seit 08/2009	Promotion am Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT Polygonscannerbasierte Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laserstrukturierung Termin der mündlichen Prüfung: 25.09.2017
10/2005 – 05/2009	Hauptstudium Elektrotechnik und Informationstechnik an der TU Darmstadt Abschlussnote 2,1 Vertiefungsrichtung Mikro- und Feinwerktechnik am Institut für Elektromechanische Konstruktionen mit den Schwerpunkten Mikrotechnische Systeme, Sensorik und Lichttechnik
10/2008 – 04/2009	Diplomarbeit im Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt Note 1,7

Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung des thermischen Widerstandes und farbmeterischer Eigenschaften von Hochleistungs-LEDs im Pulsbetrieb

05/2008 – 08/2008 Studienarbeit im Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt
Note 1,7

Ermittlung der Sperrschichttemperatur von Hochleistungs-LEDs durch Messung der Vorwärtsspannung

10/2007 – 04/2008 Fachpraktikum in der Abteilung Engineering Quality der Adam Opel GmbH, Rüsselsheim

- Eigenständiges organisieren, durchführen und dokumentieren von Design Reviews
- Englischsprachige Präsentation der Ergebnisse in internationalen Telefonkonferenzen

10/2003 – 09/2005 Grundstudium Elektrotechnik und Informationstechnik an der TU Darmstadt
Vordiplom mit der Note 2,3

07/2004 – 09/2004 Technisches Grundpraktikum bei Omicron Laserage, Dudenhofen

Softwarekenntnisse

Office MS Office (Word, Excel, PowerPoint, Visio, Project)

PCB Design Pulsonix, Target 3001!, LTSpice

CAD Design Autodesk Inventor

Simulation Mathematica, Matlab/Simulink

Programmiersprachen C/C++, IEC 61131-3, LabView / LabView FPGA, Visual Applets

Bildbearbeitung Photoshop CS, Corel Photopaint, Mathematica, openCV

Sprachen und Fortbildungen

11/2017 Führungskräfte Intensivseminar (3-Tage), Center for Doctoral Studies, RWTH Aachen University

05/2017 CE-Kennzeichnung von Laseranlagen,
CE-Kompetenz, Fraunhofer ILT

09/2016	Leaders don't fall out of the sky: A review of your leadership competence, Center for Doctoral Studies, RWTH Aachen University
06/2016	Professionelles Verkaufen von Forschungsprojekten, Center for Doctoral Studies, RWTH Aachen University
04/2016	Programmierung, Inbetriebnahme und Diagnose des TwinCAT IEC 61131-3 Systems, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Moers
04/2013	Team- und Präsentationstraining Schwerpunkt Akquisition, PMD
03/2011	Projektmanagement Seminar, IMA/ZLW & IfU, RWTH Aachen University
06/2009	English for Executives Sprachkurs am St. Giles International College, Brighton
Deutsch	Muttersprache
Englisch	CEFR B2
Französisch	Schulkenntnisse (9 Jahre)

Zivildienst

09/2002 – 07/2003 Zivildienst am Bauhof der Gemeinde Messel

Schulausbildung

1993 – 2002 Justus-Liebig-Gymnasium, Darmstadt
Abitur mit der Abschlussnote 2,4

1989 – 1993 Ludwig-Glock-Grundschule, Messel

Sonstige Tätigkeiten

10/2000 – 04/2007 Alpin Laden Darmstadt, Darmstadt

- Führen der Skiwerkstatt nach DSV-Norm und
- Anlernen neuer Mitarbeiter
- Beratung und Verkauf

Hobbies

Sport (Badminton, Klettern, Fitness, Fussball, Snowboarden)
Fotografie

