

**Konturnahes Laserstrahlstrukturieren
für Kunststoffspritzgießwerkzeuge**

Johannes Mario Kordt

Konturnahes Laserstrahlstrukturieren für Kunststoffspritzgießwerkzeuge

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

vorgelegt von
Johannes Mario Kordt
aus Aachen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Peter Loosen
Tag der mündlichen Prüfung: 02. November 2007

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Gibt es etwa eine bessere Motivation als den Erfolg?

*Ion Tiriac – rumänischer Sportmanager (*1940)*

»für Super-Itz«

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Ich möchte mich bei allen Kollegen für die zahlreichen anregenden Diskussionen und Ratschläge sowie für die Hilfsbereitschaft und Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Fritz Klocke – Leiter des Fraunhofer IPT – für die Förderung der Dissertation, Herrn Professor Dr.rer.nat. Peter Loosen – stellvertretender Institutsleiter des Fraunhofer ILT – für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli – Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen – für die Leitung der Prüfungskommission.

Lampertheim, im November 2007

J. Mario Kordt

Inhaltsverzeichnis

Contents

0	Formelzeichen und Abkürzungen	III
1	Einleitung	1
2	Stand der Entwicklungen	5
2.1	Dekorierte Kunststoffbauteiloberflächen	5
2.1.1	Einsatzgebiete und Trends von Designoberflächen	5
2.1.2	Designentwicklungsprozess.....	8
2.1.3	Herstellungsverfahren von Oberflächendesignstrukturen.....	8
2.2	Direkte Herstellung durch Kunststoffspritzgießen	11
2.2.1	Verfahrensbeschreibung.....	11
2.2.2	Systembeschreibung: Formnest – Designstruktur – Formmasse	11
2.3	Fertigung von Designstrukturen in Spritzgießwerkzeugoberflächen	12
2.3.1	Strukturätzen	13
2.3.2	Funkenerosion	14
2.3.3	Galvanoformen	15
2.3.4	Spanen mit geometrischer bestimmter Schneide	16
2.3.5	Verfahrensvergleich und -bewertung	18
2.4	Laserstrahlstrukturieren.....	18
2.4.1	Einordnung des Verfahrens in die Fertigungstechnologie	18
2.4.2	Laserstrahlabtragmechanismen und deren Einsatzgebiete.....	20
2.4.3	Laserstrahlabtragen im Werkzeug- und Formenbau	24
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4	Gestaltung der Prozesskette und der Kernstrategie	30
4.1	Systematik der Prozesskettengestaltung	30
4.2	Modellierung der Prozesskette.....	31
4.3	Kernstrategie: 3D-Segment-Prozess.....	33
5	Laserstrahlstrukturieranlage	35
5.1	Auswahl der Handhabungsanlage	35
5.2	Aufbau und Integration des Lasermoduls in die Handhabungsanlage	36
5.3	Inbetriebnahme und Untersuchung der Anlagenparameter	39
5.3.1	Handhabungssystem, Lasermodul und Steuerung.....	39
5.3.2	Laserstrahlquelle und deren Betriebspunkte	43
5.4	Fazit	49
6	CAX-System: Design-Erstellung, Datenaufbereitung und Steuerungseinheit	51
6.1	Entwicklung von Designstrukturen	51
6.1.1	Messtechnische Datenaufnahme anhand von Referenzstrukturen	51
6.1.2	Direkte Strukturentwicklung durch CAD.....	56
6.1.3	Digitale Kachelung von Designstrukturen	56

6.2	Aufbringung dreidimensionaler Designstrukturen auf Oberflächen	58
6.2.1	Digitale Übertragung von Designstrukturen auf Oberflächen	58
6.2.2	Segmentierung der Oberfläche: Splitter.....	59
6.3	Steuerungssystem und Generierung von NC-Bearbeitungsdaten.....	61
6.3.1	Steuerungsverknüpfung: Mikron (iTNC 530) – Lasermodul (RTC3).....	61
6.3.2	NC-Datengenerierung: Global-Toolpath	64
6.3.3	NC-Datengenerierung: Segment-Toolpath	65
6.3.4	Softwaremodul für die Steuerungsschnittstelle und zur Überführung von Segment-ISO-NC-Daten in Lasermodulsteuerungskommandos: Scanner-Back-End.....	69
6.4	Fazit	72
7	Laserstrahlstrukturiertechnologie	74
7.1	Versuchsdurchführung	74
7.1.1	Versuchsplanung und wesentliche Einflussgrößen beim Laserstrahlstrukturieren	74
7.1.2	Auswahl von Testwerkstoffen, -oberflächen und -strukturen.....	75
7.1.3	Mess- und Auswertungssysteme	75
7.2	Theoretische Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren	76
7.3	Praktische Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren	80
7.3.1	Einzelpulsabtrag (eindimensional): Näpfchen.....	80
7.3.2	Überlapppulsabtrag (zweidimensional): Gräben.....	89
7.3.3	Schichtabtrag (dreidimensional): Quader	92
7.3.4	Metallurgische Betrachtung der abgetragenen Oberflächenrandzone	99
7.3.5	Definierte Laser-Tools in Prozess- und Technologiedatenbank	101
7.4	Übertragung der Bearbeitungsparameter auf großflächige Oberflächen... ..	102
7.4.1	Komplexe 3D-Strukturen aus Einzelschichten: Abbildungsgenauigkeit....	102
7.4.2	Strukturkachelung auf ebenen und gewölbten Oberflächen	107
7.4.3	Entfernung von Abtragrückständen	112
7.5	Fazit	113
8	Pilotanwendungen.....	115
8.1	Pilotbauteil 1: Musterplatte mit Strukturklasse III.....	115
8.1.1	Anwendung der entwickelten Prozesskette	115
8.1.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	117
8.2	Pilotbauteil 2: Musterplatte mit Strukturklasse II.....	119
8.3	Abformung von Teststrukturen	120
8.4	Übertragung der Prozesskette auf andere Anwendungen	122
8.4.1	Tribologisch wirksame Strukturen: Innenzahnradpumpe	122
8.4.2	Mikroreaktionstechnik: Keramisches Funktionsmodul	123
8.4.3	Aerostatisch wirksame Strukturen: Gleitringdichtung	124
8.5	Fazit	125
9	Zusammenfassung und Ausblick	126
10	Literatur	130
11	Anhang	138

0 Formelzeichen und Abkürzungen

Symbols and abbreviations

Formelzeichen	Beschreibung
griechisch	
α_k	Absorptionskoeffizient
γ	Abtragwinkel
δ_{opt}	optische Eindringtiefe
δ_w	thermische Eindringtiefe
$\Delta\tilde{n}$	Winkelabweichung zwischen Strahlaustrittsvektor und Flächennormalenvektor \tilde{n}
$\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$	Grenzwert der Winkelabweichung zwischen Strahlaustrittsvektor und Flächennormalenvektor \tilde{n}
$\Delta z'$	Fokusschift entlang der z'-Achse bzw. der dynamischen Fokussiereinheit (VarioScan 40)
$\Delta'z'$	angepasster Fokusschift entlang der z'-Achse bzw. der dynamischen Fokussiereinheit (VarioScan 40)
η_s	Verzerrungswinkel des Scanners
κ	Absorptionsindex
λ	Wellenlänge
λ_w	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte
τ_e	Elektronenabkühlzeit
τ_i	Gitterheizzeit
τ_P	Pulslänge des Laserstrahls
φ	Strahlaustrittswinkel aus Scanneroptik bezogen auf Scannerlot
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Verdrehwinkel des Segmentkoordinatensystems zum Maschinen- bzw. Werkstückkoordinatensystem
$\phi_1; \phi_2$	Scanwinkel des Scannerspiegels 1; 2
χ	Temperaturleitfähigkeit
ψ	Entformungswinkel bzw. Entformungsschräge
lateinisch groß	
A	Absorption
\tilde{A}	bidirektionale Positioniergenauigkeit
Az'	Arbeitsbereich des Scanners entlang z'
A'z'	angepasster Arbeitsbereich des Scanners entlang z'
A _{Fokus}	projizierte Fläche des Fokus auf der Oberfläche
A _{Laser}	Fokusarbeitsabstand zur Optik
A _S	Arbeitsfeldgröße
A _{TEM00}	Arbeitsbereich, bei dem noch nahezu TEM ₀₀ bzw. gaußscher Strahl-Mode (Grund-Mode) vorliegt
B	rotatorische Schwenkachse des Handhabungssystems
\underline{B}	Umkehrspiel
C	rotatorische Drehachse des Handhabungssystems
H	Hatch (Abstand der Laserbahnen)
H _S	Schmelzenthalpie
H _V	Verdampfungsenthalpie
I	Laserstrahlintensität
I _A	Pumpstrom der Laserstrahlquelle
I _{Abs}	absorbierte, mittlere Laserstrahlintensität
I _{M,Laser}	mittlere Laserstrahlintensität
I _S	Kantenlänge des Scanner-Segments
I _{Schwell,S}	absorbierte, mittlere Schwellintensität für Schmelzen
I _{Schwell,V}	absorbierte, mittlere Schwellintensität für Verdampfen

$I_{\text{Schwell,V-A}}$	absorbierte, mittlere Plasmaabschirmschwellintensität
K	Kalibrierungsfaktor des Scanners
K_{INV}	Investitionsaufwand für die Laserstrahlstrukturieranlage
LPS_V	Laser-Pump-Strom-Vorgabe
LTS	Laser-Trigger-Signal
M	mittlere, uni- und bidirektionale Positionsabweichung
M^2	Strahlqualität
P	Positionierungsgenauigkeit
P_D	Dauerleistung der Laserstrahlquelle
$P_{G(3)}$	dreiachsige Positionierungsgenauigkeit
$P_{G(5)}$	fünfachsiges Positionierungsgenauigkeit
P_{Puls}	Pulsspitzenleistung
Q_F	Personalstundensatz für Facharbeiter nach BMWi
Q_I	Personalstundensatz für Ingenieur (FH) oder Techniker/Meister nach BMWi
R	Reflexion
$R\uparrow / R\downarrow$	unidirektionale Positionierungswiederholungsgenauigkeit
R_a	arithmetischer Mittenrauwert
R_D	diffuse Reflexion
R_G	gerichtete Reflexion
R_K	Kernrautiefe
R_t	maximale Höhe zwischen Spitze und Tal des Profils innerhalb der Messstrecke
R_z	gemittelte Rautiefe
S	Pulsabstand
SA	Schrittzahl der Galvanoscannerspiegel
T	Transmission
T_0	Temperatur
TCP	Tool Center Point = Werkzeugbezugspunkt in der Spindelachse (Vektor in X, Y, Z)
TCP'	Tool Center Point = Lage des Laserfokus in Scannermittelstellung (Vektor in X, Y, Z)
T_e	Elektronentemperatur
T_i	Gittertemperatur
T_S	Schmelztemperatur
T_V	Verdampfungstemperatur
V	Abtragsvolumen
V_{Abtrag}	Abtragsvolumenrate
V_s	Scannerbearbeitungsvolumen
X, Y und Z	translatorische Achse des Handhabungssystems
Z_{Ref}	Position der Z-Achse im Absolut-Messsystem der Mikron HSM 600U

lateinisch klein

a_e	seitliche Zustellung
a_p	Schnitttiefe
c	spezifische Wärmekapazität
d_0	Laserstrahldurchmesser auf der Oberfläche
d_{Abtrag}	Durchmesser des Laserabtrags
d_{Apt}	Strahleintrittsapertur des Scanners
d_f	Laserstrahldurchmesser im Fokus
d_{Roh}	Rohstrahldurchmesser des Laserstrahls
d_{SK}	Durchmesser des Schmelzrands auf der Oberfläche
d_{WEZ}	oberflächiger Durchmesser der WEZ
	Strahlaustrittsvektor
f	Brennweite der Laseroptik

f_p	Pulsfrequenz des Laserstrahls
h_s	Scannerfeldhöhe
h_{Schmelz}	Schmelzrandhöhe
n	Bahnabstand
\vec{n}	Flächennormalenvektor
r_f	Laserstrahlradius im Fokus
$r_{\text{min,theo}}$	theoretischer, minimal bearbeitbarer Krümmungsradius einer Fläche innerhalb des Scannersegments
$r_{\text{min,real}}$	realer, minimal bearbeitbarer Krümmungsradius einer Fläche innerhalb des Scannersegments
rms	Root Mean Square Error bzw. mittlere quadratische Abweichung
s	Schichtdicke
s_{Schmelz}	Schmelzfilmdicke
t	Zeit
t_{Abtrag}	Tiefe des Laserabtrags
$t_{\text{Abtrag,max}}$	maximale Tiefe des Laserabtrags
t_{Ein}	Einschaltdauer der Laserstrahlquelle für Betriebsbereitschaft
t_s	Einschwingdauer der Laserstrahlquelle
t_{ww}	Wechselwirkungszeit
v_B	Schmelzfrontgeschwindigkeit
v_f	Vorschub der Scannerachsen
v_{Jump}	Sprunggeschwindigkeit der Scannerspiegel
x', y'	translatorische Achse des Galvano-Scanners (HurryScan 25)
x', y', z' -gain	Gain-Faktoren der Scannerachsen
z'	translatorische Achse der dynamischen Fokussiereinheit (VarioScan 40)
z_R	Rayleighlänge: Abstand von d_f bei dem der Strahldurchmesser um $\sqrt{2}$ aufgeweitet ist

Abkürzungen	Beschreibung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat bzw. amorpher Thermoplast
ASC	Text-Datei im ASCII Zeichencode: z. B. Triple-Punktewolke (x-, y-, z-Koordinaten)
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BMP	Windows Bitmap File Format: zweidimensionales Rastergraphikdatenformat zur Bildspeicherung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAD	Computer-Aided-Design
CAM	Computer-Aided-Manufacturing
CAX	Computer-Aided-Technologies
CNC	Computerized Numerical Control
CTZ	chemisch-thermisch veränderte Zone
CVD	Chemical Vapor Deposition bzw. chemische Gasphasenabscheidung
cw	Continuous Wave bzw. kontinuierliche Laserstrahlung
DIN	Deutsche Industrie Norm
DPI	Dots per Inch
DT	Direct Texturing
dxf	Datenformat: Drawing Interchange Format
EDM	Electrical Discharge Machining bzw. Funkenerosion
EDX	Energy Dispersive X-ray Analysis bzw. energiedispersive Röntgenspektroskopie
fs	Femto-Sekunde: 10^{-15} s
F&E	Forschung und Entwicklung
FRT	Dateiformat: Haupt-Arbeitsformat der Mark III Software der Firma FRT GmbH
GUI	Graphik User Interface bzw. graphisches Benutzerpanel in einer Software
HIZ	Heat Influence Zone (WEZ)
HM	Martens-Härtemessung
HMI	Human Machine Interface

hpgl	Datenformat: Vektor-Graphic-Plotter-Dateien
HSC	High Speed Cutting bzw. Hochgeschwindigkeitsfräsen
HSK	Hohlschaftkegel
HV	Vickershärte
I/O	Input-/Output-Interface
iges	Datenformat: Initial Graphics Exchange Specification
IPT	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie Aachen
ISO	Internationale Organisation für Normung
JPG	Komprimiertes Bilddatenformat nach Joint Photographic Experts Group Standard
NC	Numeric Control
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall-Laser
Nd:YVO ₄	Neodym-dotierter Yttrium-Vanadate-Kristall-Laser
ns	Nano-Sekunde: 10 ⁻⁹ s
PC	Personal Computer
plt	Datenformat: Vektor Graphic Plotter Dateien
PP	Post-Prozessor
ps	Piko-Sekunde: 10 ⁻¹² s
PVD	Physical Vapour Deposition bzw. physikalische Gasphasenabscheidung
REM	Rasterelektronenmikroskop
SDF	Surface Data File Format
SEZ	Schockeinflusszone
SFB	Sonderforschungsbereich
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STL	Stereolithography Language (Dreiecksnetz) – Datenformat
TIF	Tagged Image File Format: universelles Pixelbild-Datenformat zur Speicherung von Bilddaten
UP	Ultrapräzision
WEZ	Wärmeeinflusszone
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

»Design is increasingly important to the competitive edge of 50 % of manufacturers«
[DESI04].

Kunststoffprodukte bestimmen unseren Konsumalltag. Dies lässt sich zwar auch mit den hervorragend modifizierbaren Materialeigenschaften, mit der hohen Geometrie-, Form- und Funktionalitätsvielfalt sowie mit dem geringen Gewicht des Konstruktionswerkstoffs Kunststoff begründen, vor allem aber lässt es sich auf die automatisierte, äußerst flexible Massenherstellung zurückführen. Die Einsatzgebiete von Kunststoffprodukten sind vielseitig, sie reichen vom ansprechenden Spielzeug bis hin zum Hightechprodukt in der automobilen Anwendung [ERHA99, S. 4-20], [AUTO04b]. Bereits 8 % des in Deutschland eingesetzten Kunststoffs wird in der Automobilindustrie verwendet [SIMO04, S. 30]. Mehr als 15 Gewichtsprozent eines Autos bestehen dabei bereits aus Kunststoff. Dabei sind die Hälfte der Bauteile (bis zu 1.000) im Innenraum anzutreffen [MICH98], [AUTO04f]. Heute und in Zukunft bilden Kunststoffe den Innovationsmotor im Automobilbau [VOLL04], [BACH05, S. 85].

Aufgrund der stetig steigenden und wechselnden Kundenanforderungen bestehen in der Konsumgüterindustrie, insbesondere im Automobilbau und in der Kommunikationsindustrie, hohe Produktanforderungen an die Haptik und Optik von Kunststoffbauteilen. Die Gestaltung der Oberfläche ist dabei ein entscheidendes Kriterium für die Funktionalität sowie für den Qualitätseindruck und somit auch für die Marktakzeptanz des gesamten Produkts. Man spricht in diesem Zusammenhang von dekorativen Bauteiloberflächen [EBEL03], [WIRT03].

Es besteht zunehmend die Bearbeitungsaufgabe, Kunststoffbauteiloberflächen mit ansprechenden Dekoren bzw. Designstrukturen zu versehen. Als Beispiel sind dazu lederähnliche oder technische Narbungen im Interieurbereich von Automobilen zu nennen [MANG03]. Zur industriellen Herstellung von Oberflächendesignstrukturen können unterschiedliche Fertigungsverfahren angesetzt werden: Offline-, Online- und Direkt-Verfahren. Dem direkten Herstellungsverfahren Spritzgießen kommt aufgrund seiner wirtschaftlichen und technologischen Prozessvorteile die größte fertigungstechnische Bedeutung zu. Bei diesem Urformverfahren kann durch besondere Werkzeugauslegung die Herstellung einer einsatzfähigen, dekorativen Oberfläche gleichzeitig mit der Bauteilformgebung des Produkts realisiert werden. Dazu wird die Werkzeugoberfläche gezielt mit Strukturen versehen, wobei die Gestalt dieser abformenden Strukturen dem negativen Abbild der geforderten Designstrukturen entspricht. Die herstellbare Gestalt bzw. Komplexität der Designstruktur wird daher maßgeblich bestimmt durch die produktionstechnologischen Eigenschaften der eingesetzten Fertigungstechnologie zur Herstellung der abformenden Negativ-Strukturen [MENG99, S. 39-94]. Verfahren wie die Ätztechnik oder die Herstellung mittels Belederungsmodell und galvanischem Abformen weisen im Vergleich zur Spritzgießtechnologie eine geringe Flexibilität sowie lange Produktionszeiten und hohe Kosten auf. Eine Herstellung durch ätztechnisches Abtragen liefert außerdem eine stochastische Oberflächenstruktur, die nur unzureichend reproduzierbar ist. Der derzeitige Zeitaufwand für die Herstellung eines Automobil-Cockpit-Werkzeugs mittels Belederungsmodell beläuft sich auf mehrere Monate.

Designabteilungen entwickeln zur optischen Produktdifferenzierung und somit zur Steigerung des Produktabsatzes fortwährend neue Oberflächendesigns. Diese werden durch eine zunehmende Komplexität bestimmt, die durch eine intensivere produkt- und einsatzspezifische Gestaltung der Strukturen und durch die Forderung nach zusätzlichen technologischen Eigenschaften, wie z. B. partielle Entformbarkeit oder Verschmutzungsresistenz gekennzeichnet sind. Die abbildungsgenaue Herstellung der entsprechenden Negativ-Strukturen in die Werkzeugoberfläche ist mit den verfügbaren Prozessen nur mit unwirtschaftlich hohem Aufwand möglich. Daher sind neue, komplexere Strukturen kaum am Markt zu finden. Um diese neue Bearbeitungsaufgabe zukünftig erfüllen zu können, müssen dem Werkzeug- und Formenbau neuartige Oberflächenstrukturierungsverfahren zur Verfügung gestellt werden. Erhöhte Abbildungsgenauigkeit, Flexibilität und Reproduzierbarkeit sowie Reduzierung von Zeit- und Kos-

tenanteilen müssen bei der Entwicklung im Vordergrund stehen. Die Forderung nach derartigen Technologien wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die Branche des Werkzeug- und Formenbaus mit der Bereitstellung der Betriebsmittel eine Schlüsselstellung in der industriellen Wertschöpfungskette einnimmt. Die Zeit bis zur Markteinführung eines Produkts wird dabei bis zu 25 % von der Konstruktion und Fertigung der Werkzeugformen bestimmt. Die Kosten für Betriebsmittel, in denen auch die Herstellungskosten der Spritzgießwerkzeuge enthalten sind, können bis zu 30 % der gesamten Produktionskosten ausmachen [EVER98], [GROS04].

Ein neuartiges Verfahren zur Herstellung von definierten Strukturen in Oberflächen ist das Laserstrahlabtragen. Es weist beachtliche Fertigungspotenziale für die betrachtete Bearbeitungsaufgabe auf. Aufgrund der hohen Bearbeitungsflexibilität und -genauigkeit, der Möglichkeit der partiellen Bearbeitung sowie des äußerst großen Werkstoffspektrums wird das Verfahren bereits für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt [POPR05a, S. 309-313].

Im Werkzeug- und Formenbau wird das Laserstrahlabtragen zur Herstellung von Kleinst-Gravuren und für Beschriftungen oder Markierungen in Spritzgießwerkzeugen genutzt, wobei es in Konkurrenz zum Mikroerodieren und zum Mikrofräsen steht. Mit den am Markt verfügbaren Laserabtragmaschinen werden überwiegend 2 ½-D-Bearbeitungen durchgeführt und Strukturgrößen deutlich größer als 100 µm hergestellt. Eine konturnahe Bearbeitung von großflächigen Freiform-Bauteiloberflächen mit filigranen und komplexen Strukturen ist derzeit nicht realisiert, weil die am Markt verfügbare Laserstrahltechnologie den komplexen Anforderungen einer Designstrukturherstellung nur bedingt genügt. Es bestehen noch akute Forschungsbedarfe hinsichtlich des Prozesswissens und der Anlagentechnik [SCH104], [KUHL04], [KRAC02], [WAGN03]. Für tribologisch belastete, hydraulische Bauteile liegen erste Erfahrungen mit einer großflächigen Strukturherstellung mittels Laserstrahlabtragen vor: Dabei werden in rotationssymmetrischen Oberflächen regelmäßig verteilte Mikro-Schmieraschen eingebracht. Makroskopisch gesehen ist dies ein Oberflächendesign mit einer technologischen Funktion zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß [HOPP05], [KLOC04b], [KORD03]. Eine breite industrielle Nutzung dieser Technologie erfolgt jedoch noch nicht. Dies ist auf die unzureichende Entwicklung der Prozesstechnologie hinsichtlich eines reproduzierbaren und robusten Laserabtrags zurückzuführen. Weiterhin sind die für eine Serienproduktion notwendigen kurzen Bearbeitungszeiten und hohen Bearbeitungsqualitäten noch nicht ausreichend sichergestellt.

Die beiden aufgezeigten Anwendungen verdeutlichen das fertigungstechnische Potenzial, aber auch die bestehenden Entwicklungsbedarfe des Laserstrahlabtrags zur Herstellung von großflächigen Oberflächenstrukturen. Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand von prozesstechnologischen Untersuchungen eine neue Prozesskette erarbeitet werden, mit der – durch konturnahes Laserstrahlabtragen – eine flexible und abbildungsgenaue Herstellung von abformenden Strukturen in Spritzgießwerkzeugoberflächen möglich ist. Dabei soll der Entwicklungsfokus nicht nur auf den eigentlichen Laserstrahlprozess gelegt werden, sondern auch auf eine durchgängige CAx-Kette und auf eine Integration der gesamten Systemtechnologie in einen Maschinenprototyp. Die Gestaltung der Prozesskette erfordert im Vorfeld eine Definition der Anforderungen unter Berücksichtigung des Stands der technologischen Entwicklungen. Anhand der Anforderungen wird dann die Prozesskette zur Erzeugung von Designstrukturen in Oberflächen entwickelt, wobei diese in drei Systemmodule untergliedert wird: Laserstrahlstrukturieranlage, CAx-System und Laserstrahlstrukturiertechnologie. Die physikalischen Mechanismen des Laserstrahlabtrags werden definiert, um dann als Grundlage für die Erarbeitung der relevanten Prozessparameter und deren Zusammenhänge zu dienen. Pilotanwendungen sollen schließlich Verfahrensmöglichkeiten und -grenzen aufzeigen, um die Voraussetzung für eine möglichst breite industrielle Umsetzung zu schaffen.

1 Introduction

»Design is increasingly important to the competitive edge of 50 % of manufacturers« [DESI04].

It is hard to imagine our modern consumer world without plastic products. This, in part, is due to the fact that plastics have excellent modifiable material properties, that they can be used for an extremely diverse range of geometries, shapes and functions and that they are very light-weight, but is mainly due to the fact that this material is highly suited to automated mass production processes. Plastic products are highly versatile and used in products ranging from eye-catching toys to high-tech automotive elements [ERHA99, S. 4-20], [AUTO04b]. In Germany up to 8 % of the plastics are used in the automotive industry [SIMO04, S. 30]. More than 15 % of the weight of a car consists of plastic materials. Half of these plastic parts (up to 1.000) are located in the interior [MICH98], [AUTO04f]. Plastic is the innovator of the automotive industry today and in the future [VOLL04], [BACH05, S. 85].

The consumer goods industry, particularly the automotive and communications industries, are marked by continuously increasing and changing customer demands in terms of how plastic components should look and feel. The design of a surface is a decisive criteria in terms of functionality and mold quality and, ultimately, market acceptance of the entire product. In this context, one refers to 'decorative component surfaces' [EBEL03], [WIRT03].

There is an increasing need to be able to produce plastic component surfaces with eye-catching decorative structures – take, for example, the imitation leather or technical texturing in car interiors [MANG03]. Various techniques can be used to produce these surface design structures: either offline, online or direct processes. Injection molding is the most relevant of the direct manufacturing techniques in terms of its economic and technological advantages. The use of specialized injection molding tool designs means that functional, decorative structures can be introduced onto the surfaces at the same time as the component itself is being formed. The tool surface is equipped with specific molding structures that represent the negative image of the final design structure. The complexity of the final design structure is therefore mainly dependent on the properties of the manufacturing technologies used to produce the negative molding structures [MENG99, S. 39-94]. Production processes such as etching or processes involving leather models and galvanic molding are less flexible, take longer and are more expensive than injection molding technology. Surfaces produced, for example, via etching have a stochastic surface structure that is not sufficiently reproducible, and it currently takes several months to produce an automobile cockpit tool using a leather model.

Design departments are constantly developing new surface designs in order to differentiate their products optically from the competition and thus increase product sales. These surface designs are increasingly complex, requiring more intensive design of the product itself and its application-related structures. They also require the use of additional technological properties such as partial moldability or resistance to soiling. The near net production of suitable negative structures on tool surfaces using current processes is extremely costly. New, complex structures are therefore rarely seen in the consumer market. In order to be able to meet consumer demand in the future, the tool and die making industry will need innovative surface structuring processes. Any developments in this field must focus on increasing processing precision, flexibility and reproducibility as well as on reducing manufacturing times and costs. The need for such technologies is also underlined by the fact that the tool and die making industry plays a key role in the industrial value creation chain as a provider of operational materials, as the following figures demonstrate. Tool design and manufacturing account for up to 25% of a product's time-to-market. The cost of operational materials, including the cost of producing the injection molds themselves, can account for up to 30 % of the total production costs [EVER98], [GROS04].

Laser beam structuring, or laser material removal, is an innovative means of producing defined surface structures. This process has a great deal of potential as far as the aforementioned structuring task is concerned. High processing flexibility and precision, the partial processing options and the extremely wide range of materials to which it can be applied mean that laser beam structuring is already being used in various applications [*POPR05a*, S. 309-313].

In the tool and die making industry, laser material removal is currently used to produce micro-engravings and introduce inscriptions or markings into injection molding tools. This technology has to compete with micro-erosion and micro-milling. The laser material removal machines currently available on the market are mainly used to perform 2½ dimensional processing activities for structures significantly larger than 100 µm. The current laser technology is not yet fully capable of near net processing large freeform component surfaces with intricate and complex structures. Research into processing and equipment is urgently needed in order to make progress in this area [*SCHI04*], [*KUHL04*], [*KRAC02*], [*WAGN03*]. The first findings are beginning to emerge in terms of laser material removal processes for the introduction of large surface structures into hydraulic components subject to tribological loads. In this case, micro lubrication bore reliefs have been distributed evenly across the surface of rotationally symmetrical surfaces. From a macroscopic point of view, this surface design incorporates a technological function to reduce friction and wear [*HOPP05*], [*KLOC04b*], [*KORD03*]. This technology is, however, not yet ready for wider industrial use, due to the fact that the process technology is not yet mature enough for reproducible and stable laser material removal. The processing times are also not short enough to meet the demands of mass production, while the processing quality is not yet high enough.

Both of the applications described here demonstrate the potential of laser beam structuring in terms of manufacturing technology, but also the deficits of the process in terms of its ability to produce large surface structures. A new, comprehensive manufacturing process with which to produce flexible and precise molding structures on the surface of injection molds will be developed over the course of this work and the accompanying manufacturing technology investigations based on near net laser beam structuring will be carried out. Development activities will not only focus on the laser process itself but also on the CAx processes needed for the entire manufacturing line, and on integrating the system technology into a prototype machine. The requirements must be defined before beginning with the development of a comprehensive manufacturing process, taking technological developments into account. The manufacturing process with which to introduce design structures into surfaces will then be developed on the basis of these requirements. This process will be split into three system modules: the laser beam structuring plant, the CAx system and the laser beam structuring technology itself. The physical mechanisms of laser beam structuring will be defined and then used to develop the relevant process parameters and correlations. Pilot applications will be used to examine the potential and the limitations of this process, providing the basis needed for wider industrial implementation.

2 Stand der Entwicklungen

State of the art

Es wird ein Überblick über Designstrukturrends gegeben, um die Bedarfe der Industrie bei der Design-Erstellung aufzeigen zu können. Weiterhin werden Besonderheiten des Designentwicklungsprozesses in der Automobilbranche dargestellt, aus denen sich zusätzliche Anforderungen ergeben. Im Anschluss daran erfolgt eine Vorstellung der derzeit industriell verfügbaren Herstellungsverfahren dekorierte Kunststoffbauteile, die hinsichtlich ihrer Fertigungspotenziale für die neuartigen Oberflächendesigns bewertet werden. Darauf aufbauend werden zum einen die grundlegenden technologischen Anforderungen des Spritzgießwerkzeugbaus an abformbare Designstrukturen und zum anderen die derzeit wichtigsten, industriell eingesetzten Fertigungsprozesse zur Herstellung von Designstrukturen in Spritzgießwerkzeugoberflächen beschrieben. Es folgt die Einordnung des Laserstrahlabtrags in die Fertigungstechnologie und eine Begriffsabgrenzung des Laserstrahlstrukturierens. Der Stand der technologischen Entwicklung des Laserstrahlabtrags wird dargestellt, um auf dessen Grundlage die nötigen Entwicklungen für einen Einsatz erarbeiten zu können. Hierfür werden die verfügbaren Abtragmechanismen und deren Einsatzgebiete erläutert. Weiterhin wird der am Markt verfügbare Entwicklungsstand von entsprechenden Laserstrahlabtraganlagen vorgestellt.

2.1 Dekorierte Kunststoffbauteiloberflächen

Decorated surfaces of plastic parts

2.1.1 Einsatzgebiete und Trends von Designoberflächen

Fields of application and trends of design surfaces

»Erst vor wenigen Jahren ist der [Automobil-]Branche bewusst geworden, wie wichtig das Interieurdesign ist« [AUTO04a].

Kaum ein Wort ist in den letzten Jahrzehnten so populär geworden wie das Wort »Design«. Design (designare (lat.) = (be)zeichnen) ist der bewusste Einsatz von Gestaltungsmitteln, um ein bestimmtes Ziel am Produkt bzw. beim Nutzer zu erreichen. Jedes Designobjekt hat drei grundlegende Eigenschaften: einen funktionellen Zweck, eine materielle Substanz und eine visuell wahrnehmbare Form. Wer mit Produkten wirtschaftlich erfolgreich sein will, muss den Menschen mit seinen vielfältigen sensorischen Empfindungen in den Mittelpunkt der komplexen Designentwicklung stellen [MEYE05a], [DESI05]. Nach Dieter Rams existieren zehn Leitsätze für hervorragendes Design [RAMS95]:

1. Es ist innovativ bzw. neu.
2. Es macht ein Produkt brauchbar.
3. Es ist ästhetisch (schön, geschmackvoll).
4. Es macht ein Produkt verständlich.
5. Es ist unaufdringlich.
6. Es ist ehrlich.
7. Es ist langlebig.
8. Es ist umweltfreundlich.
9. Es ist möglichst wenig Design.
10. Es ist konsequent bis in die Details.

Industriedesign beschäftigt sich mit dem Ablauf des Designprozesses, der mit der Produktidee beginnt, mit der virtuellen Herstellung am Computer fortgesetzt wird und über die Entwicklung eines Prototyps bis hin zur Serienfertigung reicht [ERLH95]. Innerhalb des technischen Industriedesigns ist die Oberflächengestaltung ein wesentlicher Schwerpunkt. Die Oberfläche kann über ihre spezifische Gestaltung die technologische Funktion des gesamten Bauteils maßgeblich bestimmen und dessen äußeres Erscheinungsbild wesentlich prägen [EICH04].

»Das Exterieur ist die Liebe auf den ersten Blick. Das Interieur ist die Ehe« [AUTO04g].

Wie kein anderes Element am Fahrzeug kann das Interieur-Design Innovation, Qualität und Ergonomie, aber auch Geborgenheit, Sicherheitsgefühl und Bequemlichkeit vermitteln und beeinflusst damit immer mehr das Kaufverhalten der Kunden [AUTO04e]. Dabei müssen Optik und Haptik – zwei der maßgeblichen Faktoren der menschlichen Sinneswahrnehmung – überzeugend sein. Die Funktionalität und Langlebigkeit des Produkts wird dabei oft als selbstverständlich vorausgesetzt. Kompromisse im Design können jedoch zum Verlust des spezifi-

schen Images führen. Die Konsequenz sind sinkende Marktanteile [SIEL03], [MITZ04, S. 180], [LAMP99, S. 141], [RAU03, S. 237-239], [RÜDI05]. Bild 2-1 verdeutlicht die wichtigsten oberflächenrelevanten Anforderungen an das Automobilinterieur.

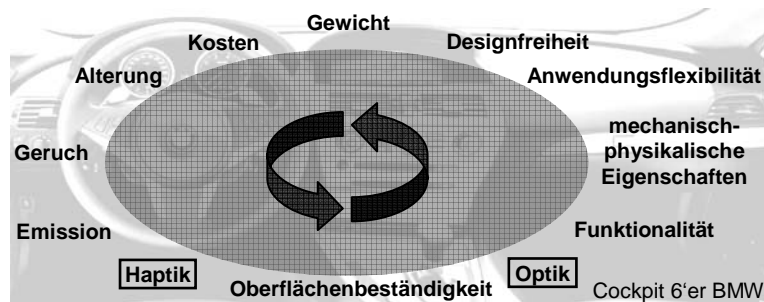


Bild 2-1: Anforderungen an die Oberflächen des Automobilinterieurs [RAU03, S. 238], [RÜDI05], [BACH05, S. 90]

Requirements of the surfaces of the automotive interior

Optik ist ein subjektives Merkmal und lässt sich daher nur schwer messtechnisch definieren. Sie kann als die Wiedergabe der Geometrie und der Oberflächenstruktur bzw. als die visuelle Wirkung auf den Betrachter beschrieben werden. Grundsätzlich ist auch die Haptik ein subjektives Merkmal. Um eine technische Herangehensweise zu ermöglichen, wird zwischen Druck- und Berührhaptik unterschieden. Unter Druckhaptik wird die empfundene Weichheit beim Drücken auf die Oberfläche verstanden, welche über einen Druckversuch im Kraft-Weg-Diagramm messbar ist. Berührhaptik stellt das beim Überstreichen der Oberfläche wahrgenommene Gefühl in den Fingerkuppen dar, welches z. B. über die Bestimmung der Mikroreibung gemessen werden kann [RAU03, S. 240, S. 253], [INNO03], [BACH05, S. 85-90].



Bild 2-2: Typische Interieur-Trim-Bauteile [DANN04, S. 2]

Typical interior Trim-parts

Die stilistisch bestimmenden Innenraumbauteile eines PKW sind die Verkleidungen und das Armaturenbrett, so genannte Trim-Bauteile (Bild 2-2) [KAST03], [AUTO04h]. Diese Bauteile nehmen einen überdurchschnittlichen Stellenwert in der Automobilproduktion ein. Im Jahr 2002 wurden weltweit rund 120 Milliarden Euro mit Fahrzeuginnenausstattungen umgesetzt. Gut ein Fünftel davon entfällt auf Trim-Bauteile, wobei die Oberflächenveredelung im Mittelpunkt steht [AUTO04c], [DANN04, S. 3-5], [OHLI01].

Aufgrund der Wettbewerbssituation ist das »Design von morgen« stark geschütztes Firmengut, so dass im Folgenden nur Trends vorgestellt werden können. Eine objektive Beurteilung der Trends erfordert eine differenzierte Betrachtung der Fahrzeugsegmente und steht daher in Bezug zu den tolerierbaren Bauteilkosten. Im Premium- und im Oberklassensegment werden überwiegend natürliche Oberflächen wie Leder, Metalle oder Holz eingesetzt. Instrumententafeln, Lenkräder oder Verkleidungen bestehen bei Premiummodellen bereits bis zu 60 % aus Leder [MANG03], [EBEL03, S. 6], [HEND04], [FRAN98], [HAGG98], [LAMP99, S. 148-155], [AUTO05c, S. 49]. Zur Kostensenkung werden zunehmend synthetische Formhäute mit Lederoptik, so genannte Slushhäute, für die Konfektionierung von Oberflächen eingesetzt (Beleuchtungsprozess) [KIEI04]. Um neben Luxus auch Dynamik und Sportlichkeit im Innenraum verkörpern zu können, werden gezielt technische Strukturen genutzt [MEYE05c]. Das Mittel- und das Kleinwagensegment werden intensiver vom Balanceakt zwischen trendigem Design,

Funktionalität, Komfort und wirtschaftlicher Produktion bestimmt. Die Umsetzung der zukünftigen Designs wird daher maßgeblich vom eingesetzten Fertigungsverfahren bestimmt. Was früher ausschließlich dem Premium- und Oberklassensegment vorbehalten war, soll nun auch im Mittel- und Kleinwagensegment zum Standard werden [SINK04], [AUTO04d], [AUTO04e], [MITZ04, S. 180-186], [KOCH03].

Darüber hinaus übernehmen Trägermaterialien neue, für den Endkunden nicht wahrnehmbare, Funktionen. Im Hinblick auf die Optik stellt eine unsichtbare Airbag-Integration eine Herausforderung für den Strukturhersteller dar [KERK02].

Unabhängig vom betrachteten Fahrzeugsegment kennzeichnen insbesondere Individualisierung, Differenzierung, hochwertige Anmutung und Harmonie das Interieur der Zukunft und somit die Gestaltung von Trim-Bauteilen. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über aktuelle und zukünftige Anforderungen an Oberflächen von Interieur-Bauteilen (Tabelle 2-1).

<ul style="list-style-type: none"> • angenehme Berühr- und Druckhaptik • hohe Wertigkeit (authentische Materialien) • natürliche, biologische Strukturen • Mehrglanzeffekte innerhalb des Dekors • partiell angepasste Strukturierung innerhalb eines Bauteils • technologische, synthetische, puristische Strukturen • Struktur-Morphing (z. B. nahtlose Formänderung) • veredelte Oberfläche so dünn wie möglich • kein Dekor- oder Narbungsverzug • komplexe Freiformoberflächen mit engen Radien und Durchbrüchen • abbildungsgenaue, reproduzierbare Strukturherstellung 	<ul style="list-style-type: none"> • nahtloses Design (fugenlos bei Sichtflächen) • konstanter Glanzgrad • einheitliche oder flexible Farbgestaltung • geringe Bauteilkosten und keine Nacharbeit der Bauteile • Eignung für Modulbauweise • hohe Kratz- und Abriebfestigkeit, Schmutzabweisend • natürliche visuelle Wahrnehmung (authentische Optik) • geringes Verletzungsrisiko beim Crash • Anpassung gemäß Trägeroberfläche • Strukturgrößen/-details kleiner als 40 µm • Strukturturen bis zu 200 µm • Individualität und hohe Designflexibilität
--	--

Tabelle 2-1: Überblick über aktuelle und zukünftige Anforderungen an Interieur-Oberflächen [KRÜT05], [MANG03], [KÖNI05], [MITZ05], [AUTO05a], [AUTO05b], [MITZ04, S. 181], [EBEL03, S. 10], [HOFF03], [DAHL04], [DANN04, S. 6-12], [SCHL04], [HÖHL04], [DAHL05], [TETT01], [NINI04], [TIET01, S. 45-57], [WALL01], [RÜDI05], [VDA03, S. 12-15]; [NOIS02], [OHLI01, S. 5], [WEHA02, S. 6]

Overview of current and future requirements of interior surfaces

In Bild 2-3 ist eine Freiformoberfläche mit einer verzerrungsfreien Schlaufenstruktur dargestellt, bei der einige der zuvor vorgestellten Designtrends umgesetzt sind. Im Randbereich ist eine stufenlose Reduzierung der Strukturhöhe realisiert, um insbesondere die Entformung zu verbessern. Die Struktur ist außerdem im Bereich der Bauteilberandung angepasst.

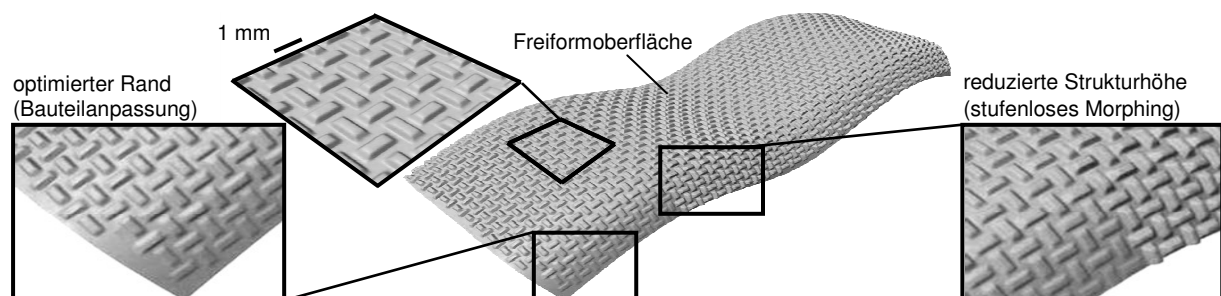


Bild 2-3: Synthetische Schlaufenstruktur auf Freiformbauteiloberfläche

Synthetic loop structure on free-form surface

Um die praktische Umsetzung der vorgestellten Designtrends ermöglichen zu können, werden leistungsfähige Fertigungsverfahren zur Dekoration von Kunststoffbauteilen benötigt. Aufgrund des zunehmenden Kostendrucks – ein Drittel der Herstellungskosten eines PKW entfallen auf den Innenraum [EBEL03, S. 10] – müssen insbesondere Schnelligkeit und Wirtschaftlichkeit im Mittelpunkt der Verfahrensauswahl stehen. Kurze Modelllaufzeiten, zunehmende Variantenvielzahl und rapide sinkende Losgrößen erfordern weiterhin eine Flexibilisierung der Fertigung. Kleinserien bieten jedoch Chancen für den Einsatz neuer Fertigungsverfahren [LUDW05], [DANN04, S. 25], [RAU03, S. 237].

2.1.2 Designentwicklungsprozess

Design development process

Im Automobilbau ist der Designentwicklungsprozess ein sehr komplexer Abschnitt, bei dem Designer, Modellbauer und Spezialisten aus der Produktion eng zusammenarbeiten. Der Designprozess lässt sich dabei gemäß der Audi AG in mehrere, zeitlich aufeinander aufbauende Phasen unterteilen: Konzeptphase, Sketchphase, Modellbau, Color & Trim und Realisierung. Die Phasen sind durch eine iterative Vorgehensweise geprägt, bei der Designstrukturen zuerst am Computer virtuell entwickelt und daraufhin zur optischen und haptischen Begutachtung hergestellt werden. Aus Mangel an geeigneten Verfahren werden diese Strukturen nicht im Serienwerkstoff, sondern meist als ebene Silikon-Musterplatten gefertigt [SIEL05], [KRÜT05]. Es ist ein hohes Maß an Erfahrung nötig, um die meist subjektiven Ergebnisse auf das endgültige Serienbauteil übertragen zu können. Eine schnelle und flexible Herstellung der Designstrukturen im Serienwerkstoff würde neben einer erheblichen Verringerung der Entwicklungszeiten und -kosten auch die Leistungsfähigkeit des Designprozesses erhöhen. Es müssen Fertigungsprozesse verfügbar sein, bei denen keine fertigungstechnologischen Einschränkungen vorliegen, welche die Umsetzung neuartiger Designstrukturen behindern. Dabei ist eine hohe Strukturflexibilität und Werkstoffvielfalt gefordert.

Neue Oberflächendesigns müssen neben einer zunehmenden Formkomplexität auch zusätzliche technologische Eigenschaften erfüllen. Eine zielgerichtete fertigungstechnische Umsetzung derartiger Strukturen bedarf einer umfassenden Verarbeitung unterschiedlicher Datenformate; es sind Schnittstellen von gängigen Designsoftwaretools zu Fertigungsprozessen erforderlich. Eine mangelnde Datendurchgängigkeit hat stets eine unzureichende Reproduzierbarkeit zur Folge. Außerdem müssen Strukturen von Referenzoberflächen, wie z. B. Leder, detailgetreu zu verarbeiten sein. Zusammengesetzte Bauteile weisen an den Nahtstellen partielle Strukturveränderungen auf, so dass die Qualität des Gesamtprodukts reduziert wird.

2.1.3 Herstellungsverfahren von Oberflächendesignstrukturen

Manufacturing processes of surface design structures

Als Offline-Verfahren werden mehrstufige Technologien bezeichnet, die Dekore nachträglich in oder auf einer endgeformten Bauteiloberfläche herstellen. Online-Verfahren (einstufig) und Direkt-Verfahren (integriert) nutzen verfahrensbedingt dagegen ein Formwerkzeug, so dass diese Verfahren auch als In-Mould-Dekorationen bezeichnet werden. Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Herstellungsverfahren für dekorierte Kunststoffbauteile [GREF00], [KONI05, S. 2].

Offline (mehrstufig)	In-Mould-Dekoration	
	Direkt (einstufig)	Online (integriert)
Beflocken		
Bedrucken	Ein-/Mehrkomponentenspritzgießen	Folienhinterspritzen
Lackieren	Spritz-/Quellflussprägen	Folienhinterprägen
Metallisieren	Blas-/Vakuumformen	Hinterpressen
Beledern/Kaschieren	Tiefziehen	Hinterschäumen
Formprägen	SkinForm-Verfahren	Lackhinterspritzen

Tabelle 2-2: Übersicht über Herstellungsverfahren von dekorierten Kunststoffoberflächen

Overview of manufacturing processes of decorated plastic surfaces

Bei Offline-Verfahren liegen stets hohe Bauteilstückpreise vor. Neben Bedrucken und Beflocken ist das Lackieren sehr verbreitet. Dabei werden Standardfarbtöne, spezielle Metallic- und Effektlacke sowie Softtouch-Lacke genutzt, die dem Kunststoff eine lederähnliche Oberfläche mit angenehmer Haptik verleihen. Durch spezielle Abdecktechniken können eingeschränkte Strukturformen erzeugt werden [GÜNT06], [PLAS01], [JACO05], [FRAN05, S. 38-39], [ENK06], [SCHW05]. Metallisieren und Galvanisieren sind Beschichtungsverfahren. Durch unterschiedliche Abdecktechniken oder durch Zwei-Komponenten-Spritzguss (zweite Phase ist ein säureresistentes Abdeckmaterial) können partiell metallisierte Bauteilbereiche bzw. einfache Strukturmuster hergestellt werden; typisch sind Chrom- oder Aluminiumschichten [MEYE00], [GÜNT06], [KONI03], [PIES05], [FRAN05, S. 38], [DAHL04]. Mittels Beledern können synthetische oder natürliche Formhäute, dünne Metallfolien oder Textilien auf Kunststoff-

träger nachträglich aufgezogen werden. Synthetische Formhäute werden vor allem durch kostengünstiges Walz-Prägen von Kunststofffolien hergestellt. Dabei auftretende nachteilige Dekorverzerrungen können durch vorgeformte, synthetische Formhäute auf ein Minimum reduziert werden (z. B. In-Mould-Graining, Sprüh- oder Gießhäute oder Slush-Moulding). Bei diesen Verfahren benötigt man jedoch stets aufwändige Formwerkzeuge, die überwiegend im Galvanoprozess hergestellt werden (vgl. Kap. 2.3.3). Der zeitliche Aufwand des Entwicklungsprozesses von Slushhäuten wird üblicherweise mit 36 Wochen veranschlagt. Die hohen Ansprüche an die Farbübereinstimmung von Einzelteilen können jedoch durch Formhäute meist nur unzureichend erfüllt werden. Weiterhin sind Dekoränderungen innerhalb eines Bauteils nur sehr aufwändig zu realisieren [WALD06], [FRAN05, S. 39], [MITZ04, S. 186], [GÜNT06], [SCHN05], [MANG03], [SCHIO5], [RAU03, S. 251], [TIET01, S. 51]. In Bild 2-4 sind typische Bauteilbeispiele von Offline-Verfahren dargestellt.



Lackierung (Balda AG)



Metallisieren (Bernt GmbH)



Formhaut (Benecke-Kaliko AG)

Bild 2-4: Dekorierte Oberflächen durch Offline-Fertigungsverfahren

Surfaces decorated through offline manufacturing processes

Bei Online-Verfahren basiert die Bauteilformgebung auf Urformung, die zur Oberflächendekoration durch einen zusätzlichen integrierten Prozessschritt erweitert ist. Daher können die Verfahrensvorteile des Urformens nahezu vollständig genutzt werden. Die Oberfläche wird durch bereits fertig dekorierte, ausreichend steife Supportmaterialien gebildet, wie z. B. bedruckte oder genarbte Folien (Form-/Slushhäute), Echtleder oder Textilien. Hinterspritzen, -prägen, -pressen oder -schäumen unterscheiden sich lediglich durch unterschiedliche Prozessführungen. Es können komplex gekrümmte Bauteile mit Symbolen, Durchlichttechnik oder mehrfarbigen, flächigen Dekoren (wie z. B. Wurzelholzdesign) gefertigt werden. Dabei kann auch ein Oberflächeneindruck (glänzend, strukturiert, matt) eingestellt werden, der jedoch in der Tiefe begrenzt ist. Nachteile aller folienbasierten Verfahren sind mögliche Dekorschädigungen durch thermische Belastung und Scherbelastung der Folie. Die Minimierung des Ausschusses in der Produktion und die Nacharbeit spiegeln sich in kostenintensiven Werkzeugauslegungen und -ausführungen sowie in aufwändigen Prozessführungen wider [HEBE00], [KONI05, S. 4], [BAYE05], [KONI05], [STAH05], [KAUF03], [MENG99, S. 636-638], [JOHA04, S. 555-587], [GÜNT06], [SCHIO3a], [GOET05], [JANS04], [GREF03].

Im Gegensatz zu den Online-Verfahren handelt es sich bei den Direkt-Verfahren um einstufige Verfahren aus der Gruppe der Urformprozesse. Es wird eine einsatzfähige, dekorative Oberfläche direkt während der Bauteilformgebung des Produkts ohne zusätzliche Hilfsmittel oder Nachbehandlung hergestellt. Dabei finden u. a. Ein- oder Mehrkomponentenspritzgießen, Spritzprägen sowie Blas- und Vakuumformen Verwendung. Spritzgießverfahren sind mit über 90 % die am häufigsten eingesetzten Verfahren im Interieur-Trim-Bereich. Die herstellbaren Strukturformen, -größen und -genauigkeiten werden maßgeblich von den verwendeten Fertigungstechnologien für die Erzeugung der abzuförmenden Negativ-Struktur in der Werkzeugoberfläche bestimmt. Eine prozesssichere und qualitativ hochwertige Abformung erfordert bei der Gestaltung der abformenden Strukturen die Einhaltung von technologischen Randbedingungen (Kapitel 2.2.2). [MITZ04, S. 186], [DANN04, S. 25], [GÜNT06], [HÖHL04], [MENG99, S. 39-94], [JOHA04, S. 31-35], [SCHU99]. In Bild 2-5 ist eine durch Spritzgießen hergestellte genarbte Instrumentenabdeckung dargestellt.

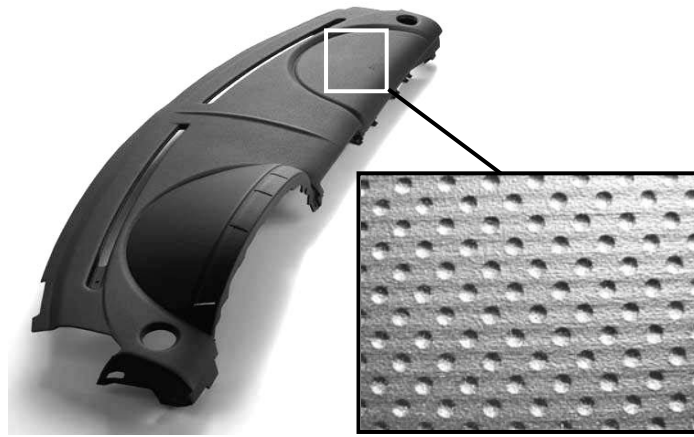


Bild 2-5: Spritzgussbauteil (GF Formenbau)
Injection moulding part

Tabelle 2-3 gibt eine Übersicht über die Eignung der zuvor vorgestellten Fertigungsverfahren zur Umsetzung der Designrends. Die Bewertung erfolgt für die wesentlichen Trends, die in drei Hauptgruppen unterteilt sind: Fertigungstechnologie, Oberflächengestaltung und Bauteil.

+ gut realisierbar o realisierbar m. Einschränkungen - nicht realisierbar	In-Mould-Dekoration						
	Offline (mehrstufig)				Online (integriert)	Direkt (einstufig)	
	Form- prägen	Metal- lisieren	Beledern/ Kaschieren	Bedrucken/ Lackieren	Supportmaterial m. Hintertechnik (Folien- hinterspritzen)	Ein- komponenten- technik (Spritzgießen)	Mehr- komponenten- technik (Skin-Form)
die Fertigungstechnologie							
hohe Maßhaltigkeit	o	o	-	o	+	+	+
geringer Teilepreis	-	-	-	-	o	+	+
hohe geometrische Freiheit (3D-Flächen)	-	+	o	+	o	+	+
möglichst dünne Oberflächenveredelung	+	-	-	+	+	+	+
niedriger zusätzlicher Systemaufwand	-	o	o	+	-	o	o
keine Nacharbeit	+	o	+	+	-	+	+
flexible und partielle Bearbeitung	-	o	+	o	+	+	+
das Bauteil							
breite Werkstoffauswahl	+	o	+	+	+	+	+
gute Recyclingfähigkeit	+	-	o	-	-	+	+
geringes Gewicht	+	+	-	+	+	+	+
gutes Crash-Verhalten	+	-	+	+	+	+	+
die Oberflächengestaltung							
authentische Optik	o	+	+	o	+	+	+
authentische Haptik	o	+	+	o	+	+	+
komplexe 3D-Strukturen	o	o	-	-	-	o	o
hohe Strukturvielfalt	o	o	o	o	o	o	o
nahtloses Struktur-Morphing	o	o	-	-	o	o	o
Sichtflächen frei von Designtrennungen	o	-	-	-	o	o	o
Narbungsverzugsfreiheit	o	o	o	o	-	+	+
enge Radien und Durchbrüche	-	+	-	+	o	+	+
abbildungsgenaue Struktur	o	o	o	o	-	o	o
Oberflächenunempfindlichkeit	o	-	o	o	o	o	+
Mehrglanzeffekte innerhalb der Struktur	-	-	-	-	-	o	o
konstanter Glanzgrad	o	+	-	+	o	o	o
flexible, einheitliche Farbgestaltung	o	+	-	+	o	+	+

Tabelle 2-3: Eignung von Online-, Offline- und Direkt-Fertigungsverfahren zur Oberflächenstrukturierung gemäß bestehender und zukünftiger Designrends
Applicability of online, offline and direct manufacturing processes for surface structuring in accordance with current and future design trends

Es wird ersichtlich, dass die Direkt-Verfahren die größten Umsetzungspotenziale besitzen. Jedoch weisen sie Defizite in der Umsetzung der Anforderungen hinsichtlich komplexer 3D-Strukturen, hoher Strukturvielfalt, Struktur-Morphing, Narbungsverzugsfreiheit, Abbildungsgenauigkeit und Mehrglanzeffekt auf. Die vorgelagerten Werkzeugbauprozesse müssen demnach durch die Verwendung von Form-Werkzeugen deutlich verbessert werden.

2.2 Direkte Herstellung durch Kunststoffspritzgießen

Direct manufacturing through plastic injection moulding

2.2.1 Verfahrensbeschreibung

Characterisation of the process

Das Spritzgießen wird durch die verwendeten Kunststoffwerkstoffe, die Bauart der eingesetzten Maschine und die Prozessabfolge bestimmt, so dass verschiedene Verfahrensunterarten existieren [DANN04, S. 25]. Bei allen Verfahren sind jedoch die grundlegenden Prozessschritte identisch. Beim Spritzgießen wird unter hohem Druck die aufgeschmolzene Formmasse in das geschlossene Werkzeug eingespritzt. Das Werkzeug besteht dabei aus Formhöhlungen (Kavitäten oder Formnest), die Werkzeugkontur entspricht der negativen Endkontur des Formteils. Die Schmelze wird durch das Werkzeug aufgenommen, verteilt und geformt. Die Formmasse kühlt im temperierten Werkzeug ab und gewinnt die für die Entformung notwendige Formstabilität [JOHA04, S. 300-314] [MICH00a, S. 67-85]. Neben dem konstruktiven Aufbau und der Realisierung von zusätzlichen Funktionsbauteilen (z. B. Auswerfer) hat die Gestaltung der Werkzeugoberfläche den größten Einfluss auf den Abformprozess bzw. die Strukturherstellung [HOMM99]. Nachfolgend wird daher das System: Formnestoberfläche – Designstruktur – Formmasse näher untersucht, um prozessrelevante Abhängigkeiten herausstellen zu können.

2.2.2 Systembeschreibung: Formnest – Designstruktur – Formmasse

Characterisation of the system: cavity – design structure – moulding material

Beim Spritzgießen korreliert die Qualität der Formteiloberfläche direkt mit der Qualität der Formnestoberfläche. Spritzgusswerkzeuge bestehen dabei überwiegend aus metallischen Werkstoffen [MICH00a, S. 44], [STEI03]. Zur systematischen Betrachtung der Formnestoberfläche ist es notwendig, die Oberfläche in Makro- und Mikroformneststruktur zu unterteilen (Bild 2-6). Die Makrostruktur der Formnestoberfläche erzeugt die Gestalt des Formteils, die Mikrostruktur hingegen das Erscheinungsbild der Formteiloberfläche. Die Makrostruktur wird somit von der Mikrostruktur überlagert. Die daraus resultierenden Wechselwirkungen müssen bei der Werkzeugkonstruktion und -fertigung beachtet werden.

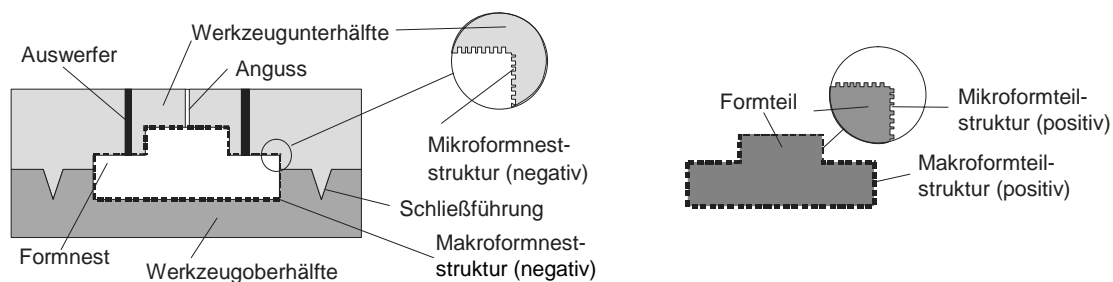


Bild 2-6: Unterteilung der Oberfläche in Makro- und Mikroformneststruktur

Classification of the surface in macro and micro cavity

Schwindung und Verzug

Das Kunststoffbauteil erfährt während des Abkühlvorgangs im Werkzeug eine für den eingesetzten Werkstoff spezifische Dimensionsänderung: Das Bauteil schwindet. Die Schwindung beträgt bei amorphen Thermoplasten 0,2 bis 0,8 % und bei teilkristallinen Thermoplasten 0,2 bis 3 % und kann zu Verzug am Bauteil führen. Die Schwindung muss bei der Werkzeugauslegung berücksichtigt werden, so dass das Formnest und somit auch die Oberflächenstruktur um das Schwindungsmaß größer ausgelegt werden müssen [ERHA99, S. 243, S. 248-252], [MENG99, S. 363-377], [MICH00a, S. 45-46].

Entformung

Alle Flächen in Entformungsrichtung sollten Entformungsschrägen aufweisen. Die Auslegung ist dabei in Abhängigkeit vom gewählten Kunststoff und von der Oberflächenrauheit bzw. Mikrostrukturtiefe zu treffen [MENG99, S. 433-437], [MICH99]. Bei hochglanzpolierten Oberflächen sollte der Entformungswinkel ψ nicht unter $0,5^\circ$ liegen. In der VDI-Norm 3400 sind in

Abhängigkeit vom Werkstoff und von der Rauheitsstufe empfohlene Entformungswinkel für Erodierstrukturen aufgeführt [SCHA94, S. 12], [VDI75]. Bei Oberflächenstrukturen sollte die Entformungsschräge (ψ) zusätzlich 1° pro $25 \mu\text{m}$ Narbtiefe betragen (Bild 2-7) [GEPL06, S. 39], [MENG99, S. 78]. Falls entsprechende Entformungsschragen nicht realisiert werden können, muss die Narbtiefe aufgrund der Gefahr von Strukturabrissen begrenzt werden. Bild 2-8 zeigt eine REM-Aufnahme einer durch mangelnde Entformungsschräge beschädigten Mikrostruktur am abgeformten Bauteil [SCHA94, S. 12].

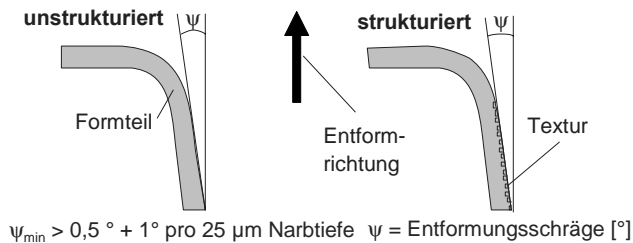


Bild 2-7: Entformungsschräge und Narbtiefe
[GEPL06, S. 39]

Draft angle and grain depth

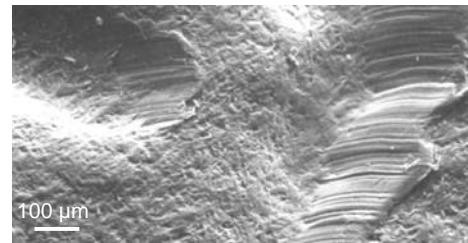


Bild 2-8: Strukturbeschädigung
Structure damage

Mikrostrukturen stellen selbst eine Vielzahl von kleinen, zusätzlichen Formnestern im Formeinsatz dar. Diese müssen ebenfalls vor Abscherung, Deformation bzw. Zerstörung bei der Entformung geschützt werden [SCH103b], [ROGA98], [GÄRT05]. Hinsichtlich der Entformbarkeit kann als charakteristische Kennzahl die benötigte Entformkraft in Abhängigkeit vom Aspektverhältnis der Mikrostruktur herangezogen werden [FLEI05b].

Abbildungsvermögen – Glanzgrad

Mitentscheidend für die Abbildung der Formneststruktur sind materialspezifische Eigenschaften der Formmasse (z. B. Viskosität), die Oberflächenrauheit der Struktur und die Prozessführung beim Spritzgießen [JOHA04, S. 56-105], [MICH00b, S. 54]. Als Maß für das Abbildungsvermögen von strukturierten Werkzeugen kann der am Formteil gemessene Glanzgrad genutzt werden (Reflektormetermessung nach DIN 67530). Ziel ist eine hohe Abbildungsgüte und somit die Sicherstellung eines einheitlichen Glanzgrads. Grundsätzlich gilt für raue Oberflächen: Je niedriger der Glanzgrad, desto besser ist das Abbildungsvermögen. Eine raue Oberfläche wirkt bei genauer Abformung matt, bei ungenauer Abformung wirkt sie dagegen glänzender. Bei einer polierten Oberfläche (niedrige Rauheit) verhält es sich entgegengesetzt – hier wirkt die genau abgeformte Oberfläche glänzend, die ungenau abgeformte dagegen matter [EULE06], [BASF06, S. 8], [JOHA04, S. 1149-1151], [DIET05].

Neben den gestalterischen Anforderungen müssen also auch die zuvor vorgestellten Besonderheiten des Spritzgießprozesses in der Designstruktur berücksichtigt werden. Die daraus resultierende komplexe Oberflächenstruktur des Formnestes muss abbildungsgenau hergestellt werden, um die Qualität des Formteils sicherzustellen.

2.3 Fertigung von Designstrukturen in Spritzgießwerkzeugoberflächen

Manufacturing of design structures in surfaces of injection mould tools

Zur industriellen Herstellung des Formnestes können unterschiedliche Fertigungsverfahren eingesetzt werden. Bei der Verfahrensauswahl sind die verwendeten Werkzeugwerkstoffe, die geforderte Komplexität und Qualität der Oberfläche und die Anzahl der Abformungen zu berücksichtigen. Es kann zwischen einstufigen oder mehrstufigen Prozessen unterschieden werden (Tabelle 2-4) [MENG99, S. 39-94], [JOHA04, S. 1149].

einstufig (gleichzeitig)	mehrstufig (sequentiell)		
Makro- und Mikrostruktur	Makrostruktur	Mikrostruktur	
Gießen/Schmelzkerntechnik	Gießen	direkte Strukturierung	indirekte Strukturierung
direktes Rapid-Tooling	Drehen	Spanen (Fräsen, Schleifen usw.)	Galvanotechnologie
Einsenken	Fräsen	Strahlverfahren	Strukturätzen
Drehen/Fräsen		Funkenerosion	LIGA-Verfahren
EDM/ECM		Laserstrahlgravieren	Sprengprägen

Tabelle 2-4: Prozesse zur Herstellung von Spritzgießwerkzeugen

Manufacturing processes for injection mould tools

Bei den einstufigen Verfahren werden gleichzeitig sowohl die Makro- als auch die Mikroformneststruktur hergestellt, so dass nur geringe Anforderungen an die Oberflächenstruktur umgesetzt werden können. Im Gegensatz dazu werden Formnester mit hohen Ansprüchen an die Oberflächenqualität bzw. -struktur mittels mehrstufiger Verfahren gefertigt. Zuerst wird die Makrostruktur in einem vorgelagerten Prozessschritt hergestellt. Darauf aufbauend wird mit speziellen Oberflächenbearbeitungsverfahren die Mikroformneststruktur eingebracht. Diese Verfahren lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Wirkprinzipien in direkte und indirekte Strukturierungsverfahren unterteilen. Im Folgenden werden die wichtigsten Fertigungsverfahren zur Herstellung von filigranen Mikroformneststrukturen aus der Gruppe der mehrstufigen Verfahren vorgestellt.

2.3.1 Strukturätzen
Texture etching

Unter Strukturätzen wird der partielle, korrosive Abtrag durch Säuren verstanden. Beim eingesetzten Multilayer-Fotoätzen werden die nicht abzutragenden Oberflächenbereiche mit einem säureresistenten Film belegt. Es können dabei bis zu acht Ätzschritte nacheinander durchgeführt werden. Der konstante Abtrag führt zu einer gleichmäßigen Rauheit und Mattigkeit. Vorteile sind außerdem die niedrigen Prozesskosten und die geringen Einschränkungen hinsichtlich der Werkzeugzugänglichkeit. Typische Strukturiefen beim Ätzen liegen zwischen 10 und 250 µm. Es können Strukturgrößen mit Abmessungen unter 1 µm gefertigt werden. Bild 2-9 verdeutlicht die Prozessabfolge [MENG99, S. 75-78], [KRÜT05], [STAN06, S. 10].

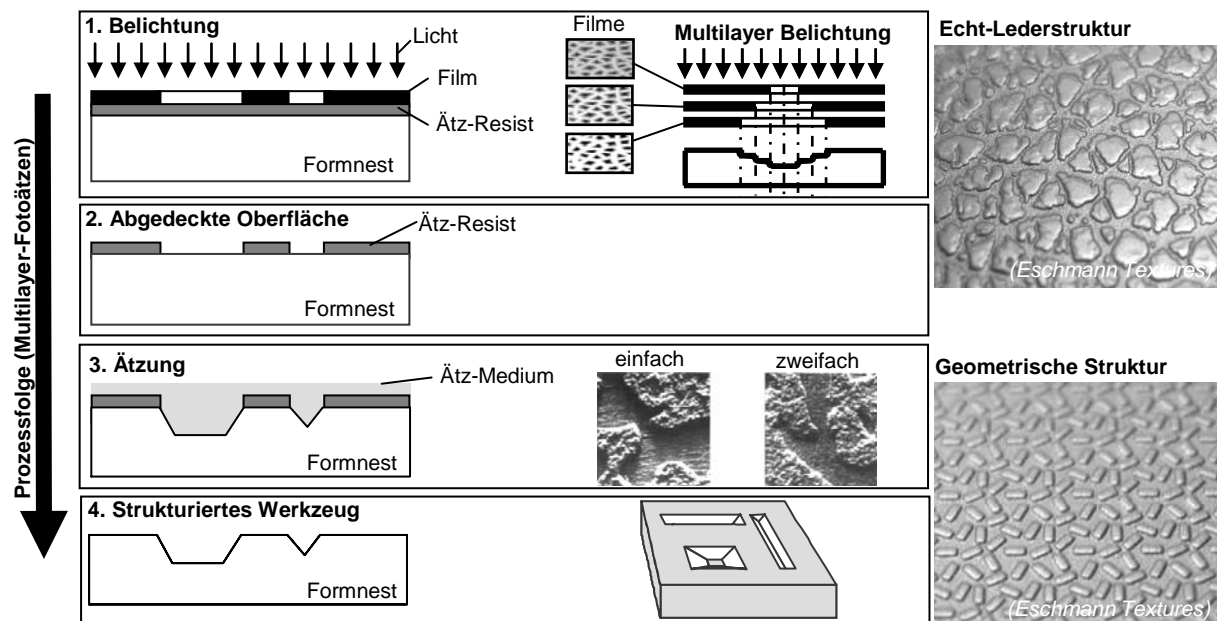


Bild 2-9: Prozessfolge Multilayer-Fotoätzen [MENG99, S. 77], [SCHA94, S. 4]

Process chain of multi layer photo etching

Die erzielbare Oberflächenqualität hängt nicht nur vom verwendeten Ätzmittel, sondern auch vom Werkstoff und seiner Oberflächenbeschaffenheit ab. Je feinkörniger das Gefüge ist, desto gleichmäßiger und präziser erfolgt die Ätzung. Mittels Ätzen können Stähle, Kupfer, Messing, Zink und Aluminium bearbeitet werden [MENG99, S. 69-70], [STAN06, S. 9], [SCHA94, S. 4].

Typische Ätzraten liegen zwischen 0,01 und 0,08 mm/min. Der Zeitbedarf zur Herstellung einer automobilen Instrumententafel mittels Fotoätzen beläuft sich inklusive Werkzeugvorbereitung auf insgesamt 24 Wochen [MENG99, S. 69-70]. Ätzungen weisen einen undefinierten Flankenwinkel auf und der Ätzgrund bildet sich leicht rund aus. Deshalb und aufgrund der limitierten Anzahl der Filmlayer sind komplexe Strukturen nur mit deutlichen Qualitätsverlusten herstellbar. Durch die Verwendung von zweidimensionalen Bildvorlagen und der somit fehlenden Datendurchgängigkeit liegt zudem nur eine bedingte Reproduzierbarkeit vor [KRÜT05].

2.3.2 Funkenerosion

Electrical discharge machining

Die Funkenerosion (EDM) ist ein abbildendes Formgebungsverfahren für elektrisch leitende Werkstoffe, bei dem die materialabtragende Wirkung kurzzeitiger, aufeinander folgender elektrischer Entladungen zwischen Werkstück- und Werkzeugelektrode in einem Dielektrika ausgenutzt wird. Dabei entsteht stets eine muldige Oberflächentopographie aus Einzelentladungskratern (Bild 2-10, Mitte). Durch die Ausführung der Werkzeugelektrode bzw. deren Oberfläche und der eingesetzten Prozessführung (z. B. Werkzeugbewegung) können unterschiedliche EDM-Prozesse gestaltet werden. Die maßgeblichen Nachteile des EDM-Verfahrens bestehen in der begrenzten Anzahl der bearbeitbaren Werkstoffe, in der kostenintensiven Herstellung der Werkzeugelektroden und in einer geringen Strukturflexibilität aufgrund der Verwendung von Formwerkzeugen [MENG99, S. 70-78].

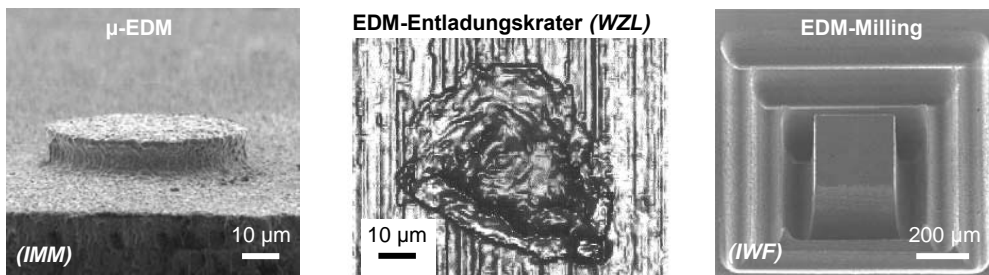


Bild 2-10: EDM-Verfahren und Entladungskrater (Mitte)

EDM techniques and discharge pit (middle)

Im Senk- oder Planetärverfahren können durch glatte Erodierwerkzeuge unterschiedliche Oberflächenrauheiten (samartig bis grobkörnig) durch Variation der Impulsdauer und der Stromstärke eingestellt werden. Beim Schruppen können Abtragraten V_{Abtrag} von über 2000 mm³/min erzielt werden. Bei Werkzeugoberflächen sind typische Rauheiten R_a zwischen 1-6 µm (entspricht Stufe 20-36 der VDI 3400 [VDI75]) zu finden. Feinere Rauheiten sind zwar möglich ($R_a > 0,1$ µm), werden aber aufgrund der Kratzempfindlichkeit und der oft ungleichmäßigen Dielektrika-Spülung industriell kaum erzeugt. In Bild 2-11 ist eine Musterplatte nach VDI Norm 3400 mit unterschiedlichen Erodierstrukturklassen dargestellt [FLEI04, S. 591], [SCHA94, S. 2-3], [KLOC01a, S. 410].



Bild 2-11: Erodierstrukturplatte nach DIN 3400

Texture plate with EDM-structures according to DIN 3400

Die Herstellung komplexer 3D-Geometrien kann hingegen durch strukturierte Elektrodenwerkzeugoberflächen (µ-EDM) erfolgen. Es können Strukturgrößen mit Abmessungen kleiner als 20 µm bei Fertigungstoleranzen von bis zu +/- 1 µm hergestellt werden. Limitierend für die herstellbare Strukturgröße und -form ist dabei nicht das µ-EDM-Verfahren, sondern es sind die kostenintensiven Fertigungsverfahren zur Herstellung geeigneter Werkzeugelektroden. In Bild 2-10 (links) ist die REM-Aufnahme einer durch µ-EDM hergestellten Zylinderstruktur mit einem Durchmesser von 30 µm dargestellt [FISC00], [PILT04], [KOCH03], [FLEI04, S. 591-

592]. Beim EDM-Milling können mittels rotierender, meist zylindrischer Stabelektroden filigrane Strukturen gefertigt werden (Bild 2-10, rechts). Dabei erfolgt eine Relativbewegung zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück im z'-Level-Constant-Machining (Stufen > 100 µm). Industriell sind Stabelektroden mit einem Durchmesser von bis zu 40 µm verfügbar, so dass Stegbreiten bis zu 20 µm und Nutbreiten bis zu 50 µm prozesssicher hergestellt werden können. Je nach Elektrodendurchmesser können große Aspektverhältnisse von bis zu 100 erreicht werden. Aufgrund der kleinen Werkzeughdurchmesser liegen stets hohe Werkzeugverschleiße und geringe Abtragsvolumina ($V_{\text{Abtrag}} < 0,002 \text{ mm}^3/\text{min}$) vor, so dass der EDM-Milling-Prozess sehr zeit- und kostenintensiv ist [HESS02, S. 42-43, 49], [KULI02, S. 10], [FLEI05a, S. 889], [MENG99, S. 635].

2.3.3 Galvanoformen *Galvanic moulding*

Das Galvanoformen wird zur Herstellung von strukturierten, großflächigen Werkzeugen im Fahrzeugbau eingesetzt, obwohl es sich um ein sehr zeit- und kostenintensives Verfahren handelt. Das Verfahren basiert auf einer Urformung aus dem ionisierten Zustand, dessen wesentliche Prozessschritte in Bild 2-12 dargestellt sind.

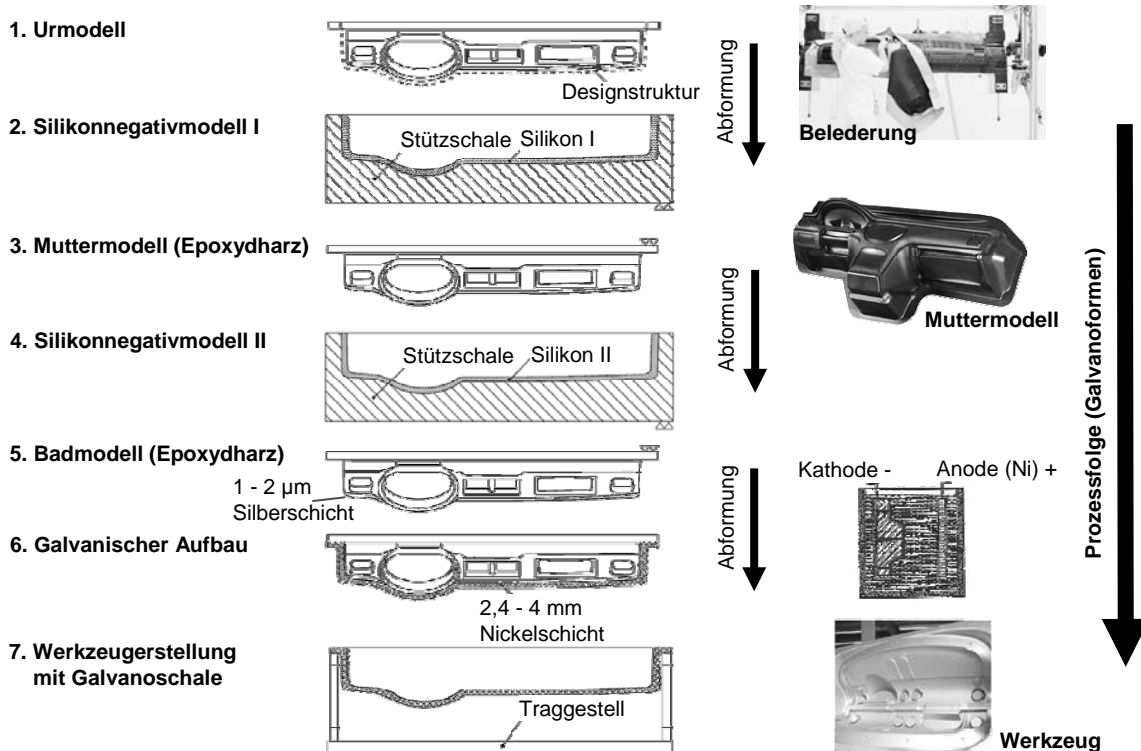


Bild 2-12: Galvanoformprozess am Beispiel einer Instrumententafel (*Galvanoform*), (*Faurecia*)
Process of galvanic moulding shown by the example of an automotive dash board

Das Urmodell (Referenzbauteil) weist die geforderte Oberflächenstruktur auf, wobei die Designstruktur indirekt durch Belederung oder direkt durch Fräsen oder Erodieren hergestellt werden kann. Über mehrere Abformschritte wird ein Badmodell (Kathode) für die anschließende Galvanisierung gefertigt. Das dabei hergestellte Muttermodell dient als Abnahmebauteil für die Designabteilungen. Bei der elektrolytischen Abscheidung wird eine selbsttragende metallische Werkzeugform erzeugt, wobei bis zu 4 mm dicke Metallschichten (meist Cu oder Ni) abgeschieden werden. Die Oberflächenstruktur wird stets leicht abgerundet ausgebildet. Nach einer Hinterfüterung enthält man ein einsatzfähiges Werkzeug [WESL04], [GALV06], [SCHA94, S. 5]. Durch Galvanoformen lassen sich Oberflächenstrukturen bis $R_t = 0,05 \text{ µm}$ abbilden. Tiefe Spalten und enge Vertiefungen können wegen mangelnder elektrischer Streufähigkeit nur begrenzt hergestellt werden. Aufgrund der geringeren Härte des abgelagerten Materials im Vergleich zu Stahl sind die Werkzeugstandzeiten begrenzt. Für jede neue Produktionsform muss auf ein Zwischenmodell der Abformkette (flexibles Silikon) zurückgegriffen

werden. Werden außerdem maßstäblich skalierte Formen gefordert, wird sogar für jede Größe ein neues Urmodell benötigt. Weiterhin muss eine hohe Sorgfalt in der Abformung der einzelnen Teilschritte sichergestellt werden, da sich bei jeder Abformung die Toleranzen vergrößern und die Oberflächenqualität vermindert wird [MENG99, S. 53], [DENK04]. Der hohe Anteil an manuellen Tätigkeiten (Modelltechnik und Gravur) führt zu einer fehlenden Datendurchgängigkeit und zu einer begrenzten Reproduzierbarkeit. Der Herstellungszeitbedarf für das im Bild 2-12 dargestellte Instrumententafelwerkzeug beläuft sich auf bis zu elf Monate, wobei alleine die Galvanisierung über zwölf Wochen benötigt. Aufgrund des langwierigen Herstellungsprozesses sind z. B. Oberflächenstrukturwechsel in der Serienapplikation nur schwer zu realisieren [KÖST06], [MENG99, S. 632].

2.3.4 Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide

Cutting with geometrically defined edge

Die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide zeichnet sich besonders durch breite Werkstoffauswahl, große Geometrie- und Strukturfreiheit, hohe Oberflächengüte und geringe Bearbeitungszeiten aus. Bei der Zerspanung mit kleinsten Spanungsquerschnitten wird zwischen Ultrapräzisions- und Mikrozerspanung unterschieden [HESS02, S. 9]. Die Zerspanung erfolgt grundsätzlich auf NC-Bearbeitungsmaschinen, so dass die herzustellenden Strukturen vollständig im Programmiersystem (CAD/CAM) beschrieben sein müssen. Natürliche Referenzmuster wie Leder müssen digitalisiert und daraufhin aufbereitet werden. Aufgrund der vorliegenden, kaum verarbeitbaren großen Datenmengen müssen die Abbildungsgenauigkeiten reduziert und die Bauteilgrößen stark begrenzt werden.

Ultrapräzisions-Zerspanung (UP)

In der UP-Zerspanung werden überwiegend monokristalline Diamantwerkzeuge eingesetzt, so dass Kleinststrukturen mit Abmessungen größer als $1\ \mu\text{m}$ und hohen Genauigkeiten ($< 1\ \mu\text{m}$) sowie mit höchsten Oberflächenqualitäten ($R_a < 0,01\ \mu\text{m}$) großflächig hergestellt werden können. Dabei sind UP-Drehen, Fast-Tool und Fly-Cutting die verbreitetsten Verfahren. Aufgrund der Kohlenstoffaffinität von Diamanten können mit der auf Diamant basierenden UP-Zerspanung nur Nichteisenmetalle, wie z. B. Aluminium, Kupfer, Messing oder Neusilber, bearbeitet werden [BREC06], [WECK01], [HESS02, S. 10-12], [KNOD02], [SCHM01]. Um dennoch Stahlwerkstoffe in einer vergleichbaren Qualität bearbeiten zu können, wurden zum einen angepasste CBN-Werkzeuge und zum anderen ultraschallunterstützte UP-Verfahren entwickelt. Bei ultraschallunterstützten UP-Verfahren wird das Diamantwerkzeug mit einer Ultraschallschwingung beaufschlagt, so dass durch kurze Eingriffsverhältnisse zwischen Werkzeugschneide und Stahlwerkstoff die thermische Belastung der Werkzeugschneide auf ein Minimum reduziert wird [RÜBE01], [KÖNI97], [HESE02, S. 18]. Aufgrund eines noch nicht ausreichenden Prozessverständnisses erfolgt bisher keine breite industrielle Anwendung [HESE02, S. 19]. Bild 2-13 zeigt typische durch UP-Zerspanung mikrostrukturierte Bauteiloberflächen.

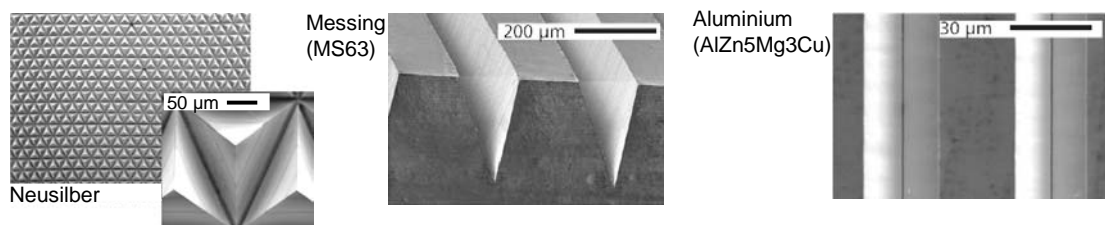


Bild 2-13: Mikrostrukturierte Oberfläche durch Ultrapräzisionszerspannung (*Fraunhofer IPT*)

Surface micro structured by ultra precision machining

Aufgrund der prozessbedingt hohen Oberflächenqualitäten bei den durch UP-Verfahren hergestellten Oberflächen führt eine Abformung stets zu einem hohen Glanzgrad, so dass die UP-Verfahren für die hier betrachteten Oberflächendekorationen ungeeignet sind.

Mikrozerspanung

Bei der Mikrozerspanung werden meist Hartmetallwerkzeuge eingesetzt, so dass die herstellbaren Strukturen im Vergleich zur UP-Zerspanung größer sind und höhere Oberflächenrauheiten aufweisen [HESS02, S. 9]. Beim Mikrofräsen mit Hochgeschwindigkeitsspindeln sind Schafffräswerkzeuge aus Hartmetall mit einem Durchmesser von bis zu 40 µm verfügbar. Unter Laborbedingungen können damit ebene Formeinsätze aus Stahl mit Rauheiten bis zu $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ und Strukturgrößen größer als 20 µm (Stege) mit einer Fertigungstoleranz von bis zu 2 µm hergestellt werden (Bild 2-14) [KLOC05, S. 883], [OETT04].

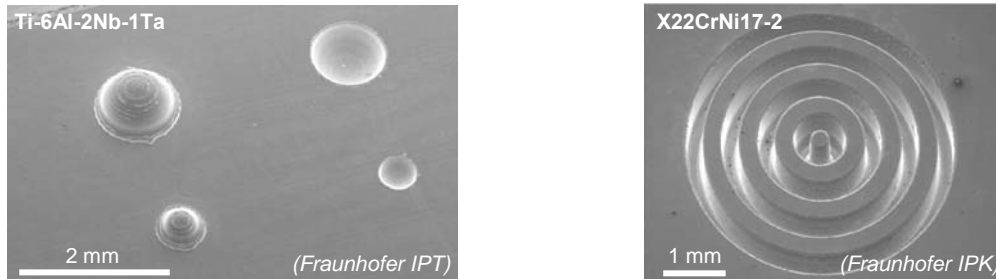


Bild 2-14: Durch Mikrofräsen hergestellte Mikrostrukturen
Micro structures made by micro milling

Die große Empfindlichkeit der filigranen Werkzeuge führt jedoch bei geringsten Prozessstörungen zu einem Werkzeugbruch und somit zu Oberflächenbeschädigungen. Derartige Prozessinstabilitäten führen zum Ausschluss der Technologie. Daher findet das Mikrofräsen mit Werkzeugdurchmessern kleiner als 100 µm nur in Forschungseinrichtungen Verbreitung. Industriell werden Strukturgrößen größer als 200 µm (Nuten) bzw. größer als 100 µm (Stege) prozesssicher hergestellt [KLOC04a, S. 24], [AART04]. Eine konturnahe Bearbeitung von Freiformoberflächen erfolgt derzeit aufgrund von mangelnder Anlagentechnik nur mit Fräs Werkzeugdurchmessern von über 0,3 mm. Der bei der Abformung von mikrogefrästen Oberflächen entstehende Glanzgrad ist zwar aufgrund der höheren Oberflächenrauheit im Vergleich zur UP-Bearbeitung geringer, führt aber ebenfalls zu glänzenden Oberflächen.

DT-Verfahren: Direct Texturing

Das DT-Verfahren (Direct Texturing) stellt eine neuartige Prozesskette zur Narbung von Spritzgießwerkzeugen dar und nutzt dabei das HSC-Narbungsfräsen. Durch eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der CAD/CAM-Technologie soll eine großflächige Oberflächenstrukturierung ermöglicht werden. Die Entwickler erwarten gegenüber dem Galvanoprozess eine Zeitersparnis von bis zu 60 % und eine Halbierung der Werkzeugkosten [KÖST05a], [KÖST05b]. Bild 2-15 (links) zeigt den Ablauf der Prozesskette.

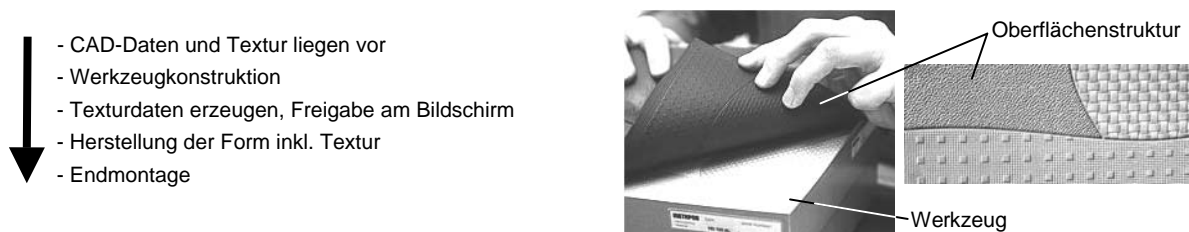


Bild 2-15: Prozessablauf des DT-Verfahrens und Testwerkzeug (Köster Modellbau)
Process cycle of DT-process and test tool

Die durch die Entwickler erwartete Leistungsfähigkeit der Prozesskette konnte noch nicht industriell verifiziert werden. Dies unterstreicht das rechts in Bild 2-15 dargestellte, bis dato erste bekannte Testwerkzeug. Es handelt sich dabei um eine ebene Oberfläche aus einem weichen Modellwerkstoff, die verhältnismäßig große Strukturen aufweist. Weiterhin treten Werkzeugtrennungen zwischen den Strukturen auf, wie sie beim Ätzen vorliegen. Nahtlose Strukturverläufe oder andere Forderungen an neue Dekore sind nicht zu erkennen. Dieses Ergebnis zeigt, dass noch große Entwicklungsaufwände bestehen.

2.3.5 Verfahrensvergleich und -bewertung

Process comparison and evaluation

In Tabelle 2-5 erfolgt die Bewertung der vorgestellten, mehrstufigen Fertigungsverfahren hinsichtlich der Herstellung einer komplex strukturierten Formnestoberfläche, der Umsetzung der in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Designtrends und der bestehenden Bedarfe im Designentwicklungsprozess. Eine Bewertung des DT-Verfahrens kann aufgrund mangelnder veröffentlichter Informationen hier nicht erfolgen. Es wird ersichtlich, dass die Umsetzung der Anforderungen mit den bestehenden Verfahren nur unzureichend erfolgen kann. Um die Bearbeitungsaufgabe erfüllen zu können, müssen dem Werkzeug- und Formenbau neue Strukturierungsverfahren zur Verfügung gestellt werden. Erhöhte Abbildungsgenauigkeit, Flexibilität und Reproduzierbarkeit sowie Reduktion von Zeit- und Kostenanteilen müssen bei der Entwicklung im Vordergrund stehen, wobei zusätzlich die Bedarfe der Designer stärker beachtet werden müssen. Tabelle 2-5 zeigt, dass das Laserstrahlabtragen noch umfangreiche Entwicklungsaufwände für eine Erfüllung aller Anforderungen aufweist. Im nachfolgenden Kapitel wird der Stand der Technik des Laserstrahlabtragens daher näher vorgestellt.

Anforderung	Ätzen	EDM		Galvanoformen	Zerspanung		Laserstrahlabtragen (Sublimation)
		μ-	Milling		UP	Mikro	
Zeitbedarf	-	o	-	-	O	o	o
Kostenbedarf	+	+	o	-	-	o	o
Strukturgröße	+	+	+	+	+	o	+
Strukturkomplexität	-	o	o	o	-	o	+
Strukturvielfalt	-	o	o	o	-	o	+
Strukturtiefe	-	+	+	o	+	+	+
Strukturgenauigkeit	o	+	+	+	(+) ¹	(+) ¹	+
Strukturvorgabe	-	o	o	-	O	o	o
Oberflächengüte	+	o	o	+	(+) ¹	(+) ¹	o
Reproduzierbarkeit	-	+	+	-	+	+	+
Werkstoffvielfalt	o	-	-	-	-	o	+
Werkzeugform	o	o	o	+	O	-	o
Bauteilgröße	+	+	+	+	-	-	o
Bauteilzugänglichkeit	+	o	+	+	-	-	o
Partielle Bearbeitung	-	o	+	o	+	+	+
Datendurchgängigkeit	-	o	+	-	+	+	o
Nacharbeitsaufwand	+	+	+	+	(+) ¹	(+) ¹	o
Prozessverfügbarkeit	+	o	o	+	-	o	o

- = nicht ausreichend erfüllt; o = mit Einschränkungen erfüllt; + = erfüllt; ()¹ = liegt über den Zielvorgaben und daher negativ

Tabelle 2-5: Fertigungspotenziale von mehrstufigen Mikro-Fertigungsverfahren

Manufacturing potentials of multi-stage micro machining processes

2.4 Laserstrahlstrukturieren

Laser beam structuring

2.4.1 Einordnung des Verfahrens in die Fertigungstechnologie – Begriffabgrenzung

Classification of the process in the production technology

Die DIN 8580 teilt die verfügbaren Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen auf. Die Hauptgruppe Trennen umfasst u. a. das Abtragen, das sich wiederum in drei Untergruppen gliedern lässt (Bild 2-16). Das gezielte Abtragen durch Laserstrahlung (Laserstrahlabtragen) zählt zu den thermischen Abtragverfahren durch Strahl und ist nach DIN V 32540 ein Sammelbegriff für unterschiedliche Verfahrensvarianten.

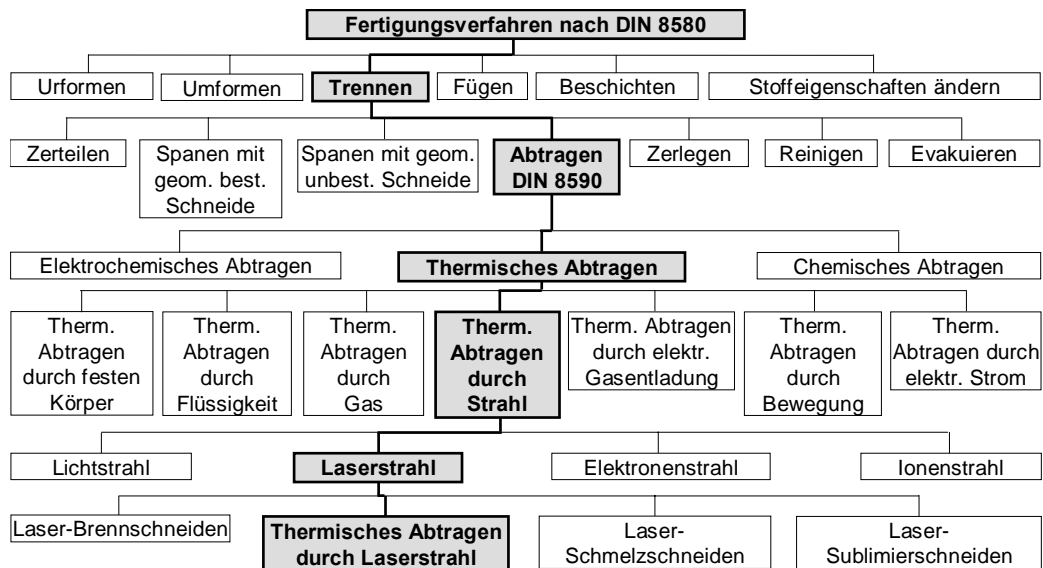


Bild 2-16: Einordnung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und DIN 8590
Classification of the production technologies according to DIN 8580 and DIN 8590

Durch die Verwendung unterschiedlicher Strahlquellen und Prozessparameter stehen beim Laserstrahlabtragen verschiedene physikalische Abtragemechanismen zur Verfügung. In Verbindung mit entsprechenden Bearbeitungsstrategien können damit unterschiedliche Anwendungen bedient werden [KLOC07, S. 201], [SCHU98, S. 5]. Bild 2-17 gibt einen Überblick über die verfügbaren Abtragemechanismen und über die wesentlichen Verfahrensvarianten.

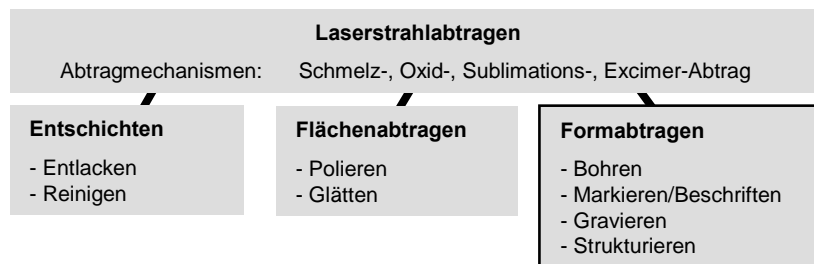


Bild 2-17: Abtragemechanismen und Verfahrensvarianten des Laserstrahlabtragens [VDI97]
Ablation mechanisms and technology varieties of the laser beam ablation process

Aus den verfügbaren Varianten des Laserstrahlabtragens ist für die hier verfolgte Anwendung das Formabtragen auszuwählen. Das Formabtragen ist gemäß DIN V 32540 als Abtrennen von Werkstoffteilchen zur gezielten Veränderung der vorhandenen Oberflächengestalt oder Geometrie des Werkstücks definiert [DINV97] und stellt wiederum einen Sammelbegriff für unterschiedliche Bearbeitungstechnologien dar (vgl. Bild 2-17). Dabei existieren in der Industrie und Wissenschaft keine eindeutigen Abgrenzungen der verwendeten Technologiebegriffe. Die am häufigsten verwendeten Begriffe werden im Folgenden vorgestellt und es wird eine begriffliche Abgrenzung vorgeschlagen:

Laserstrahlbohren

Herstellung von Bohrungen (Sack- oder Durchgangslöcher); Strukturformen sind überwiegend rund und weisen hohe Aspektverhältnisse auf; hohe Abtragpräzision.

Laserstrahlmarkieren/-beschriften

Herstellung von Sichtmarkierungen, wie z. B. Zeichen, Logos oder Barcodes; Anwendung im Spritzgießbau oder zur direkten Kennzeichnung von Bauteilen; hohe Abtragraten.

Laserstrahlgravieren

Einbringen von geometrisch bestimmten Formen (Gravuren, Kleinstkavitäten); Formtiefen größer als 200 µm; mm-Abmessungen und im Allgemeinen keine großflächige Ausdehnung; Gravuren dienen zur Abformung; hohe Abtragsvolumina bei geringer Abtragpräzision.

Laserstrahlstrukturieren

Großflächige Herstellung von komplex geformten Kleinststrukturen; Oberfläche mit zusätzlichen Funktionen versehen, wie z. B. angepasstes Reibverhalten, verbessertes Zellwachstum oder verbessertes Reinigungsverhalten; Strukturiefen zwischen 5 und 200 µm, Strukturgrößen größer 5 µm; regelmäßige oder unregelmäßige und getrennte oder vernetzte Verteilung; Struktur teilweise nicht eindeutig geometrisch definierbar; hohe Abtragpräzision und zum Teil geringe Abtragsvolumina.

Die verfolgte Aufgabenstellung ist aufgrund ihrer Anforderungen (Strukturtiefe < 200 µm, großflächige Bearbeitung, vernetzte Strukturform mit filigranen Strukturdetails) dem Laserstrahlstrukturieren zuzuordnen. In Kapitel 2.4.2 wird näher auf die verfügbaren Abtragmechanismen eingegangen, um für die hier vorliegende Aufgabenstellung einen geeigneten Mechanismus auswählen zu können.

2.4.2 Laserstrahlabtragmechanismen und deren Einsatzgebiete

Mechanisms of laser ablation and their application areas

In der Materialbearbeitung hat die Bedeutung des Lasers als Werkzeug deutlich zugenommen. Dies lässt sich u. a. mit den einzigartigen Eigenschaften des Laserlichts und der Fähigkeit, hohe Strahlungsenergie zu erzeugen, begründen. Weitere Vorteile sind das breite Werkstoffspektrum, die hohe Flexibilität, Produktivität, Präzision und Automatisierbarkeit, die Verschleißfreiheit sowie die berührungslose Bearbeitung. Allen Varianten des Laserstrahlabtrags ist gemein, dass ein fokussierter Laserstrahl auf die Bauteiloberfläche gerichtet wird. Durch Absorption in der randzonennahen Oberfläche wird die Laserenergie in thermische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad dieser Umwandlung wird maßgeblich durch den Absorptionsgrad des Werkstoffs bestimmt, wobei dieser von der Laserstrahlwellenlänge, der Oberflächenrauheit, dem Einstrahlwinkel und der Temperatur abhängt. Die vorliegende thermische Energie bewirkt eine Änderung des Aggregatzustands des Materials und dadurch erfolgt ein Abtrag [KLOC07, S. 264], [SCHU98, S. 13], [LASO00]. Tabelle 2-6 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Abtragmechanismen und über typische Verfahrensparameter bei einer Stahlbearbeitung.

Laserstrahlabtragmechanismus	Abtragsrate [mm ³ /min]	Rauheit Rz [µm]	Strukturgröße [µm]	typische Strahlquelle	Anwendungen	Typische Werkstoffe
Schmelzabtrag (s), thermisch	50 - 1000	10-100	> 100	cw-CO ₂ /-Nd:YAG	Oberflächen- und Formabtragen	Metall, Keramik
Oxidabtrag (s), pyrolytisch	5 - 20	< 10	> 100	cw-CO ₂ /-Nd:YAG	Oberflächen- und Formabtragen	Stahl
Sublimationsabtrag (s) thermisch (ns-Puls)	< 6	> 1	> 10 (Näpfchen)	gepulster-estkörper	Mikrostrukturieren, Bohren, Beschriften	Metall, Keramik, Graphit
photolytischer Abtrag (a)	< 0,1	< 1	1 - 100	gepulster-Excimer	Mikrostrukturieren	Kunststoff, Keramik (NE-Metall)

Strahlführung: (a) = abbildend; (s) = schreibend; alle angegebenen Kenngrößen gelten für die Stahlbearbeitung

Tabelle 2-6: Prozesskenngrößen von Laserstrahlabtragmechanismen [KLOC07, S. 264], [PETE98, S. 15], [POPR05a, S. 309],[SCHU98, S. 6-188]

Process characteristics of laser beam ablation mechanisms

Im Folgenden werden die Abtragmechanismen vorgestellt, wobei aufgrund der Aufgabenstellung hier nur näher auf die Bearbeitung von metallischen Werkstoffen eingegangen wird.

Beim Schmelzabtragen erfolgt ein Aufschmelzen des bestrahlten Materials, das vor allem durch den sich bildenden Dampfdruckstoß ausgetrieben wird [PETE98, S. 11, S. 142-151], [POPR05a, S. 292]. Wesentlicher Nachteil des Verfahrens ist die Diskrepanz zwischen Abtragrate und Oberflächenrauheit sowie Formtoleranz, so dass es vor allem zur Schruppbearbeitung eingesetzt wird. Weiterhin entstehen durch nicht ausgetriebenes Material Schmelzrückstände auf der Bauteiloberfläche [EBER92, S. 44-49]. Beim Oxidabtragen wird die Schmelze dagegen durch Verwendung von reinem Sauerstoff als Prozessgas nahezu vollständig oxidiert. Bei geeigneter Prozessführung hebt sich zudem eine Oxidraupe aufgrund der in der Abkühlphase induzierten Spannungen selbstständig von der Abtragspur ab. Ein stabiler Prozess ist nur in einem engen Prozessparameterfenster gewährleistet, weil es ab einem kritischen Sauerstoffdruck zu unkontrollierten exothermen Reaktionen und somit zu Prozessstörungen kommen kann. Das Laserstrahloxidabtragen eignet sich besonders zum Schlichten [KLOC07, S. 265], [PETE98, S. 13, S. 151-154], [SCHU98, S. 21-22], [BÜTJ92, S. 20]. Im Werkzeug- und Formenbau wird das sogenannte Laser-Caving (Formabtragen - Gravieren), welches eine sequenzielle Kombination des Schmelz- und Oxidabtragens darstellt, zur Herstellung von geometrisch definierten Strukturen eingesetzt. Bei der Losgröße eins bietet das Laser-Caving im Vergleich zur EDM-Bearbeitung wirtschaftliche Vorteile, wobei bei größeren Stückzahlen die Wirtschaftlichkeitsbilanz aufgrund der Mehrfachbenutzung von EDM-Werkzeugen zugunsten der EDM-Bearbeitung ausfällt [FAU99], [PETR99b], [PETE98, S. 7-10, S. 62-63], [MEIN92], [KUHL97, S. 857-865], [SCHU98, S. 23]. Aufgrund der begrenzten Prozesskenngrößen eignet sich das Laser-Caving nicht für die Herstellung von filigranen Mikrostrukturen mit nacharbeitsfreien Oberflächenqualitäten, wie sie hier gefordert werden.

Beim photolytischen Abtragen werden vor allem gepulste Excimer-Laser eingesetzt, die Wellenlängen λ zwischen 157 nm und 351 nm erzeugen. Die hohe Photonenenergie in Verbindung mit ultra-violetter Strahlung erlaubt zum Teil eine direkte atomare Materialwechselwirkung. Große Anwendung findet der photolytische Abtrag bei organischen Materialien, bei Polymeren und bei Keramiken. Metalle lassen sich aufgrund ihres Bindungstyps dagegen nur stark eingeschränkt bearbeiten. Der metallische Abtrag ist neben Recast-Ablagerungen insbesondere durch inhomogene Abtragstrukturen und sehr geringe Abtragraten gekennzeichnet [KULP00], [KULI02, S. 13] [KNIT98, S. 30, S. 162], [BÜTJ92, S. 16-17]. Erste Untersuchungen wurden zur Herstellung von tribologischen Strukturen in Umformwerkzeugen durchgeführt, wobei bei diesen neben aufwändigen Systemtechnologien unwirtschaftlich lange Prozesszeiten vorlagen [POPP06]. Aufgrund des inhomogenen Excimer-Rohstrahls wird zur Herstellung von Mikrostrukturen überwiegend die unflexible und kostenintensive Maskenprojektion eingesetzt. Es ist dabei nur eine schichtweise Bearbeitung von ebenen Oberflächen möglich [KNIT98, S. 22-23, S. 107], [MOMM95]. Eine Erweiterung der Strukturflexibilität stellt das 3D-Spotverfahren dar. Dabei wird über eine Scannereinheit ein optisch geformter Excimer-Strahl in der Ebene abgelenkt. Aufgrund der aufwändigen und prototypenhaften Systemtechnologie erfolgt noch kein industrieller Einsatz [KULI02, S. 30], [BÜTJ92, S. 123]. Wegen der mangelnden Strukturflexibilität und des eingeschränkten Metallabtrags eignet sich der photolytische Abtrag mit Excimer nicht zur Herstellung von Designstrukturen in komplexen Werkzeugoberflächen.

Der Sublimationsabtrag ist ein thermischer Abtragprozess, bei dem im Idealfall eine direkte Phasenumwandlung des bestrahlten Werkstoffs vom festen in den gasförmigen Zustand erfolgt. Läßiger untergliedert den Laserabtrag in fünf Phasen, die in Bild 2-18 schematisch am Beispiel der Sublimation dargestellt sind [LÄSS94, S. 24-26]:

1. Phase – Absorption: Umwandlung von Laserenergie in Wärme
2. Phase – Aufheizen: Wärmeleitung ins Bauteilinnere
3. Phase – Aufschmelzen: nach Überschreiten der Schmelztemperatur bildet sich innerhalb der Einwirkdauer ein Schmelzbad aus
4. Phase – Verdampfen: nach Überschreiten der Verdampfungstemperatur erfolgt ein Verdampfen des Werkstoffs an der Oberfläche
5. Phase – Schmelzaustrieb: ab einer materialabhängigen Grenzintensität treibt der Dampfdruck des Materialdampfs die Schmelze am Rand der Bearbeitungszone aus

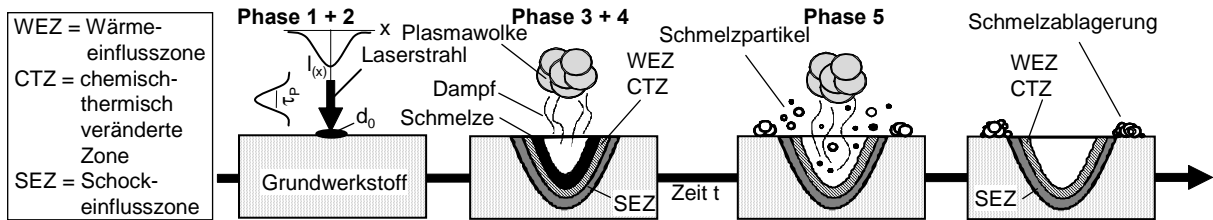


Bild 2-18: Phasen des Laserabtrags am Beispiel der Sublimation

Stages of the laser ablation process demonstrated by sublimation

Für den Sublimationsabtrag von Metallen muss die Pulslänge τ_p und die Laserstrahlintensität I so angepasst werden, dass die entstehende Schmelzfilmdicke s_{Schmelz} sehr viel kleiner als der Strahldurchmesser d_0 auf der Werkstückoberfläche ist. Die für einen vollständigen Sublimationsabtrag erforderlichen Intensitäten sind stark vom Werkstoff abhängig. Nach [POPR02] ist für die Sublimation von Eisen eine mittlere Laserstrahlintensität von I größer als $3,4 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ notwendig. Falls die nutzbaren Strahlintensitäten geringer sind, erfolgt ein ineffizienter, hybrider Materialabtrag aus Sublimations- und Schmelzabtrag. Aufgrund der hohen Temperaturen, hervorgerufen durch Intensitäten I größer als 10^8 W/cm^2 , bildet sich jedoch sofort aus den ionisierten Abtragprodukten eine sich in Lasereinfallsrichtung ausdehnende Plasmawolke, die sich im Allgemeinen mit hoher Geschwindigkeit [$\mu\text{m/ns}$] von der Oberfläche wegbewegt [LIYA01, S. 8], [GILL00], [LÄSS94, S. 17]. Falls die Plasmawolke noch Kontakt mit der Oberfläche hat, wird die Laserstrahlung isotrop über die Plasmaoberfläche in das Werkstück eingekoppelt. Dies führt zu einer erhöhten Leistungseinkopplung. Die Intensitäten sollten jedoch geringer als die werkstoffspezifische Plasmaabschirmschwelle sein, weil sonst die Oberfläche durch die sich abhebende Plasmawolke von der Laserstrahlung abgeschirmt und dadurch der Prozess erheblich gestört wird (laser-supported detonation waves). Dieser Effekt kann nach Poprawe durch eine Bearbeitung im Vakuum oder durch kurze Pulslängen verringert werden [POPR05a, S. 110], [SCHM02, S. 23-24], [WEIK06, S. 103].

Zum Erzielen hoher Strahlintensitäten werden gepulste Festkörperlaser mit einem gaußschen Strahl-Mode (TEM_{00}) und einer Strahlqualität von nahezu $M^2 \approx 1$ eingesetzt, so dass eine gute Fokussierbarkeit vorliegt. Durch eine Wellenlängenmodulation kann die werkstoffabhängige Absorption angepasst werden, so dass ein breites Werkstoffspektrum bearbeitbar ist: Metalle, Keramiken und Kunststoffe [KLOC07, S. 268], [GILL06], [DU04]. Durch den Pulsbetrieb entsteht bei jedem Laserpuls ein kraterförmiges Abtragnäpfchen auf der Oberfläche. Durch ein Zusammensetzen von Einzelpulsen können geometrische Strukturen realisiert werden. Die Strahlablenkung erfolgt dabei überwiegend über Galvanoscanner. Durchmesser und Tiefe eines Einzelpulses werden primär von den thermisch-mechanischen Eigenschaften des Materials sowie von den Prozessparametern beeinflusst. Eine Verkürzung der Pulslänge bewirkt grundsätzlich eine Erhöhung der Abtragqualität [GILL00], [HERR04a, S. 230].

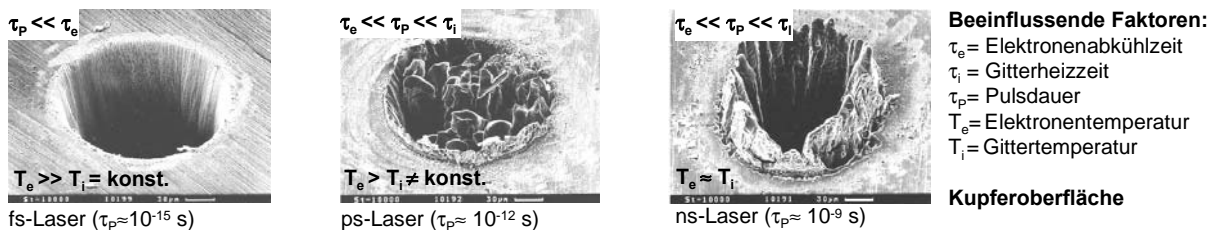


Bild 2-19: Pulsabtrag bei variiertem Pulslänge τ_p [HERR04a, S. 234]

Pulse ablation with varied pulse lengths

Bild 2-19 zeigt den Pulsabtrag in einer Kupferoberfläche in Abhängigkeit von der Pulslänge τ_p . Bei fs-Pulsen werden überwiegend einzelne Atome aus ihrem Gitter herausgelöst, weil die Energiedeposition schneller als die Wärmedissipation ist. Es liegt somit eine nahezu vollständige Sublimation, auch kalte Ablation genannt, vor. Bei ps-Pulsen sind dagegen erste Anzeichen einer Wärmeleitung an die Umgebung zu beobachten, so dass erste Oberflächenrandzonenbeeinflussungen vorliegen. Bei fs- und ps-Pulsen liegen jedoch geringe Abtragraten pro

Puls vor. Durch die Recast-freie Bearbeitung liegt eine hohe Abtragpräzision vor. Das präzise Arbeiten mit fs- und ps-Pulsen wird außerdem durch die logarithmische Abhängigkeit der Ablationstiefe von der absorbierten Laserleistung begünstigt, so dass der Abtrag pro Puls sehr genau eingestellt werden kann. Aufgrund des Strahlprofils können Strukturgrößen hergestellt werden, die kleiner als der Laserfokussdurchmesser sind. Durch zum Teil auftretende Multiphotonen-Absorption im Werkstoff ist der Abtragprozess nahezu wellenlängenunabhängig. Geringe Abtragraten, noch im Anfangsstadium stehende Applikationsforschung und fehlende robuste Strahlquellen führen jedoch dazu, dass Laser mit Pulslängen im fs- und ps-Bereich überwiegend nur zu Forschungszwecken eingesetzt werden. Es liegen noch keine fundierten Erkenntnisse über die physikalischen Zusammenhänge der nichtlinearen Abtragmechanismen vor. Mit dem Einsatz der Kurzpuls-Technologie werden jedoch in Zukunft hohe Fertigungspotenziale bei der Herstellung von Mikrostrukturen und -bohrungen erwartet [HERR04b], [WEIK06, S. 26-27], [SOMM04], [BREI03], [REIS00], [BLOC05, S. 8], [DAUS04, S. 40-44], [BECH06, S. 16], [WEIK06, S. 103-104], [NOLT99, S. 2].

Der Abtrag durch ns-Pulse wird dagegen durch die längere Bestrahlungsdauer und die somit auftretenden Materialwechselwirkungen bestimmt. Nach einem ns-Puls haben sich die Gitter- und die Elektronentemperatur angeglichen, so dass große Teile der Laserenergie durch Wärmeleitung an das Bauteil verloren gehen. Dies führt dazu, dass es zu Verdampfung und Schmelzung außerhalb des bestrahlten Bereichs kommt. Schmelzanteile werden teilweise durch den Plasmadruck herausgeschleudert und können an der Oberfläche wieder erstarren (Recast). Weiterhin tritt das ausgeworfene Material in Wechselwirkung mit dem Laserpuls, so dass durch Totalabsorption ein Teil des Pulses abgeschnitten wird und somit eine Effizienzverminderung vorliegt [POPR05a, S. 312-313], [BECH06, S. 12-13], [GILL00], [WEIK06, S. 26-27].

Die Randzone eines Sublimationsabtrags mit ns-Pulsen kann je nach Werkstoff durch nachfolgende Oberflächenbeeinflussungen gekennzeichnet werden, die in Bild 2-20 verdeutlicht werden. Es liegen dabei Parallelen zur Funkenerosion vor [KLOC07, S. 67], [LIYA01, S. 12-17], [ALLM95], [GILL00]:

- Schmelzablagerungen = auf der Oberfläche verteiltes, wiedererstartetes Schmelzmaterial, das meist einen Kraterrand bildet (partieller Recast)
- Weiße Schicht (CTZ) = erzeugte Oberflächenschicht – Recast-Layer (Dicke < 20 µm)
- Gefügeveränderungen = thermisch beeinflusste Veränderung des Grundgefüges – Umwandlungszone (Dicke < 30 µm) (WEZ)
- Eigenspannungen im oberflächennahen Gefüge durch Schockeinflusszone (SEZ)
- Oberflächenrisse insbesondere bei sprödharten Werkstoffen (Keramiken)

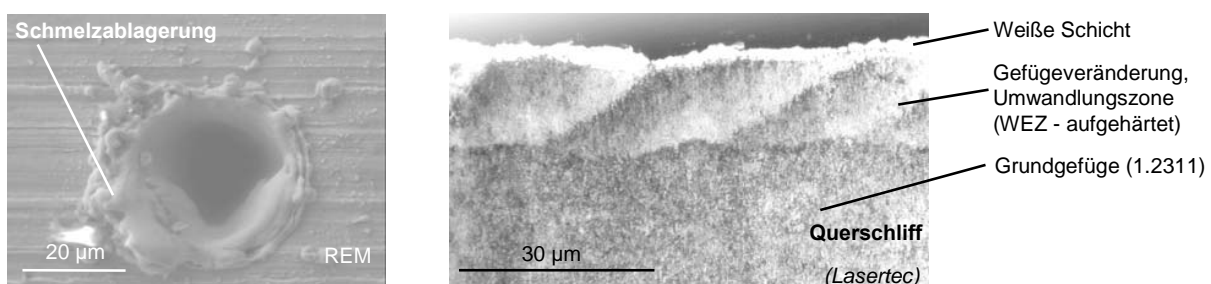


Bild 2-20: Oberflächenbeeinflussungen durch Sublimation

Influences of sublimation on a surface

Der ns-Abtrag wird industriell eingesetzt, um funktionale Mikrostrukturen und filigrane Bohrungen herzustellen, Bauteilschichten definiert abzutragen (Reinigen, Entlacken) oder Material gezielt zu trennen. Unter funktionalen Strukturen werden u. a. Beschriftungen, tribologisch wirksame Strukturen oder Mikrokavitäten verstanden. Aufgrund der bestehenden Systemtechnologie erfolgt nur eine schichtweise Bearbeitung von ebenen Oberflächen oder von rotations-symmetrischen Mantelflächen [POPR06], [POPR05a, S. 291-318; S. 341-351], [KORD04], [FLEI05a, S. 889-891], [KRAC04], [BERG00, S. 15], [CSER05, S. 18], [HOPP05], [KORD03], [KLOC04b].

Da Werkstoff, Wellenlänge, Pulslänge und Strahlintensität erhebliche Einflüsse auf den Prozess haben, wird eine genauere theoretische Betrachtung des Abtragprozesses erst nach vollständiger Untersuchung des hier genutzten Laserstrahlsystems durchgeführt (Kap. 7.2).

2.4.3 Laserstrahlabtragen im Werkzeug- und Formenbau

Laser beam ablation in the tool and die making

Das Laserstrahlabtragen basierend auf ns-Sublimation wird bereits im Werkzeugbau industriell eingesetzt. Bild 2-21 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Anwendungen.

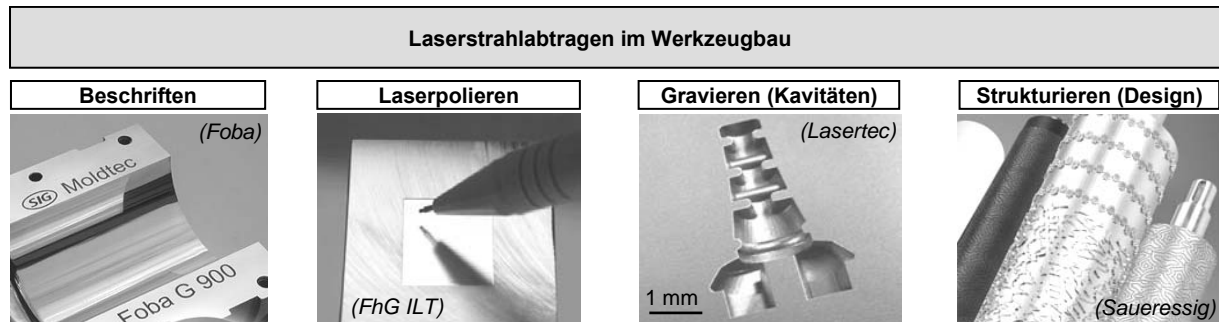


Bild 2-21: Überblick über Laserstrahlabtragen im Werkzeugbau

Overview of laser beam ablation in tool making

Zur Herstellung von Werkzeugbeschriftungen sind am Markt eine Vielzahl von Anlagen verfügbar. Es können überwiegend ebene und rotationssymmetrische Oberflächen bearbeitet werden. Die Anlagen verfügen über spezielle Steuerungs- und Programmiersysteme, die vektorbasierte Textdaten, z. B. in Form einer AutoCAD-Datei, verarbeiten können.

Das Laserpolieren von metallischen Oberflächen ist ein mehrstufiger Prozess aus flächigem Umschmelzen und lokaler Sublimation. Je nach Ausgangsrauheit kann die Oberflächenrauheit bei Stählen auf bis zu $Ra > 0,15 \mu\text{m}$ reduziert werden [WILL03], [WISS04]. Obwohl beim Laserpolieren eine dem Laserstrahlabtragen ähnliche Systemtechnologie genutzt wird, bestimmen andere physikalische Mechanismen den Prozess. Das Bauteilspektrum und das Arbeitsergebnis sind derzeit noch sehr begrenzt, was insbesondere auf umfangreiche Einschränkungen in der Anlagen-, Steuerungs- und CAx-Technologie sowie auf eingeschränktes Prozessverständnis zurückzuführen ist.

Dem Werkzeug- und Formenbau stehen spezielle Laserstrahlabtraganlagen zur Herstellung von filigranen Gravuren in Werkzeugoberflächen zur Verfügung. Diese Anlagen nutzen meist den Sublimationsabtrag und weisen daher vergleichbare Systemkomponenten auf. Sie lassen sich in Handhabungseinheit, Strahlerzeugung, -formung und -ablenkung sowie Programmier- und Steuerungssystem untergliedern. Die Systemlösungen der Firmen Lasertec, Foba, und Alltec Laser weisen aufgrund ihrer Spezifikationen die größten Leistungsfähigkeiten auf. Diese Anlagen werden als Erweiterung zum Mikrofräsen oder -erodieren angeboten.

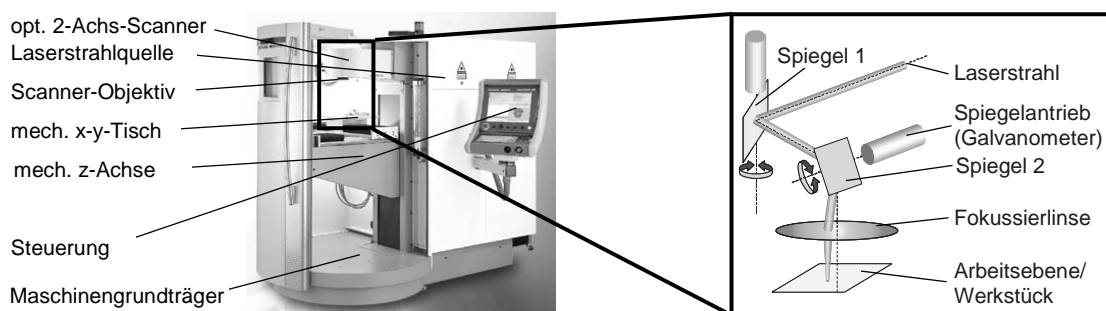


Bild 2-22: Laserstrahlgravieranlage DML 40 SI (Lasertec), [SCHM02, S. 30]

Laser beam engraving machine DML 40 SI

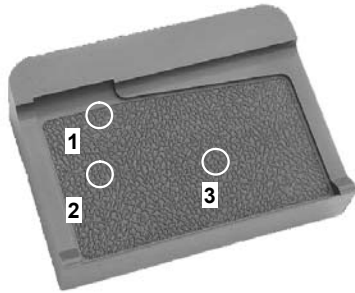
In Bild 2-22 (links) ist exemplarisch eine DML 40 SI der Firma Lasertec dargestellt, die einen typischen Aufbau für eine Laserstrahlabtraganlage aufweist. Die Anlage basiert auf einer 3-Achs-Handhabungsanlage, in denen ein 2-Achs-Scannersystem zur Strahlableitung und optional eine Dreheinheit integriert sind (Bild 2-22, rechts). Die translatorischen und rotatorischen Achsen werden lediglich zur Bauteilpositionierung genutzt, so dass nur ebene Oberflächen bzw. rotationssymmetrische Mantelflächen in einem 2½D-Abtragprozess bearbeitet werden können. Aufgrund der begrenzten Scannerarbeitsfeldgrößen ist der Arbeitsraum eingeschränkt und bei der Bearbeitung von größeren Flächen muss eine Kachelung der Arbeitsfelder erfolgen. Dabei entstehen ungewollte Nahtstellen, die durch aufwändige Nacharbeitsschritte entfernt werden müssen. Es werden überwiegend lampengepumpte Nd:YAG-Laser genutzt, die aufgrund ihrer langen Pulslängen ($\tau_P > 100 \text{ ns}$) erhebliche Materialwechselwirkungen wie z. B. Schmelzablagerungen hervorrufen. Die Oberflächen müssen aufwändig nachgearbeitet werden (Bürsten, Ultraschallbad, Sandstrahlen, CO₂-Strahlen). Die verwendeten Steuerungen und Programmiersysteme sind meist Eigenentwicklungen der Hersteller, so dass hoher Ausbildungsaufwand für den Nutzer besteht. Eine großflächige Strukturierung mit filigranen und komplexen Designstrukturen kann aufgrund der unzureichend handhabbaren Datenmenge nicht erfolgen. Schnittstellen für messtechnisch aufgenommene Strukturen fehlen. Standardisierte CAM-Systeme können zur Programmierung der Bearbeitungsaufgabe nur sehr bedingt genutzt werden. Technologiedatenbanken mit prozesssicheren Bearbeitungsparametern fehlen, so dass Parameterzusammenhänge für den Werkzeugbauer nur schwer greifbar sind. Entsprechendes Prozess-Know-how muss von den Unternehmen selbstständig aufgebaut werden. Entwicklungsbedarfe bestehen vor allem in den CAM- und Steuerungssystemen und in der Prozesstechnologie. Mit den Anlagen der Firma Lasertec können Strukturgrößen größer als 100 µm hergestellt werden, wobei nach Aussagen des Herstellers Abtragraten V_{Abtrag} von bis zu 6 mm³/min und Rauheiten Ra größer als 1 µm bei Stahl vorliegen [SIEB03], [KUHL06], [WITT05], [KUHL05], [KUHL04], [GILL05], [EIMA05] [KRAC02].

Für eine objektive Beurteilung der Fertigung von Designstrukturabformwerkzeugen durch Laserstrahlabtragen (Strukturieren) muss die Herstellung von Prägewalzen und von Spritzgießwerkzeugen getrennt voneinander betrachtet werden.

Prägewalzen sind Werkzeuge zur Großserienherstellung z. B. von genarbten Tapeten oder von synthetischen Automobil-Interieur-Häuten. Neben der konventionellen Fertigung wie Ätzen oder Galvanotechnik werden bereits für einige ausgewählte Walzwerkstoffe spezielle Lasergravurtechniken eingesetzt. Die laserbasierten Verfahrenstechnologien (Laser-Direktgravuren) wurden von unterschiedlichen Unternehmen unabhängig voneinander parallel entwickelt. Wegen der Wettbewerbssituation sind jedoch nur wenige technologische Informationen verfügbar. Nach Angaben der Unternehmen Saueressig GmbH und Wetzel GmbH handelt es sich dabei um eine zeilenweise Bearbeitung parallel zur Drehachse der rotationssymmetrischen Mantelfläche mit einem fokussierten Laserstrahl. Der Abtragmechanismus basiert auf Sublimation. Eine konturnahe Bearbeitung von Freiformoberflächen kann durch die Systemtechnologie jedoch nicht erfolgen. Wetzel erzielt bei Aluminiumwerkstoffen Oberflächenrauheiten mit Ra kleiner als 10 µm und Abtragraten V_{Abtrag} kleiner als 9 mm³/min, für Stahl liegen keine Angaben vor [BERG00, S. 89-93], [JENK03]. Informationen zu den fertigen Strukturgrößen sind nicht verfügbar. Gemäß den veröffentlichten Produktbildern der Unternehmen können die Strukturabmessungen auf eine Größe > 200 µm geschätzt werden. Die Vorgehensweise hinsichtlich der digitalen Strukturbeschreibung und der NC-Datenprogrammierung ist nicht bekannt. Aufgrund der zeilenweisen Bearbeitung treten keine Nahtstellenprobleme auf. In den Ausführungen von Weikert wird eine prototypenhafte Herstellung von Präge- und Druckwalzen aus Kupfer mittels ps-Laserstrahlstrukturieren gezeigt, wobei die Walzen eine Auflösung von 200 DPI aufweisen. Jeder Dot bzw. Laserabtrag besitzt eine Tiefe von 20 µm und wird aus 100 einzelnen, überlagerten Einzellaserpulsen hergestellt. Mit der verfügbaren Anlagentechnologie kann jedoch nur eine sehr geringe Fertigungsgeschwindigkeit von ca. 8 Dots/s erzielt werden [WEIK06, S. 101-102].

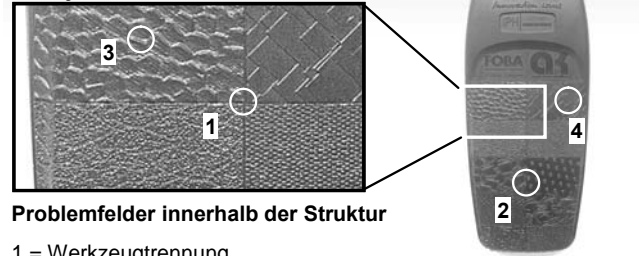
Erfahrungen auf dem Gebiet der großflächigen Laserstrukturierung von metallischen Spritzgießwerkzeugen sind kaum veröffentlicht. Die Firma Foba aus Lüdenscheid zeigt in ihrem Anwendungsspektrum strukturierte Bauteiloberflächen. Informationen über Werkstoffe, Größenverhältnisse oder die eingesetzte CAX-Technologie sind nicht verfügbar, so dass der Stand der prozesstechnologischen Entwicklung nicht aufgenommen werden kann. Das in Bild 2-23 dargestellte Gehäuse eines Mobilfunktelefons weist erkennbare Werkzeugtrennungen bei Strukturwechseln, eine ebene Oberfläche, eine geringe Strukturkomplexität und kleine Strukturfelder aufgrund begrenzter Scannerfeldgrößen auf. Diese Problemfelder lassen auf eine unzureichende Systemtechnologie schließen [KÖST06].

Werkzeugeinsatz



(FOBA)

Handyschale



Problemfelder innerhalb der Struktur

- 1 = Werkzeugtrennung
- 2 = ebene Oberfläche
- 3 = geringe Strukturkomplexität
- 4 = kleines Strukturfeld (Scannerfeldgröße)

(Antonius
Köster
Modellbau)

Bild 2-23: Strukturierter Werkzeugeinsatz (links) und strukturiertes Gehäuse eines Mobilfunkgerätes (rechts)

Structured tool insert (left) and structured body of a mobile phone (right)

In den Arbeiten von Yeh und Läßiger wurden Untersuchungen zum Einfluss von Bearbeitungsparametern auf die Oberflächen- und Werkstoffeigenschaften beim Laserstrahlabtragen vorgestellt [YEH01], [LÄSS94]. Alle Untersuchungen wurden dabei auf ebenen Oberflächen mit Strukturen geringer Komplexität durchgeführt. Yeh stellt einen mikrostrukturierten Stahlwerkzeugeinsatz (1.2379) mittels Scannerbearbeitung her, in dem Nuten mit einer Abtragtiefe von 500 µm und einer Rauheit im Abtraggrund von $R_z = 7,65 \mu\text{m}$ eingebracht wurden. Angaben über Abtragraten oder verwendete Bearbeitungsstrategien fehlen. Die verfügbare Anlagentechnik und das Prozesswissen ermöglichen keine großflächige Strukturierung von Freiformoberflächen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aim and approach

Kunststoffprodukte haben vielfältige Einsatzzwecke. Sie bilden bei Konsumgütern überwiegend die sichtbaren Außenflächen. Durch Oberflächenstrukturen kann das optische und haptische Erscheinungsbild des Gesamtprodukts gezielt verändert werden, um neben einer optischen Produktdifferenzierung eine Steigerung des Qualitätseindrucks und somit des Produktabsatzes zu erzielen. Auf den zunehmenden Wettbewerbsdruck reagieren Unternehmen mit einer kontinuierlichen Neuentwicklung von Designstrukturen. An zukünftige Oberflächendesigns im Automobilinnenraum werden u. a. die nachfolgenden Anforderungen gestellt:

- uneingeschränkte Strukturflexibilität: Realisierung von natürlichen oder technologischen (synthetischen) Designs, mit zum Teil filigranen Abmessungen
- hochqualitative Optik und authentische Haptik
- reproduzierbare, abbildungsgenaue und verzerrungsfreie Übertragung auf ebene und gewölbte Oberflächen (sowohl daten- als auch fertigungstechnisch)
- wechselnde Designs mit nahtlosen Übergängen auf einer Oberfläche, wie auslaufende Strukturen oder Struktur-Morphing
- partielle Anpassung zur Erfüllung zusätzlicher technologischer Funktionen, wie die Verbesserung der Entformbarkeit kritischer Bereiche durch gezielte Tiefenänderung

Die industrielle Herstellung von Kunststoffoberflächen mit derart komplexen Designstrukturen kann mit den derzeit verfügbaren Prozessketten nur sehr eingeschränkt und mit zum Teil unwirtschaftlich hohen Zeit- und Kostenpotenzialen erfolgen. Daher sind solche Designstrukturen kaum am Markt zu finden. Innerhalb des Entwicklungsprozesses werden zur Evaluierung verschiedener Strukturen zunehmend Designmusterplatten im Serienwerkstoff gefordert, die aufgrund der geringen Flexibilität der zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren nicht bereitgestellt werden können. Kurzfristige Designänderungen können teils nur mit einem hohen Kostenaufwand ermöglicht werden. Dies ist auf die unzureichende Anpassung der Prozesstechnologie an die veränderten Anforderungen der Designstrukturherstellung zurückzuführen. Das Kunststoffspritzgießen bietet derzeit aufgrund seiner prozesstechnologischen Eigenschaften die größten Fertigungspotenziale. Entscheidend für den erfolgreichen Einsatz dieser Technologie ist jedoch die Leistungsfähigkeit des Fertigungsverfahrens zur Herstellung der abformenden Negativ-Strukturen in die Werkzeugoberfläche. Die vorherrschenden Prozessketten, wie das Fotoätz- oder das Galvanoformen, verfügen nicht über die nötige Fertigungsflexibilität. Die produktionstechnologische Umsetzung der neu entwickelten Designstrukturen wird somit deutlich eingeschränkt. Die benötigten datentechnischen Schnittstellen zwischen Design- und Fertigungsprozess sind lückenhaft. Durch eine einzelne Technologie kann diese umfangreiche Aufgabenstellung nicht erfüllt werden. Es wird demnach eine durchgängige Prozesskette benötigt, welche eine abbildungsfehlerfreie und reproduzierbare fertigungstechnische Umsetzung der Strukturen ermöglicht. Die kürzeren Produktlebenszyklen erfordern zudem eine flexible, schnelle und kostengünstige Fertigung.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer ganzheitlichen Prozesskette, basierend auf konturnahem Laserstrahlstrukturieren, zur flexiblen und abbildungsgenaue Herstellung von abformbaren Designstrukturen in Kunststoffspritzgießwerkzeugen. Dabei soll der Entwicklungsschwerpunkt nicht nur auf dem eigentlichen Laserstrahlprozess, sondern auch auf einer datendurchgängigen CAx-Technologie und auf einer Kombination der gesamten Systemtechnologie zu einem Maschinendemonstrator liegen. Durch geeignete Schnittstellen sollen die einzelnen Systemkomponenten modular zur Prozesskette verknüpft werden. Anhand von durchgeführten Pilotanwendungen und anschließender Abformung soll die technologische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Prozesskette demonstriert werden. Dadurch sollen die Voraussetzungen für eine möglichst breite industrielle Umsetzung geschaffen werden. Es ergeben sich demnach drei voneinander abhängige Entwicklungsschwerpunkte, die sich durch drei Systemkomponenten beschreiben lassen:

Flexible und modulare Laserstrahlstrukturieranlage zur seriennahen Fertigung

Das Zusammenführen der einzelnen Systemkomponenten – CAX- und Laserstrahltechnologie – zu einem Gesamtsystem erfolgt in einem Maschinendemonstrator. Dabei soll ein modulares Konzept realisiert werden, das eine Technologieportierung auf andere Handhabungsanlagen ermöglicht. Mit dem Maschinendemonstrator werden die prozesstechnologischen Untersuchungen und die Bearbeitung von Pilotanwendungen durchgeführt. Dabei sollen nachfolgende Arbeiten durchgeführt werden:

- *Aufbau eines Maschinendemonstrators zum konturnahen Laserstrahlstrukturieren durch modulare Integration eines 3-Achs-Lasersystems in eine 5-Achs-Handhabungsanlage*
- *Untersuchung der Einflüsse der eingesetzten Systemkomponenten und deren veränderbarer Größen auf prozessrelevante Parameter, wie Fokusbereich und -lage sowie Strahlqualität und Laserstrahlintensitätsverteilung, als Grundlage eines stabilen und robusten Laserstrahlstrukturierprozesses*

Durchgängige CAX-Technologie

Für eine anwendungsnahe und leistungsfähige Prozesskette ist eine datendurchgängige CAX-Technologie zwingend erforderlich. Sie stellt das Bindeglied zwischen Design-Erstellung und Fertigungstechnik dar und bestimmt somit maßgeblich die Produktivität des gesamten Prozesses. Es existieren derzeit nur Insellösungen zur Generierung entsprechender Bearbeitungsdaten für das hier einzusetzende Laserstrahlstrukturieren. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diesbezüglich folgende Teilziele bearbeitet werden:

- *Definition von Anforderungen an messtechnische Verfahren zur Aufnahme von Referenzstrukturen, u. a. Datenmenge und -qualität sowie Messauflösung*
- *Optimierung der datentechnischen Überführung sowohl von messtechnisch aufgenommenen als auch von durch CAD entwickelten Designstrukturen auf Bauteiloberflächen*
- *Realisierung einer Verknüpfung von Handhabungsanlage und modularem Laserstrahlstrukturiersystem zur großflächigen und konturnahen Oberflächenbearbeitung*
- *Identifizierung von Programmerroutinen zur NC-Datengenerierung*
- *Entwicklung eines universalen Softwaremoduls zur Überführung von ISO-NC-Daten in Steuerungskommandos für das Laserstrahlstrukturiersystem (Maschinendemonstrator)*

Konturnahes Laserstrahlstrukturieren von komplexen Designstrukturen

Stand der Laserstrahlabtragtechnologie ist die Herstellung von Werkzeuggravuren in Ergänzung zum Mikroerodieren und -fräsen sowie die Beschriftung von überwiegend ebenen Oberflächen mit einfachen Strukturen. Die Herstellung von großflächigen, zusammenhängenden Designstrukturen auf ebenen bzw. auf frei geformten Bauteiloberflächen ist aufgrund des nicht ausreichend vorliegenden Prozesswissens und der nicht verfügbaren Anlagentechnik derzeit nicht möglich. Aus dem bisherigen Kenntnisstand lassen sich insbesondere zwei Themenbereiche erschließen, zu denen weitergehende Untersuchungen notwendig sind. So sind die durch Laserstrahlstrukturieren erreichbaren Abtragsvolumina, Genauigkeiten, Oberflächengüten und minimalen Strukturgrößen oft kontrovers diskutierte Prozesskennwerte, weil hierzu spezielle systematische Analysen nicht ausreichend vorliegen. Der zweite Bereich umfasst die Entwicklung einer Prozesstechnologie zur flexiblen, großflächigen Bearbeitung von ebenen und gewölbten Oberflächen, welche einer umfangreichen systematischen Betrachtung und der Entwicklung von entsprechenden Softwaremodulen bedarf. Hieraus lassen sich folgende Teilziele ableiten:

- *Erweiterung des Prozessverständnisses durch Untersuchung der Einflüsse der Systemparameter (wie Pulsenergie und -länge, Strahlqualität, Fokusbereich und -lage und Scangeschwindigkeit), des Werkstoffs (z. B. Material und Oberflächenzustand) und der Umgebung auf die Qualität und Quantität des Abtrags (beispielsweise Abtragraten und -rauheiten, Prozessrückstände sowie Materialbeeinflussungen)*
- *Entwicklung von Bearbeitungsstrategien zum konturnahen und großflächigen Laserstrahlstrukturieren*
- *Herstellung von komplexen Strukturen zum Aufbau einer Prozessparameterdatenbank als Basis des CAX-Systems*

In Kapitel 2 wurde bereits unter Berücksichtigung des **Standes der technologischen Entwicklung** der Bedarf an eine neue Prozesskette aus Sicht der Designentwicklung und des Spritzgießwerkzeugbaus erarbeitet. Die Vorstellung der grundlegenden physikalischen Mechanismen des Laserstrahlstrukturierens ist Basis für die Erarbeitung der relevanten Prozessparameter und ihrer Zusammenhänge.

In Kapitel 4 erfolgt die **Gestaltung der Prozesskette** durch geeignete Einzelprozesse und Schnittstellen. Schwerpunkt stellt dabei die **Erarbeitung einer neuartigen Kernstrategie** für die eingesetzte Fertigungstechnologie – Laserstrahlstrukturieren – dar. Durch die Kernstrategie können die Anforderungen der Industrie an eine neue Prozesskette zur Oberflächenstrukturierung umgesetzt werden. Die Kernstrategie erfordert umfangreiche Entwicklungen auf den Gebieten der CAM-, Anlagen- und Prozesstechnologie. In den nachfolgenden Kapiteln werden die entsprechenden Entwicklungen zur industriellen Realisierung der Kernstrategie bzw. der Prozesskette durchgeführt.

In Kapitel 5 werden der **Aufbau eines Lasermoduls**, dessen Integration in eine Handhabungsanlage sowie eine Analyse der wesentlichen, anlagenseitigen Parameter beschrieben.

Schwerpunkt von Kapitel 6 ist die **Entwicklung eines CAx-Moduls** zur Generierung von Bearbeitungsdaten für die aufgebaute Laserstrahlstrukturieranlage. Neben der Qualifizierung geeigneter optischer Messverfahren zur Aufnahme einer Datenbasis anhand von Referenzstrukturen und deren Datenaufbereitung wird die Erstellung von Designstrukturen am CAD untersucht. Zur Umsetzung der Kernstrategie werden geeignete Softwarealgorithmen identifiziert und auf ihre Leistungsfähigkeit hin bewertet. Dabei ist das datentechnische Aufbringen von Designstrukturen auf Bauteiloberflächen eine wichtige Schlüsseltechnologie. Daraufhin wird das im Vorfeld erarbeitete Steuerungskonzept durch geeignete Softwareapplikationen sowie maschinenseitige Erweiterungen und Modifikationen für eine automatisierte Fertigung umgesetzt.

In Kapitel 7 wird das **Laserstrahlstrukturieren** entsprechend der erarbeiteten Kernstrategie in Form von prozesstechnologischen Untersuchungen weiterentwickelt. Dazu erfolgt im Vorfeld eine grundlegende Betrachtung des hier vorliegenden Laserstrahlabtragprozesses, wie er sich aus der Integration des Lasermoduls in die Handhabungsanlage und der Untersuchung der verschiedenen Systemeinflüsse ergibt. Dadurch können bei den nachfolgenden Prozessuntersuchungen auftretende Phänomene physikalisch erklärt werden. Es wird eine Versuchsplanung durchgeführt, die eine Auswahl geeigneter Strukturen, Werkstoffe und Bearbeitungsoberflächen enthält. Im Vordergrund der Untersuchungen steht dabei die Frage nach einer optimalen Bauteilqualität bei minimaler Bearbeitungszeit für den angestrebten Anwendungsfall und dessen Anforderungen. Die Bauteilqualität und die Bearbeitungszeit hängen von einer Vielzahl von Parametern ab, so dass eine Systematisierung der Prozesseinstellungen notwendig ist. Es werden verschiedene Techniken und Algorithmen entwickelt und hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht. Für eine Freiformoberflächenbearbeitung werden grundlegende Ansätze erarbeitet. Dazu werden prozesstechnologische Untersuchungen zur Bearbeitungen von Regeloberflächen durchgeführt.

Durch **Pilotanwendungen** in Form einer Bearbeitung von Spritzgießwerkzeugen und weiteren Bauteilen mit funktionalen, mikrostrukturierten Oberflächen sollen die Verfahrensmöglichkeiten und -grenzen der Prozesskette aufgezeigt werden, um die Grundlage für eine möglichst breite industrielle Umsetzung zu schaffen (Kapitel 8).

Eine **Zusammenfassung** und ein **Ausblick** schließen die Arbeit in Kapitel 9 ab.

4 Gestaltung der Prozesskette und der Kernstrategie

Development of the process chain and of the main strategy

Zu Beginn des Kapitels erfolgt eine Einführung in die Systematik der Prozesskettengestaltung. Anhand der wesentlichen Ansätze erfolgt die Modellierung der Prozesskette. Dabei werden sowohl die benötigten Einzelprozesse vorgestellt als auch die wichtigen Schnittstellen definiert. Eine Umsetzung der hier verfolgten Oberflächenstrukturierung durch das Laserstrahlstrukturieren erfordert den Einsatz einer neuartigen Bearbeitungsstrategie, die im Folgenden als Kernstrategie bezeichnet wird.

4.1 Systematik der Prozesskettengestaltung

Systematic of the process chain development

Die zielgerichtete Gestaltung einer neuen, leistungsfähigen Prozesskette bedarf einer systematischen Vorgehensweise. In der Literatur sind dazu zahlreiche methodische Ansätze beschrieben. Gemeinsamer Kernaspekt ist dabei, dass die Vielfalt der Einzelprozesse, die alternativ, teilweise aber auch ergänzend zum Einsatz kommen können, genauso überblickt werden müssen wie die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Kettengliedern. Auftretende Wechselwirkungen müssen durch geeignete Schnittstellen, eventuell in Form von zusätzlichen Systemkomponenten, berücksichtigt werden [KNOC04, S. 1-2], [FALL00, S. 99], [KLOC01b, S. 1], [KLOC02, S. 31-34], [DENK05, S. 866-871]. Es wird ersichtlich, dass die Durchgängigkeit und somit die Leistungsfähigkeit einer Prozesskette in besonderem Maße durch die eingesetzten Schnittstellen bestimmt wird. Daher müssen hier neben der Weiterentwicklung von Einzelprozessen verstärkt auch die Definition und die Umsetzung von Schnittstellen betrachtet werden.

Zur Bildung umfassender Schnittstellen ist es hilfreich, die auftretenden Prozessschritte in Kern- und Nebentechnologien zu klassifizieren. Als Kerntechnologie wird meist der formgebende Fertigungsprozess, als Nebentechnologien werden die dazu ergänzenden Prozesse und notwendigen Systeme definiert. Jede Prozesskette hat einen Eingangszustand, zum Teil mehrere Zwischenzustände und einen Ausgangszustand, wobei die Zwischenzustände für die Kerntechnologie und die einzelnen Nebentechnologien wiederum aus Eingangs- und Ausgangszuständen bestehen. Alle diese Zustände müssen über geeignete Schnittstellen abgebildet werden. Für jede neu ermittelte Prozesskette ist es erforderlich, diese in die bislang bestehende technologische Wertschöpfungskette zu integrieren. Dabei müssen die von den vor- und nachgelagerten Prozessen auftretenden Eingangs- und Ausgangszustände auch durch geeignete Schnittstellen ermöglicht werden [FALL00, S. 59, S. 64-65, S. 100-105], [TÖNS03, S. 482-484], [BRAN05, S. 17]. Bild 4-2 verdeutlicht exemplarisch die Integration einer Prozesskette in den Produktlebenszyklus und stellt eine vereinfachte Struktur einer Prozesskette dar.

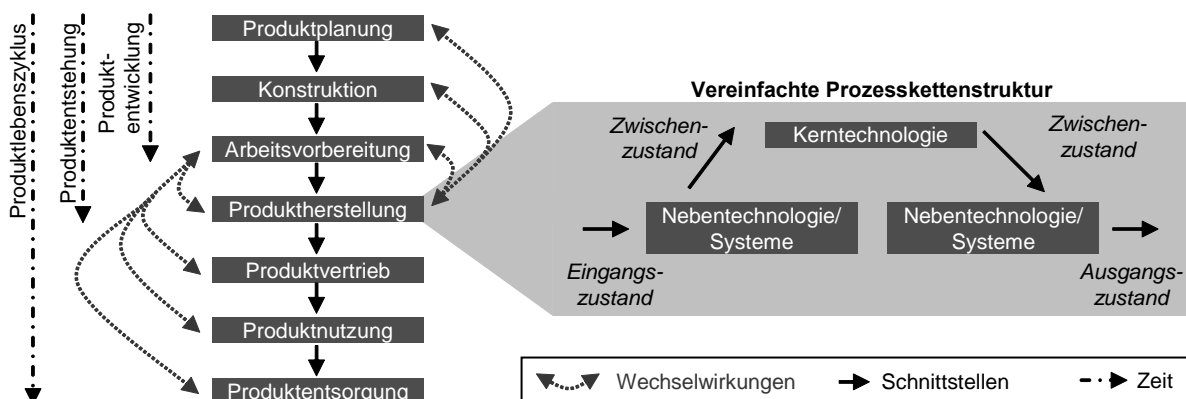


Bild 4-1: Integration der Prozesskette in den Produktlebenszyklus

Integration of the process chain into the product life cycle

4.2 Modellierung der Prozesskette

Modelling of the process chain

In Kapitel 2 wurden die derzeit eingesetzten Fertigungsfolgen hinsichtlich der hier vorliegenden Anwendung bewertet. Daraus ergibt sich ein Bedarf an einer neuen Prozesskette seitens der Designer und des Werkzeugbaus. Es muss eine durchgängige Bearbeitung ermöglicht werden, um eine hohe Flexibilität und Anwendungsnähe gewährleisten zu können. Mittels einer durchgängigen Datenstruktur ist eine Reduktion von Fehlerquellen und somit der Fehlerfortpflanzung möglich. In Bild 4-2 sind die Prozesskette, die Schnittstellen und die Klassifizierung der einzelnen Kettenglieder schematisch dargestellt. Als Kerntechnologie ist das Laserstrahlstrukturieren und als Nebentechnologien sind das CAx-System und die Messtechnik zu definieren. Zu deren Verknüpfung in Form einer durchgängigen Prozesskette werden komplexe Schnittstellen benötigt.

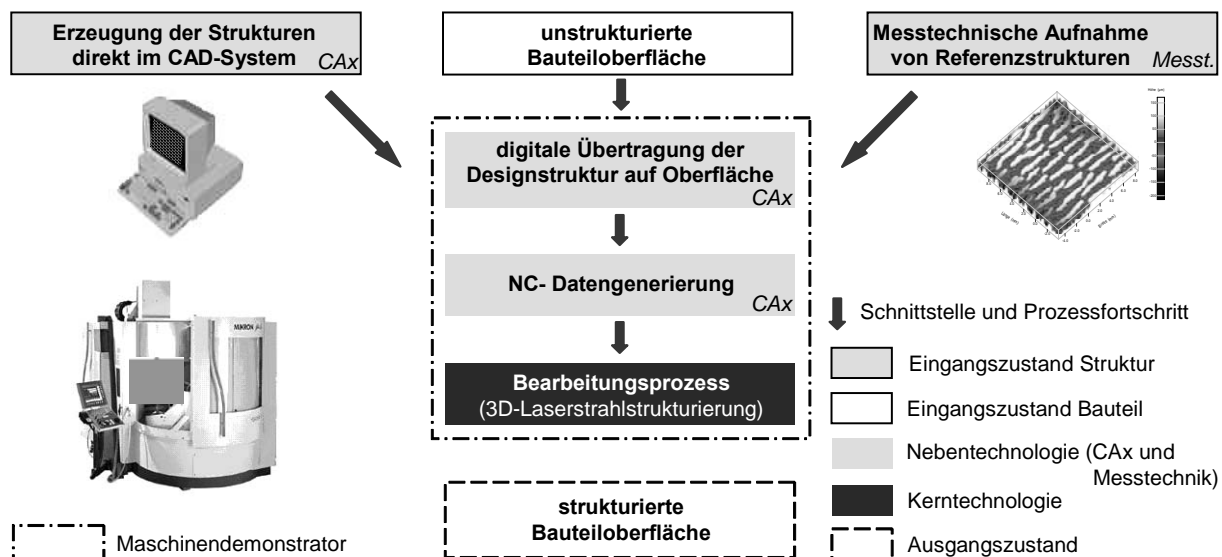


Bild 4-2: Prozesskettenmodell zur Herstellung von Designstrukturen in Oberflächen

Process chain model for the manufacturing of design structures in surfaces

Die hier entwickelte Prozesskette verfolgt einen ähnlichen Ansatz wie das in Kapitel 2.3.4 vorgestellte DT-Verfahren. Die digitale Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe und die Nutzung eines vollständig über NC-Daten beschreibbaren Abtragprozesses sind Gemeinsamkeiten beider Prozessketten. Im Gegensatz zum DT-Verfahren, das HSC-Narbungsfräsen nutzt, wird hier das Laserstrahlstrukturieren eingesetzt. Weiterhin wird die Strukturerstellung (CAD/Messtechnik) mit in die Prozesskette einbezogen, wodurch große Verbesserungspotenziale beim Gesamtprozess zu erwarten sind. Durch eine konsequente Berücksichtigung und Optimierung von Schnittstellen liegt im Gegensatz zum DT-Verfahren ein industrietaugliches Gesamtlösungskonzept vor.

Nachfolgend werden der Ablauf und die einzelnen Komponenten bzw. Kettenglieder der hier erarbeiteten Prozesskette näher vorgestellt.

Eingangszustand: Designstruktur und Werkzeug

Der Eingangszustand der Prozesskette ist in die unstrukturierte Werkzeugoberfläche (Bauteil) und in das Design (Struktur) unterteilt. Die Makrogeometrie des Werkzeugs wurde durch vorgelagerte Fertigungsverfahren bereits vollständig hergestellt. Die Geometrieform, der Werkstoff und der Oberflächenzustand des Werkzeugs haben erhebliche Einflüsse auf die nachfolgenden Prozessschritte. Die Gestalt der Designstruktur muss vollständig mathematisch beschrieben sein, so dass die Strukturerzeugung von großer Bedeutung ist. Um eine hohe Strukturflexibilität und somit eine breite Anwendung der Prozesskette gewährleisten zu können, müssen sowohl direkt im CAD entwickelte Strukturen als auch digitale Abbilder bereits bestehender Referenzstrukturen bearbeitet werden können.

Nebentechnologie: Messtechnik

Bestehende Referenzstrukturen müssen durch geeignete optische Messverfahren in ein digitales Datenformat überführt werden, wobei die Messdatenqualität und die Messfeldgröße wichtige Aspekte darstellen. Es müssen Arbeitsfolgen erarbeitet werden, durch die eine ausreichende Messdatenqualität für die weitere Datenverarbeitung sichergestellt werden kann.

Nebentechnologie: CAx-System

Im CAD entwickelte Strukturen liegen zwar bereits in einem digitalen Datenformat vor, müssen jedoch für die Weiterverarbeitung im verwendeten CAx-System angepasst werden. Außerdem sind das Datenformat und die Datenmenge zu berücksichtigen. Im CAx-System erfolgt weiterhin durch geeignete Algorithmen die datentechnische, abbildungsfehlerfreie Verknüpfung der Designstruktur mit der Bauteiloberfläche, so dass ein vollständig mathematisch beschriebenes Datenmodell der herzustellenden strukturierten Oberfläche zur Verfügung steht. Falls die Designstruktur kleiner als die Bauteiloberfläche ist, muss durch entsprechende Routinen eine großflächige Multiplikation der Strukturen erfolgen. Die nachfolgende Generierung von NC-Bearbeitungsdaten für die Kerntechnologie erfolgt in einem speziellen CAM-System. Durch eine Anlehnung der Programmerroutinen an eine konventionelle Fräsbahngenerierung ist der Schulungsbedarf für den Anwender gering. Eine spezielle Software-Applikation überführt die definierten Bewegungsbahnen des Lasers und die nötigen Technologieparameter in entsprechende Steuerungskommandos für den Maschinendemonstrator. Diese Applikation stellt somit eine wichtige Schnittstelle dar.

Maschinendemonstrator

In eine hochgenaue Fräsmaschine wird ein zusätzliches Modul integriert, welches alle nötigen Systemkomponenten zur Anwendung der Kerntechnologie bzw. Kernstrategie aufweist. Die Forderungen nach hohen Maschinengenauigkeiten werden mit Hilfe spezieller Kompensationsalgorithmen für die Bewegungsachsen erfüllt. Das Modul soll möglichst am Markt erhältliche Systemkomponenten nutzen, damit neben der einwandfreien Funktion eine hohe Robustheit und Wartungsfreundlichkeit sowie eine einfache Justagemöglichkeit vorliegen. Weiterhin werden Sicherheits- und Ergonomieaspekte berücksichtigt. Ein intelligentes Steuerungskonzept führt u. a. zu einem fehlertoleranten Gesamtsystem.

Kerntechnologie: Laserstrahlstrukturieren

Die Oberflächenbearbeitung erfolgt durch Laserstrahlstrukturieren basierend auf Sublimation. Dadurch ist eine hohe Oberflächenqualität in Form eines präzisen Abtrags und eine geringe Schmelzrandbildung gegeben. Durch die Nutzung von optimierten Prozessparametern werden hohe Bearbeitungsgenauigkeiten und hohe Abtragraten gewährleistet. Die zur Sicherstellung eines definierten Abtrags nötigen Fertigungsprozessparameter sind in einer Technologiedatenbank als so genannte Laser-Tools zusammengefasst. Die großflächige Strukturierung ohne Nahtstellen oder Verzerrungen wird durch die Anwendung der Kernstrategie erreicht.

Ausgangszustand

Nach dem Bearbeitungsprozess liegt eine strukturierte Werkzeugoberfläche vor und es kann somit eine Abformung erfolgen. Bei der Abformung auftretende Oberflächenfehler können aufgrund der vollständigen Datendurchgängigkeit der Prozesskette auf einzelne Kettenglieder zurückgeführt werden, so dass eine Prozessoptimierung zielgerichtet erfolgen kann.

Durch die Prozesskette hat der Designer nun direkten Einfluss auf die von ihm erzeugten Designs, die Umsetzung erfolgt ohne manuelle Zwischenschritte. Dieses eröffnet die Möglichkeit, zuvor nicht zu realisierende Strukturdesigns auf Oberflächen übertragen zu können. Produkte können schneller auf den Markt gebracht werden, da neben der Verkürzung der Produktentstehung auch erhebliche Zeiteinsparpotenziale in der Produktentwicklung vorliegen.

4.3 Kernstrategie: 3D-Segment-Prozess

Main strategy: 3D segment process

Für eine konturnahe, präzise und großflächige Oberflächenstrukturierung muss eine geeignete Kernstrategie für den Laserstrahlstrukturierprozess entwickelt werden. Die Kernstrategie hat dabei erhebliche Einflüsse auf die einzelnen Systemkomponenten und Schnittstellen.

Entscheidendes Merkmal aller Laserstrahlabtragprozesse ist die Kinematik der eingesetzten Laserstrahlfokussiereinheit in Kombination mit der verwendeten Bearbeitungsstrategie. Die Fokussierung des Laserstrahls kann als starre (Bild 4-3, links: Direktstrahloptik) oder als bewegliche Einheit (Bild 4-3, rechts: Galvano-Scanner mit separater Steuerung) ausgeführt werden. Die hier geforderte großflächige Strukturierung kann jedoch nicht mit den beiden konventionellen Kinematiken erfolgen. Dies ist vor allem auf die bestehenden, in Bild 4-3 aufgeführten, systembedingten Restriktionen zurückzuführen.

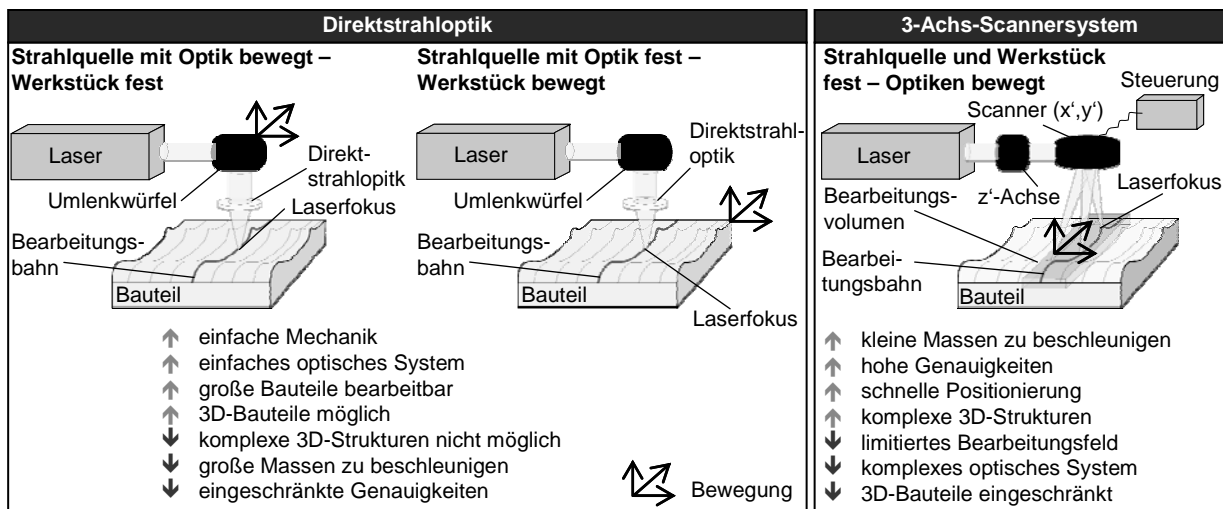


Bild 4-3: Konventionelle Kinematiken beim Laserstrahlstrukturieren

Conventional kinematics in laser beam ablation

Bild 4-4 zeigt die neuartige Kernstrategie: 3D-Segment-Prozess. Sie ermöglicht eine großflächige Bearbeitung von gewölbten Oberflächen mit filigranen und komplexen Strukturen bei deutlich reduzierten Bearbeitungsdatemengen. Bild 4-5 verdeutlicht die einzelnen Prozessschritte des 3D-Segment-Prozesses.

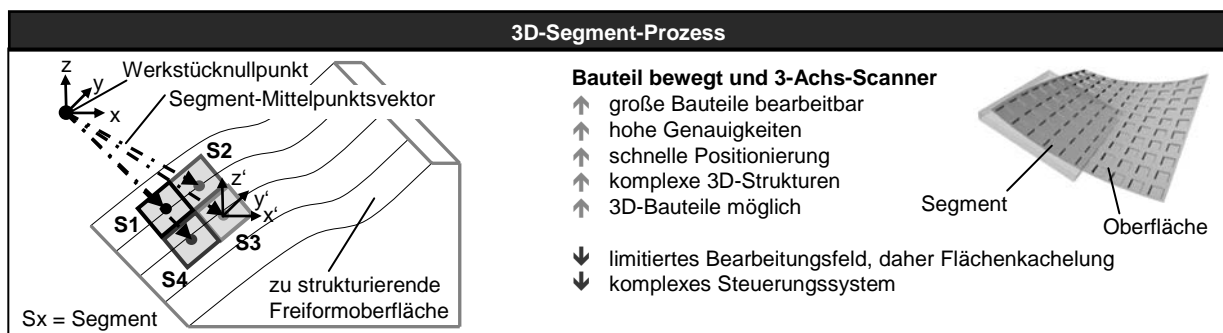


Bild 4-4: Kernstrategie: 3D-Segment-Prozess

Main Strategy: 3D segment process

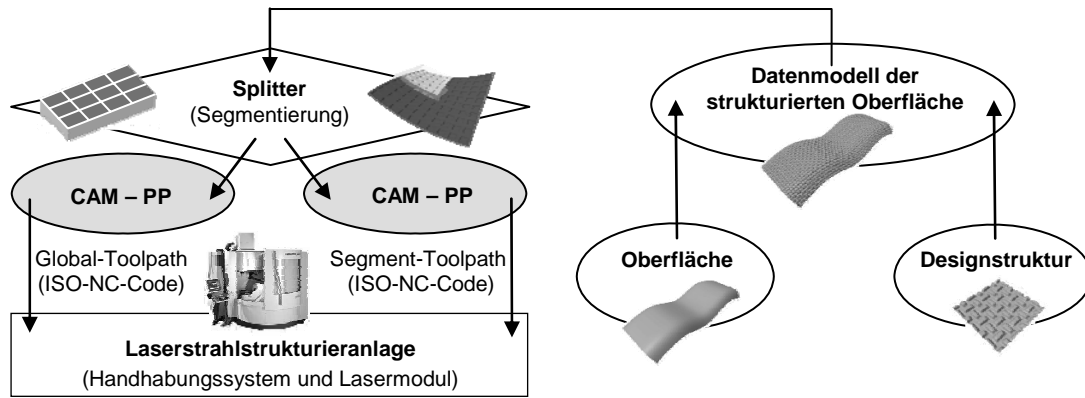


Bild 4-5: Abfolge der Kernstrategie – 3D-Segment-Prozess
Sequence of the main strategy – 3D segment process

Ausgangsbasis ist das Datenmodell der strukturierten Bauteiloberfläche, die eine Aufteilung in einzelne Oberflächensegmente (S_x) erfordert. Ein Segment wird eindeutig durch die Lage und Orientierung seines geometrischen Mittelpunkts in Bezug zum Werkstücknullpunkt und durch seine Abmessung festgelegt. Zur Aufteilung der Oberfläche wird eine Segmentierungsvorschrift (Splitter) eingesetzt, wobei die Größe und die Lage der einzelnen Segmente durch Strukturauflösung, maximale Arbeitsvolumengröße des Scanners sowie Oberflächengestalt bestimmen werden. Ein Handhabungssystem positioniert sequenziell die Segmente relativ zur Werkstückoberfläche. Bezugspunkt ist dabei stets der Segmentmittelpunkt. Die dazu nötigen Bewegungsführungsdaten liegen im so genannten Global-Toolpath (NC-Programm) vor. Durch die Verwendung eines 3-Achs-Scanners können innerhalb der einzelnen Segmente präzise 3D-Strukturen hergestellt werden. Die entsprechenden Bewegungsführungsdaten für die Scanneransteuerung beinhaltet der Segment-Toolpath (NC-Programm). Die sequenzielle Abarbeitung der einzelnen Segmente erfordert eine steuerungstechnische Verknüpfung des Scannersystems mit der Handhabungsanlage. Da nur jeweils die Bearbeitungsdaten für die einzelnen, in der Größe begrenzten Segmente berechnet und gehandhabt werden müssen, können auch großflächige, bis dato nicht herstellbare Bauteile mit Designstrukturen versehen werden.

Die erfolgreiche Realisierung des 3D-Segment-Prozesses erfordert umfangreiche Entwicklungen auf den Gebieten der CAM-, Anlagen- und Prozesstechnologie. Die wesentlichen Faktoren müssen dabei in ihrer Gesamtheit betrachtet werden, um gegenseitige Abhängigkeiten identifizieren und systematisch untersuchen zu können. Bild 4-6 zeigt ein Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) der wesentlichen Einflüsse auf den 3D-Segment-Prozess. In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Haupteinflussgrößen mit einem höheren Detaillierungsgrad (Haupt- und Nebenursachen) näher betrachtet.

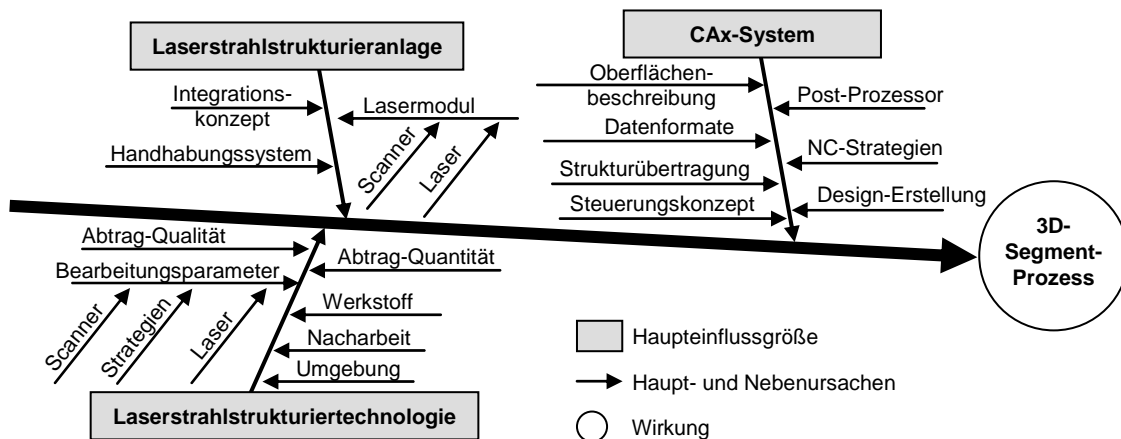


Bild 4-6: Wesentliche Einflüsse auf den 3D-Segment-Prozess – Ishikawa-Diagramm
Main influences on the 3D segment process – Ishikawa diagram

5 Laserstrahlstrukturieranlage

Facility for laser beam structuring

Ziel: Konzepterstellung und Aufbau einer Laserstrahlstrukturieranlage, wobei ein Lasermodul, bestehend aus Laserstrahlquelle, -formung und -ablenkung, in eine mehrachsige Handhabungsanlage integriert wird. Untersuchung der wesentlichen anlagenspezifischen Parameter, um Wechselwirkungen mit der Kerntechnologie identifizieren zu können. Anpassung der Systemkomponenten auf die veränderten Einsatzbedingungen.

5.1 Auswahl der Handhabungsanlage

Selection of the handling machine

An die Gesamtanlage zur konturnahen und filigranen Strukturierung von Werkzeugoberflächen mittels Laserstrahlstrukturieren werden die nachfolgenden Anforderungen gestellt:

- Umsetzung des 3D-Segment-Prozesses zur Freiformoberflächenbearbeitung
- hohe Positionier- und Bahngenaugigkeit der Bewegungsachsen kleiner als 10 μm
- Bauteilgewichte größer als 100 kg bearbeitbar (typische Werkzeugeinsätze)
- Bauteilabmessungen größer als 250 x 250 x 250 mm³ bearbeitbar
- Nutzung einer leistungsfähigen, im Werkzeugbau etablierten Maschinensteuerung (Anwenderfreundlichkeit und reduzierter Schulungsbedarf)
- Einheit zur Bauteileinmessung/-referenzierung
- robuste Ausführung der Gesamtmaschine (industrieller Betrieb - Werkzeugbau)
- reproduzierbare und hochgenaue Bauteilspanneinheit
- steuerungstechnische Verknüpfung aller Komponenten über Standardschnittstellen, so dass gängige CAx-Systeme und NC-Codes/-Strategien genutzt werden können
- modularer Aufbau des Lasersystems für nachträgliche Optimierungen oder Erweiterungen
- modulare Integration des Lasersystems zur Adaption auf andere Maschinensysteme
- hohe Betriebsstabilität der Laserstrahlquelle für konstante Abtragergebnisse
- Variabilität der Laserparameter für hohe Flexibilität in der Anwendung
- kurze Pulslängen und hohe Strahlleistungen des Lasers zur Reduzierung von Wärmeleitungsverlusten in der oberflächennahen Schicht und zur Realisierung hoher Abtragraten
- Strahldurchmesser < 40 μm (filigrane Strukturen, hohe Bearbeitungsgenauigkeiten)
- Sicherheitstechnik hinsichtlich der Laserbearbeitung

Für die Umsetzung dieser Anforderungen steht am Markt kein geeignetes Gesamtsystem zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.4.3), so dass ein neues Anlagenkonzept in Verbindung mit einer geeigneten Prozesstechnologie zum Laserstrahlstrukturieren entwickelt werden muss. Es wird daher ein speziell entwickeltes Lasermodul in ein bestehendes, auf das neue Einsatzgebiet optimiertes Handhabungssystem integriert. In einem ersten Schritt muss ein geeignetes Handhabungssystem ausgewählt werden.

Im Vergleich zu hochgenauen Mikropositionieranlagen weisen Handhabungseinheiten von kostengünstigeren HSC-Fräsmaschinen nahezu vergleichbare Genauigkeiten, für den Werkzeug- und Formenbau gängigere Maschinensteuerungen, größere Verfahrswege, höhere verarbeitbare Bauteilgewichte, eine vollständige Bauraumkapselung und Systeme zur Bauteileinmessung (Messtaster) auf. Insbesondere in der konservativen Branche des Werkzeug- und Formenbaus besteht eine höhere Akzeptanz für den Einsatz von neuartigen, innovativen Maschinen oder Technologien, falls diese auf bekannten, bereits vielfach eingesetzten und somit ausgereiften Grundsystemen aufbauen bzw. diese teilweise nutzen.

Als Handhabungsanlage für den 3D-Segment-Prozess dient hier eine 5-Achs-HSC-Fräsmaschine vom Typ HSM 600U der Firma Mikron AG. Der Maschinentyp wird bereits vielfach für die Hochpräzisionsbearbeitung im Werkzeugbau und in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Die Maschine ist in einer Gantrybauweise ausgeführt, wobei der Dreh-

/Schwenktisch (B-/C-Achse) und die X-Achse im Werkstück, die Y- und Z-Achse dagegen im Werkzeug ausgeführt sind. Dadurch liegt eine für die Lasersystemintegration geeignete Achs-Kinematik vor, was durch die Ausführung der Z-Achse in Form eines von drei Seiten offenen Spindelkastens unterstützt wird. Eine kinematische Besonderheit liegt im asymmetrischen Verfahrweg der Y-Achse, der zum Fräswerkzeugwechsel nötig ist. Bild 5-1 verdeutlicht die technischen Spezifikationen.

Spezifikationen: Mikron HSM 600U

- 5-Achs-HSC-Fräsmaschine
- Arbeitsbereich: 800 x 600 x 500 mm³ (X, Y, Z)
- Vorschübe bis 40 m/min
- Beschleunigung bis 17 m/s² im Raum
- Schwenkachse (B): +30°/-110° bis 200 U/min
- Drehachse (C): n x 360° bis 360 U/min
- max. Werkstückgewicht 120 kg
- Spindel mit 42000 U/min; HSK 40; 13 kW und 4,2 Nm
- Steuerung Heidenhain iTNC 530 mit Messtaster

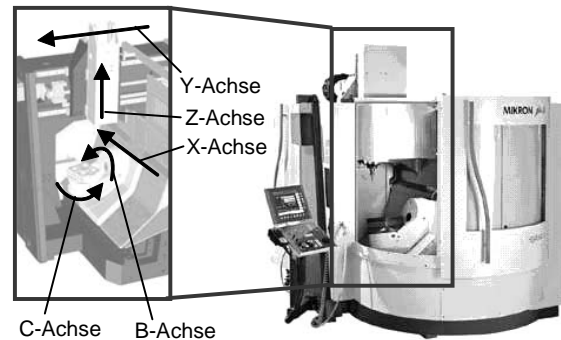


Bild 5-1: Maschinengrundträger HSM 600 U und dessen Spezifikationen (Mikron AG)

Basic machine HSM 600 U and its specifications

5.2 Aufbau und Integration des Lasermoduls in die Handhabungsanlage

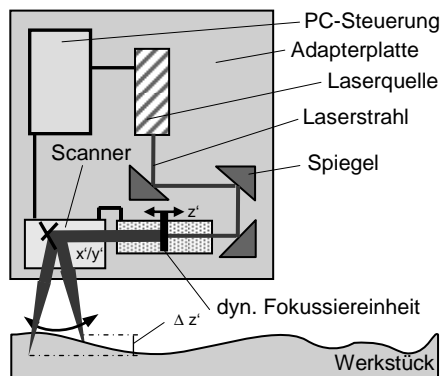
Integration of the laser module into a handling machine

Zur Strahlableitung steht ein 2-Achs-Scanner vom Typ HurryScan 25, eine dynamische Fokussiereinheit in Strahlrichtung vom Typ VarioScan 40 und eine Interfacekarte für die Scankopf- und Lasersteuerung vom Typ RTC3 jeweils von der Firma Scanlab zur Verfügung. Zur Integration der RTC3-Karte wird ein PC-basierter Steuerungsrechner genutzt. Mit diesen Komponenten kann eine hochdynamische Bearbeitung eines definierten Scannervolumens (x' , y' und z') erfolgen. Die herstellereitigen Spezifikationen der einzelnen Komponenten sind in Bild 5-2 (Anhang A1) dargestellt. Die eingesetzte dreiachsige Strahlableitungseinheit (HurryScan 25 und VarioScan 40) weist im Vergleich zu anderen Systemen niedrigste Positionierungenauigkeiten bei höchsten Positioniergeschwindigkeiten auf, so dass keine Limitierung des 3D-Segment-Prozesses durch die verwendete Strahlableitungseinheit zu erwarten ist. Mit diesen Systemkomponenten wurden zudem bereits erfolgreich tribologisch wirksame Mikrostrukturen in Bauteiloberflächen eingebracht [KORD03].

Aus den zuvor vorgestellten Komponenten muss ein robustes und leistungsfähiges Lasermodul zur Strahlführung, -fokussierung und -ableitung aufgebaut werden. Folgende Anforderungen werden an das Lasermodul gestellt:

- Aufnahme aller Komponenten nach den Spezifikationen der Hersteller
- kleiner Bauraum, damit der Arbeitsraum der Handhabungsanlage nicht verkleinert wird
- wenige zusätzliche Bauteile, um eine Minimierung des Gewichts sicherzustellen
- steife und robuste Ausführung, um hohe Achsbeschleunigungen realisieren zu können
- Möglichkeit der exakten Justage der Strahlachse durch entsprechende Einrichtungen
- leistungsfähige steuerungstechnische Verknüpfung in das Maschinensystem

Der prinzipielle Aufbau des Moduls wird in Bild 5-3 verdeutlicht. Grundträger ist eine Adapterplatte, die an den Spindelkasten der Mikron HSM 600U angebracht wird. Dadurch ist eine einfache Rückrüstung oder Adaption an einen anderen Maschinentyp gewährleistet. Die durch den Hersteller vorgeschriebene waagerechte Einbaulage des Scanners und der dynamischen Fokussiereinheit sowie deren zueinander einzuhaltender Abstand schränken die möglichen Strahlengangvarianten erheblich ein [SCANLAB AG]. Zur Strahlenkung und -justage werden Umlenkspiegel verwendet.



Komponenten und deren Funktionen

- Laser: Strahlerzeugung
- Spiegel: Strahlumlenkung und -justage
- dynamische Fokussiereinheit: variable z'-Achse und feste Strahlaufweitung (VarioScan 40)
- Scanner: Planfeldoptik (Fokussierung) und dynamische Strahl-ableitung in x' und y'
- Steuerung: jeweils für Laser, Scanner und dynamische Fokussiereinheit

Besonderheit: VarioScan muss gemäß Hersteller (ScanLab) stets in waagrechter Position verbaut werden

Bild 5-3: Konfiguration des Lasermoduls mit 3-Achs-Scanner

Configuration of the laser module with 3-axis-scanner

Zur Erzielung hoher Abtragqualitäten sind kurze Pulslängen zu wählen (Kapitel 2.4.2). Laserstrahlquellen mit fs- oder ps-Pulslängen sind für die hier vorliegende Anwendung nicht einsetzbar, weil diese Systeme eine unzureichende Industrietauglichkeit sowie nicht integrierbare Abmessungen und Gewichte aufweisen. Da jedoch Verbesserungen bei diesen Systemen zu erwarten sind, wird eine Adaptionmöglichkeit für derartige Laserstrahlquellen berücksichtigt. Insbesondere ist dabei eine offene und flexible Einbindung von Laserstrahlsteuerungsbefehlen in die Anlage zu realisieren. Um dem Trend zu kurzen Pulslängen dennoch Folge zu leisten, wird hier eine diodengepumpte, gütegeschaltete Nd:YVO₄-Laserstrahlquelle in Slab-Bauweise vom Typ InnoSlab 41-E der Firma EdgeWave eingesetzt. In Bild 5-4 wird neben den technologischen Spezifikationen auch der Systemaufbau der Strahlerzeugung verdeutlicht.

Spezifikationen: EdgeWave InnoSlab IS41-E

- Lasermedium: Nd:YVO₄ (λ: 1064 nm)
- Strahlqualität: $M^2 < 2$ mit Mode: TEM₀₀
- max. Leistung P_D: 40 W (cw-Betrieb)
- Pulsfolgefrequenz f_p: 1-40 kHz
- min. Pulslänge τ_p: 5 ns bei f_p = 5 kHz
- Energiestabilität < 2% rms bei f_p = 5 kHz
- Rohstrahldurchmesser d_{Roh}: 4 mm
- Divergenz-Vollwinkel: < 300 μrad
- Polarisation: < 1:100, linear
- Abmessung 180 x 150 x 480 mm³
- Gewicht 15 kg
- Wasser-/Luftkühlung

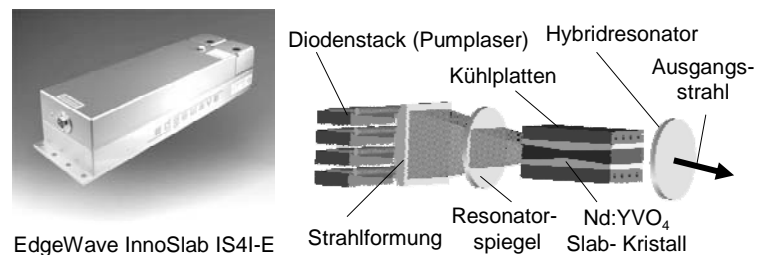


Bild 5-4: Aufbau und Spezifikationen vom EdgeWave InnoSlab IS 41-E (EdgeWave GmbH)

Set-up and specifications of EdgeWave InnoSlab IS 41-E

Vorteil der InnoSlab-Bauweise ist, dass der Laserkristall über große Flächen sehr effektiv gekühlt wird. Dies garantiert zusammen mit der hohen Ausnutzung des aktiven Volumens einen hohen optischen Wirkungsgrad von über 50 % und eine vergleichbar gute Strahlqualität [MILL03]. Mit einem Gewicht des Laserkopfs von 15 kg und der Fähigkeit, Beschleunigungen von mehr als 3 g Stand zu halten, eignet sich die Laserstrahlquelle grundsätzlich zur Integration in eine hochdynamische Handhabungsanlage. Zur Ansteuerung des Lasersystems steht eine PC-basierte Steuerungskonsole (Lascon) zur Verfügung. Zum externen Betrieb der Laserstrahlquelle müssen die Laser-Pump-Strom-Vorgabe LPS_v durch ein analoges Signal (0-10 V), ein Laser-Trigger-Befehl durch ein Impulsfolge-Signal (+5 V) zwischen 1 und 40 kHz (Pulsfrequenz f_p) und ein Laser-An/Aus-Befehl in Form eines low-aktive TTL-Signals (+5 V) zur Verfügung stehen.

Die Achsanordnung und -verfahrwege des genutzten Handhabungssystems sind auf die Frässpindelachse ausgelegt. Um nach der Lasermodulintegration einen größtmöglichen Arbeitsraum für die Bearbeitung zur Verfügung zu haben, muss die Position des Laserfokus, der beim Laserstrukturieren den TCP' darstellt, nahezu dem der Spindelnase entsprechen. Es wurden daher mittels CAD unterschiedliche Konzepte für die Einbaulage des Scanners im Bezug zur Frässpindel erarbeitet und hinsichtlich des verbleibenden Arbeitsraums bewertet.

Kapitel 6.3.1 ein spezielles Steuerungskonzept entwickelt. Dieses basiert auf einer synchronisierten Verknüpfung zwischen der Werkzeugmaschinensteuerung und den einzelnen Lasermodulsteuerungen durch ein spezielles Profibussystem.

Nach DIN EN 60825-1/11.01 ist die verwendete Laserstrahlquelle in die Laserschutzklasse 4 einzuordnen. Ein industrietauglicher Betrieb der Anlage erfordert daher die Berücksichtigung und Umsetzung der Lasersicherheitsbestimmungen. Dazu wurden das Laser- und das Scannernetzteil sowie die Laserkühlung in den Not-Aus-Kreis und in weitere Sicherheitskreise der Werkzeugmaschine eingebunden. Optische Warnsignale zeigen die Betriebsbereitschaft der Laserstrahlquelle an. Durch diese speziellen Sicherheitsvorkehrungen, die zusätzlichen Strahlengangsabdeckungen und die Verwendung von Laserschutzscheiben in der Umhausung der HSM 600U ist die Anlage gemäß DIN EN 60825-1/11.01 in Laserschutzklasse 1 einzuordnen.

5.3 Inbetriebnahme und Untersuchung der Anlagenparameter

Startup and investigation of the facility parameters

5.3.1 Handhabungssystem, Lasermodul und Steuerung

Handling machine, laser modul and motion control

Positionierungsgenauigkeiten des Handhabungssystems

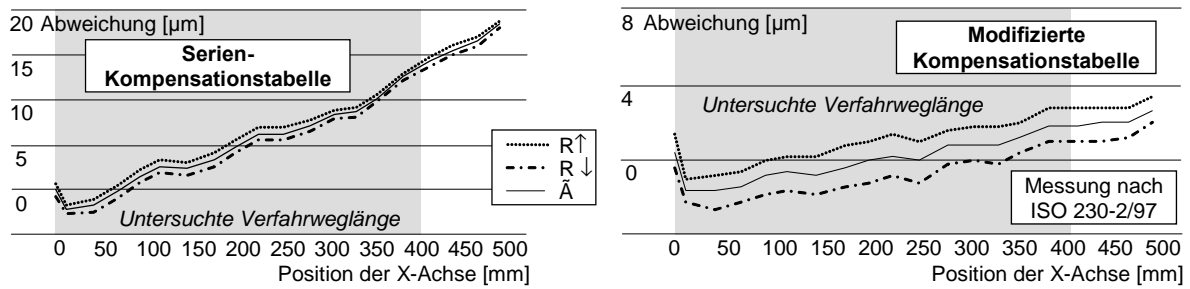
Beim 3D-Segment-Prozess muss die Handhabungsanlage die einzelnen Lasersegmentmittelpunkte auf dem Bauteil anfahren. Positionierfehler führen zu unerwünschten Nahtstellen. Daher ist die Positionierungsgenauigkeit der Bewegungsachsen ein wesentlicher Faktor für die Bearbeitungsqualität und muss auf ein Minimum reduziert werden. Nachfolgende Positionier- und Wiederholungsgenauigkeiten liegen nach Hersteller gemäß ISO 230-2/97 vor:

- bidirektionale Positionierungsgenauigkeit \tilde{A} (X-, Y-, Z-Achse): 8 μm
- mittlere, uni- und bidirektionale Positionsabweichung M (X-, Y-, Z-Achse): 5 μm
- unidirektionale Positionierungswiederholungsgenauigkeit $R^{\uparrow} / R^{\downarrow}$ (X-, Y-, Z-Achse): 5 μm
- Positionierungsgenauigkeit P der Drehachse (C-Achse): 8''
- Positionierungsgenauigkeit P der Schwenkachse (B-Achse): 12''

Die eingesetzten Messroutinen zur Analyse der Positionierungsgenauigkeit entsprechen der ISO 230-2/97. Es werden dabei mehrfach Punkte auf einer Achse aus beiden Anfahrrichtungen angefahren, die Abweichung zur Sollposition gemessen und die Kennwerte nach der beschriebenen Vorgehensweise bestimmt.

Die Herstellerangaben gelten nur für einen definierten Maschinenarbeitspunkt unter festgelegten Umgebungsbedingungen. Liegen abweichende Bedingungen vor, so können die Genauigkeiten nicht mehr garantiert werden. Eine Ursache dafür ist die Erwärmung der Linearmaßstäbe durch Verlustleistungen der Motoren, durch Reibung in den Führungen und in den Kugelrollspindeln oder durch eine erhöhte Umgebungstemperatur. Die Linearmaßstabslänge ändert sich aufgrund des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 8 μm pro Grad Temperaturänderung und Metermaßstab; es liegen ein nicht lineares Temperaturfeld und somit Positionierfehler vor. Die Auswirkungen des Temperaturgangs der Maschine werden durch Achs-Kompensationstabellen in der Steuerung minimiert. Im Serienzustand der Maschine sind die Achs-Kompensationstabellen für dynamische Fräsoperationen optimiert.

Der 3D-Segment-Prozess ist durch eine nicht rotierende Frässpindel, durch sequenzielle, kurze Positionierbewegungen mit stark reduziertem Vorschub, durch erhebliche Stillstandszeiten sowie durch eine Hallentemperatur von $T_0 = 23^\circ\text{C}$ gekennzeichnet. Bild 5-6 (links) zeigt exemplarisch die Positionierungsgenauigkeiten der X-Achse während des 3D-Segment-Prozesses mit Serien-Kompensationstabelle. Durch das geänderte Temperaturfeld in der Maschine dehnen sich die Linearmaßstäbe und die Achskomponenten nicht gemäß der Serien-Kompensationstabelle aus, so dass z. B. für die X-Achse eine vergrößerte bidirektionale Positionierungsgenauigkeit mit $\tilde{A} = 16,1 \mu\text{m}$ im 3D-Segment-Prozess vorliegt.



keine Warmlaufphase; ruhende Frässpindel; 3D-Segment-Prozess (sequenzielle, kurze Bewegungen mit reduziertem Vorschub sowie mit Stillstandszeiten); Umgebungstemperatur $T_0 = 23^\circ\text{C}$

Bild 5-6: Bidirektionale Positioniergenauigkeit \ddot{A} der X-Achse beim 3D-Segment-Prozess bei unterschiedlichen Kompensationstabellen

Bi-directional positioning accuracy \ddot{A} of the X-axis in the 3D segment process depending on different compensation tables

Zur Verbesserung der Maschinengenauigkeiten wurden modifizierte Kompensationstabellen für alle translatorische Achsen unter realen Bedingungen des 3D-Segment-Prozesses erarbeitet. Dazu wurde gemäß ISO 230-2/97 ein Testprogramm mit mehreren Feldern definiert und abgearbeitet. Bild 5-7 zeigt exemplarisch den Messaufbau zur Vermessung der X-Achse.

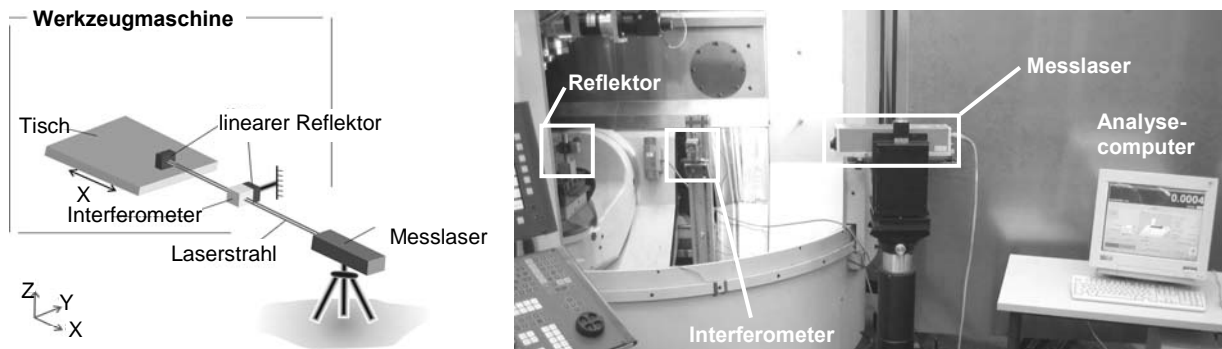


Bild 5-7: Messaufbau zur Achsgenauigkeitsvermessung der X-Achse

Measurement setup for the axis accuracy measurement of the X-axis

Mit den modifizierten Kompensationstabellen liegt sogar im Vergleich zum warmen Serienzustand eine verbesserte Maschinengenauigkeit vor. Bild 5-6 (rechts) zeigt die Positioniergenauigkeit der X-Achse im 3D-Segment-Prozess unter Verwendung der modifizierten Kompensationstabelle. Tabelle 5-2 gibt eine Übersicht über die Positioniergenauigkeiten aller translatorischen Achsen sowohl bei der Verwendung der Serientabelle als auch beim Einsatz der modifizierten Kompensationstabelle für die Bewegungsführung beim 3D-Segment-Prozess.

Bezeichnung (ISO 230-2/9 & ISO 230-2/97)	X-Achse			Y-Achse			Z-Achse		
untersuchte Verfahrensweglänge [mm]	400			400			400		
Betriebszustand ($T_0 = 23^\circ\text{C}$)	warm	3D-Segment		warm	3D-Segment		warm	3D-Segment	
Kompensationstabelle (mod. = modifiziert)	Serie	Serie	mod.	Serie	Serie	mod.	Serie	Serie	mod.
bidirektionale Positioniergenauigkeit [μm] \ddot{A}	8,21	16,1	4,7	10,09	14,33	3,6	8,55	13,79	4,3
mittlere, uni- und bidirektionale Positionsabweichung [μm] \mathbf{M}	4,86	6,74	2,14	9,12	10,99	2,78	6,92	12,66	2,97
Umkehrspiel [μm] \mathbf{B}	0,9	1,24	0,5	0,52	0,56	0,48	0,46	0,48	0,44
positive unidirektionale Positionierwiederholungsgenauigkeit [μm] $\mathbf{R}\uparrow$	5,1	6,23	3,3	4,07	5,9	2,99	4,09	4,28	3,24
negative unidirektionale Positionierwiederholungsgenauigkeit [μm] $\mathbf{R}\downarrow$	5,2	6,38	1	4,07	5,3	2,1	4,93	5,73	1,5

Tabelle 5-2: Positioniergenauigkeiten aller translatorischen Achsen bei zwei Betriebszuständen sowie bei verschiedenen Kompensationstabellen

Positioning accuracies of all translative axes depending on two different operating conditions as well as on different compensation tables

Bei simultaner Bewegung der X-, Y- und Z-Achse liegt eine dreiachsige Positioniergenauigkeit $P_{G(3)}$ von $12,6 \mu\text{m}$ vor. Eine 5-Achs-Bewegung erfordert hingegen die Nutzung der Dreh- und Schwenkachsen, deren jeweilige Positioniergenauigkeiten hier aufgrund fehlender Messapparaturen nicht bestimmt werden können. Daher müssen die vom Hersteller spezifizierten Werte genutzt werden. Die Drehachse (C) weist eine Positioniergenauigkeit von $P = 8''$ und die Schwenkachse (B) von $P = 12''$ auf. Daraus ergibt sich eine fünfachsige Positioniergenauigkeit $P_{G(5)}$ von maximal $40 \mu\text{m}$ bei der Verwendung aller translatorischen und rotatorischen Achsen.

Scannervolumengrößen in Abhängigkeit von der verwendeten Planfeldoptik

Zur Strahlfokussierung verfügen 2-Achs-Scanner über wechselbare Planfeldfokussieroptiken (sog. F-Theta-Optiken). Je kleiner die Brennweite f ist, desto kleiner sind der Fokusedurchmesser d_f , die Arbeitsfeldgröße A_s sowie das Bearbeitungsvolumen V_s und desto größer ist die Positioniergenauigkeit P des Scannersystems [HERZ98, S. 142]. Man unterscheidet normale und telezentrische F-Theta-Optiken. Durch ein spezielles Linsendesign ist der Fokussierbereich stets eine ebene Fläche, so dass keine optisch bedingten Defokussierungen bzw. Strahlwegverlängerungen im Arbeitsfeld auftreten.

Durch die Spiegelablenkung weisen normale F-Theta-Optiken jedoch variierende Strahlaustrittswinkel φ auf, so dass insbesondere in den Randbereichen des Arbeitsfelds der auftreffende Laserstrahlfokus elliptisch auf die Oberfläche projiziert wird. Dadurch entsteht eine Fokusflächenvergrößerung bzw. Abnahme der Laserstrahlintensität (Bild 5-8, links). Telezentrische Optiken verfügen zwar über eine deutlich reduzierte Arbeitsfeldgröße, weisen aber einen konstanten Strahlaustrittswinkel von $\varphi = 0^\circ$ auf. Bei ebenen, nicht angestellten Oberflächen tritt daher keine verzerrte Fokusabbildung auf der Oberfläche auf. Bild 5-8 (rechts) verdeutlicht die Eingriffsverhältnisse einer telezentrischen F-Theta-Optik bei der Bearbeitung einer gewölbten Oberfläche. Die Lage des Flächennormalenvektors \vec{n} zum Strahlaustrittsvektor stellt eine wichtige Prozesskenngröße dar. Aufgrund des hier vorliegenden Systemaufbaus steht bei telezentrischen Optiken der Strahlaustrittsvektor stets im Lot, so dass die sich bei einer Bearbeitung von gewölbten Oberflächen oder einer angestellten ebenen Bearbeitung ausbildende Vektorabweichung durch den Winkel $\Delta\vec{n}$ beschrieben werden kann. Bei auftretenden Winkelabweichungen sind aufgrund der Strahlprojektion inhomogene Abträge zu erwarten.

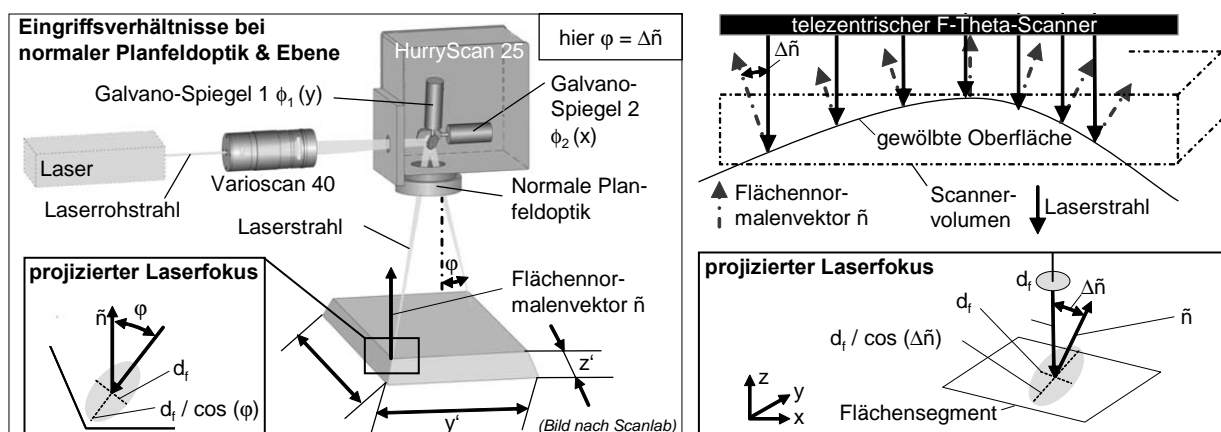


Bild 5-8: Strahleingriffsverhältnisse in Bezug zur gewählten Optik und Oberflächenform
Conditions of beam interferences depending on the selected optic and surface form

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich eine telezentrische Optik eingesetzt. Tabelle 5-3 listet die sich daraus ergebenden Spezifikationen der Scanner-Optik-Einheit auf.

	Telezentrische F-Theta Optik ($\lambda = 1064 \text{ nm}$)
Brennweite f [mm]	80
Vektor zwischen TCP und TCP' [mm]	+65,1466 / -228 / -38,1254 (X, Y, Z)
max. Strahleintrittsapertur- \varnothing d_{APT} [mm]	25
max. Auslenkung der Spiegel vom Mittelpunkt [mm]	$x' = \pm 30.4815$; $y' = \pm 30.4815$
max. Scannerbearbeitungsfeld [mm ²]	$l_s(x') = 25 \text{ mm}$; $l_s(y') = 25 \text{ mm}$
max. z'-Hub 3D [mm]	$h_s(z') = 2,4 \text{ mm}$
max. Scannerbearbeitungsvolumen V_s [mm ³]	$l_s^2 h_s = 1500 \text{ mm}^3$
theoretischer min. Fokus- \varnothing d_f [μm]	10 (laut Optikhersteller)
Strahlaustrittswinkel φ [°]	$\varphi = 0^\circ$ (konstant)
Positionierungsgenauigkeit P [μm] gemäß Schrittzahl SA [bit]	$P_{X,Y} = 1$ ($SA_{X,Y} = \pm 32.768$); $P_z = 1$ ($SA_z = \pm 1.290$)
Kalibrierungsfaktor K [bit/mm]	1075

Tabelle 5-3: Optische Spezifikationen des Lasermoduls (HurryScan25, VarioScans40)
Optical specifications of the laser module (HurryScan25, VarioScan40)

Justage des Strahlengangs

Unter einer Justage des Strahlengangs wird die exakte Einkoppelung des unfokussierten Laserstrahls in die Eingangsaperturen der Fokussiereinheit und des 2-Achs-Scanners verstanden. Zur Sicherstellung eines optimalen Bearbeitungsergebnisses muss der Laserstrahl deckungsgleich mit der optischen Mittelachse der beiden Systemkomponenten verlaufen, da sonst Leistungsverluste durch Abschattung auftreten können. Im Vorfeld der Justage wird in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Justageeinheiten der einzelnen Systemkomponenten (Kap. 5.1) und der Ausführung des Strahlengangs eine geeignete Vorgehensweise erarbeitet. Zu Beginn wird die Laserquelle mittels Präzisionswasserwaagen justiert, so dass der Laserkopf und somit der daraus austretende Laserstrahl im Lot stehen bzw. parallel zur Z-Achse verlaufen. Der gemäß Herstellerangabe vorliegende Austrittsplatzfehler des Laserstrahls bezogen auf die geometrische Mittelachse wurde bei der Justage berücksichtigt. Der Scanner und die Fokussiereinheit werden daraufhin ebenfalls gemäß den Maschinenachsen (X, Y und Z) ausgerichtet, so dass die Koordinatensysteme des Scanners und der Mikron HSM 600U deckungsgleich sind. Zur Eliminierung von Fertigungs- und Montagefehlern weisen die Umlenkspiegel jeweils zwei einstellbare rotatorische Freiheitsgrade auf, so dass der Laserstrahl exakt in die Eingangsaperturen eingefädelt werden kann. Dazu werden eigens angefertigte rotationssymmetrische Justagehilfsmittel genutzt, die in die Eingangsaperturen der Komponenten adaptiert werden können. Die Justagehilfsmittel weisen in Strahlrichtung ein mittiges Fadenkreuz auf und sind mit einer laserlichtempfindlichen Detektorschicht versehen. Durch kurze Lasereinbrände kann somit der Versatz des Rohstrahls zum Fadenkreuz ermittelt werden.

Ausrichtung des Lasermoduls zum Maschinenkoordinatensystem: Verkippung der x' - y' -Ebene

Für einen gleichmäßigen Abtrag über den gesamten Arbeitsbereich ist die Planparallelität zwischen Werkstückeebene und Scanneroptik entscheidend. Mittels Messuhren wird zunächst der Werkzeuggestisch in eine horizontale Lage gebracht. Daraufhin wird ein Bearbeitungstest durchgeführt, bei dem das gesamte Bearbeitungsfeld des Scanners durch eine Zick-Zack-Bewegung des Lasers zeilenförmig bestrahlt wird. Um möglichst geringe Abtragspuren (minimale Aufrattung) zu erzielen, wird neben der Verwendung einer hochreflektierenden und somit vermindert absorbierenden Oberfläche ($R_a < 0,01 \mu\text{m}$) mit einer minimalen Abtragleistung gearbeitet. Bei kleinster Abweichung der Fokuspunktlage von der idealen Fokusebene entlang der z' -Achse liegen daher inhomogene Abtragspuren vor. Eine Verkippung der x' - y' - zur X-Y-Ebene kann somit detektiert und durch zusätzliche Justagemaßnahmen am Scanner kompensiert werden. Bild 5-9 zeigt Auflichtmikroskopaufnahmen einer polierten Bauteiloberfläche mit partiell ausgebildeten Abtragsbereichen aufgrund einer Verkippung der Arbeitstisch- zur Scanneroptikebene. Durch einen sukzessiven Justagevorgang weist der Endzustand einen homogenen Abtrag auf, so dass davon ausgegangen werden kann, dass keine Verkippung mehr besteht.

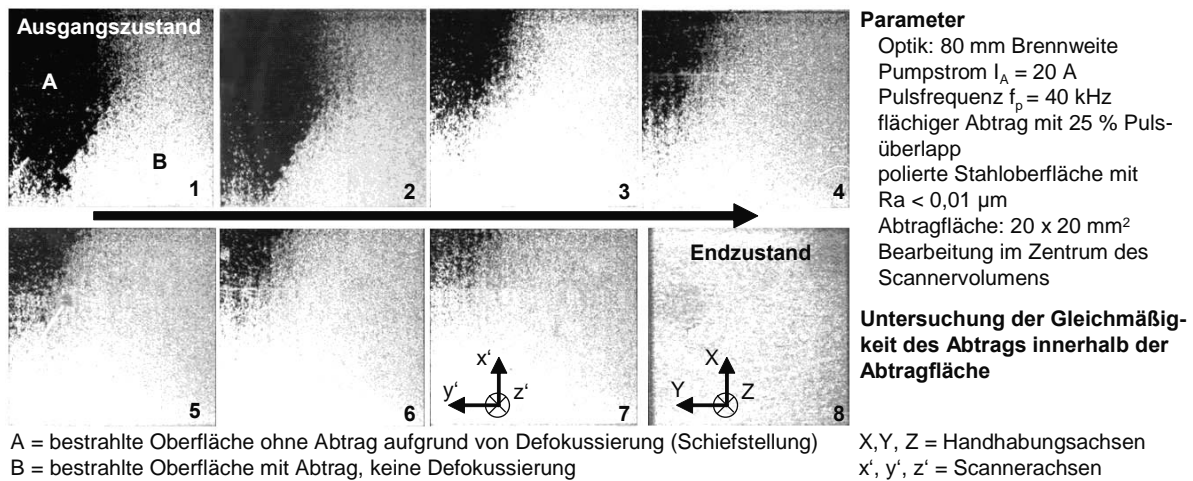


Bild 5-9: Justage des Scannersystems hinsichtlich der Verkippung in der x' - y' -Ebene
Adjustment of the scanner system regarding the tilt in the x' - y' -plane

3-Achs-Scannersystem: Kalibrierung der optischen Bewegungsachsen (gain-Faktoren)

Durch den Strahlverlauf im Scanner (Optik) liegen Verzerrungen in der quadratischen Abbildungsebene vor. Zur deren Reduzierung werden spezifische, vorgefertigte Kompensationstabellen von der RTC3-Steuerung genutzt. Diese Tabellen sind jedoch auf die maximale Eingangsapertur des Scanners ausgelegt. Bei der Nutzung einer kleineren Scanner-Eingangsapertur erfolgt eine Größenänderung der Abbildungsebene, so dass x' , y' und z' verzerrt abgebildet werden. Die Abweichung kann durch unabhängige Kompensationsfaktoren für die einzelnen Achsen (x' -, y' - und z' -gain) minimiert werden. Zur Bestimmung der gain-Faktoren für die x' - und y' -Achskompensation werden quadratische Felder mit einer programmierten Kantenlängen von jeweils 10 mm in eine ebene Bauteiloberfläche durch Laserabtragen eingebracht. Nach einer Längenmessung der Abtragergebnisse mittels eines Messmikroskops können die Korrekturwerte angepasst werden (Bild 5-10). Bei der z' -Kompensation wird ein Strahlkaustikmessgerät vom Typ MicroSpotMonitor der Firma Primes genutzt (Kap. 5.2.2), welches eine Fokusverschiebung zu einer Referenzposition entlang der z' -Achse messen kann. Tabelle 5-4 gibt eine Übersicht über die bestimmten Achskorrekturwerte.

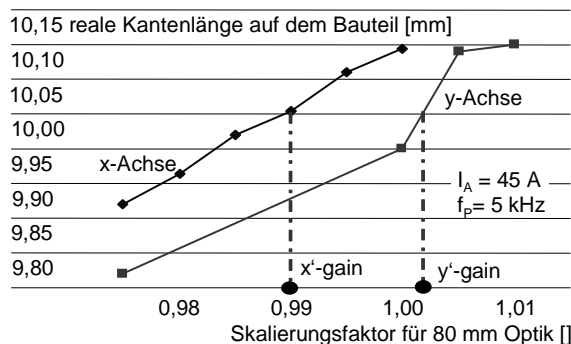


Bild 5-10: Verzeichnung der x' - und y' -Achse
Distortion of the x' - and y' -axis

HurryScan 25, VarioScan 40 und EdgeWave IS4I-E	
Achskorrekturwert	F-Theta-Optik (f = 80 mm)
x' -gain	0,990
y' -gain	1,002
z' -gain	0,999

Tabelle 5-4: Scannerachskorrekturwerte
Correction values of the scanner axes

5.3.2 Laserstrahlquelle und deren Betriebspunkte
Laser beam source and course of beam

Für die nachfolgenden Untersuchungen, in denen die Betriebspunkte der Laserstrahlquelle erarbeitet werden, muss eine vollständige Beschreibung der geometrischen Bestimmungsgrößen des fokussierten Laserstrahls vorliegen. Diese wird in Bild 5-11 dargestellt.

Vermessung der Pulslänge

Die Erzeugung von Laserpulsen basiert bei der Laserstrahlquelle auf Q-Switching durch Pockelzelle, so dass bei einer Veränderung der energetischen Zustände im Laser-Resonator, z. B. durch Erhöhung der Pumpleistung (Pumpdiodenstrom I_A), sich die Pulslänge τ_P verändert [HERZ98, S. 265-279]. Mit einer Photodiode vom Typ DET210 der Firma ThorLabs (Messauflösung 1 ns) und einem Oszilloskop vom Typ Le Croy 9362 werden die Pulslängen in Abhängigkeit vom Pumpdiodenstrom I_A und von der Pulsfolgefrequenz f_P gemessen (Bild 5-12, Tabelle 5-6). Es wird ersichtlich, dass durch geeignete Parametervariation die Pulslänge τ_P zwischen 5 und 19 ns verändert werden kann.

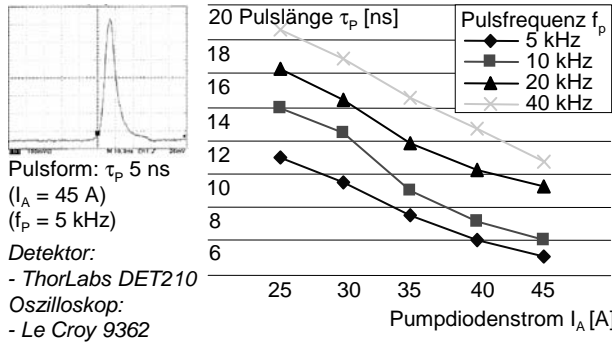


Bild 5-12: Pulslänge τ_P mit variiertes f_P und I_A
Pulse length with varied f_P and I_A

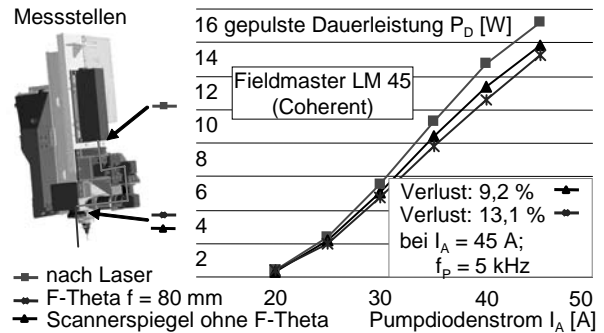


Bild 5-13: Puls-Dauerleistung P_D und Verluste
Pulse continuous power P_D and losses

Bestimmung der Dauerleistungen im Pulsbetrieb sowie der strahlengangsbedingten Verluste

Die Bestimmung der gemittelten Leistung im Pulsbetrieb P_D wird mittels eines Leistungsmessgeräts vom Typ Coherent Fieldmaster LM 45 (Messungenauigkeit +/- 3 %) durchgeführt. Infolge der Strahlführung über Spiegel und der Strahlformung durch die Optik sind Verluste durch Reflexion und Absorption gegenüber der Nennleistung bzw. direkt nach Strahlaustritt aus dem Laser zu erwarten. P_D wird daher für unterschiedliche Pumpdiodenströme I_A und Pulsfolgefrequenzen f_P jeweils hinter allen optischen Komponenten des Lasermoduls gemessen, so dass die auftretenden Verluste bestimmt werden können. Exemplarisch für $f_P = 5 \text{ kHz}$ verdeutlicht Bild 5-13 die Dauerleistung im Pulsbetrieb P_D und dessen Verluste in Abhängigkeit von I_A an unterschiedlichen Messpunkten. Bei einer Pulsfolgefrequenz f_P von 3 bis 40 kHz und einem Pumpdiodenstrom I_A von 20 bis 45 A liegen nach der Planfeldoptik Leistungsverluste zwischen 9,7 % und 19 % gegenüber dem direkten Strahlaustritt aus dem Laser vor. Die größten Verluste treten jeweils bei $f_P = 5 \text{ kHz}$ und $I_A = 45 \text{ A}$ auf, was auf die erhöhten thermischen Belastungen der optischen Komponenten zurückzuführen ist. Aus den gemessenen Größen P_D , τ_P und den Leistungsverlustfaktoren können nun in Abhängigkeit von f_P die realen Pulsspitzenleistung P_{Puls} nach dem Objektiv bestimmt werden (Bild 5-14 und Tabelle 5-6).

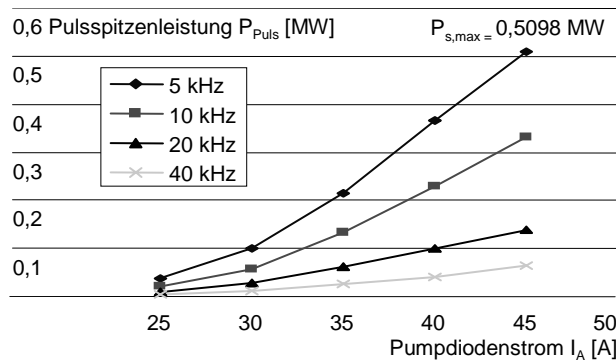


Bild 5-14: Pulsspitzenleistung P_{Puls} hinter F-Theta-Optik $f = 80 \text{ mm}$
Pulse peak power P_{Puls} behind F-Theta-optic $f = 80 \text{ mm}$

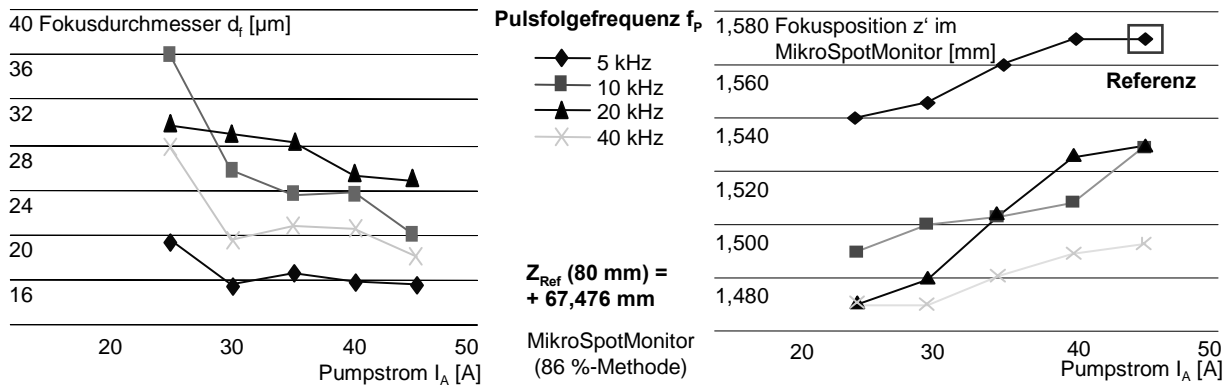


Bild 5-16: Messtechnisch erfasste Fokusburchmesser und -positionen
Measured focus diameters and positions

Die Lage des Fokuspunkts in z' -Richtung ändert sich in Abhängigkeit vom Laserparameter (Bild 5-16, rechts, und Tabelle 5-6), was auf eine unterschiedliche Ausbildung der thermischen Linse im Laser zurückzuführen ist. Der Arbeitsabstand Z_{Ref} wird anhand eines Referenzwerts (maximale Pulsspitzenleistung P_{Puls} : $I_A = 45 \text{ A}$ und $f_p = 5 \text{ kHz}$) definiert und dient als Bezugspunkt für die Fokuslage. Die entsprechenden Versätze ($\Delta z'$) werden ermittelt und es wird eine Kompensationstabelle für die einzelnen Betriebspunkte erstellt. Ein Betriebspunkt wird durch I_A , f_p und die verwendete Optik eindeutig definiert.

Für die Realisierung des 3D-Segment-Prozesses ist die genaue Positionierung des Bauteils zum Lasersegment entscheidend, der Fokuspunkt muss exakt auf der Bauteiloberfläche liegen. Da jedoch die Z-Achse eine Positionierungsgenauigkeit aufweist, müssen die bestehenden nutzbaren Arbeitsbereiche des Fokus A_z entlang der z' -Achse bestimmt werden. Der Arbeitsbereich A_z wird durch die Rayleighlänge und durch die Qualität der Strahlform (Bedingung: näherungsweise TEM_{00} -Mode) begrenzt. Für die Lasermaterialbearbeitung sollte der Arbeitsbereich innerhalb der Rayleighlänge liegen [WEIK06, S. 49]. Mit dem MikroSpotMonitor wurden die realen Rayleighlängen messtechnisch bestimmt und Strahlkaustikvermessungen zur Bestimmung der Strahl-Modi durchgeführt. In Bild 5-17 sind exemplarisch die einzelnen Strahlformen für $I_A = 40 \text{ A}$ und $f_p = 10 \text{ kHz}$ entlang der z' -Achse für die Planfeldoptik mit $f = 80 \text{ mm}$ dargestellt, wobei ein maximaler TEM_{00} -Arbeitsbereich von $A_{\text{TEM}_{00}} = -300/+100 \mu\text{m}$ definiert wird. Für diesen Betriebspunkt liegt eine gemessene Rayleighlänge von $z_R = 151 \mu\text{m}$ vor, so dass ein Arbeitsbereich A_z von $-150/+100$ bestimmt wird. Die Arbeitsbereiche A_z aller Betriebspunkte sind in Tabelle 5-6 (Kapitel 5.3) dargestellt.

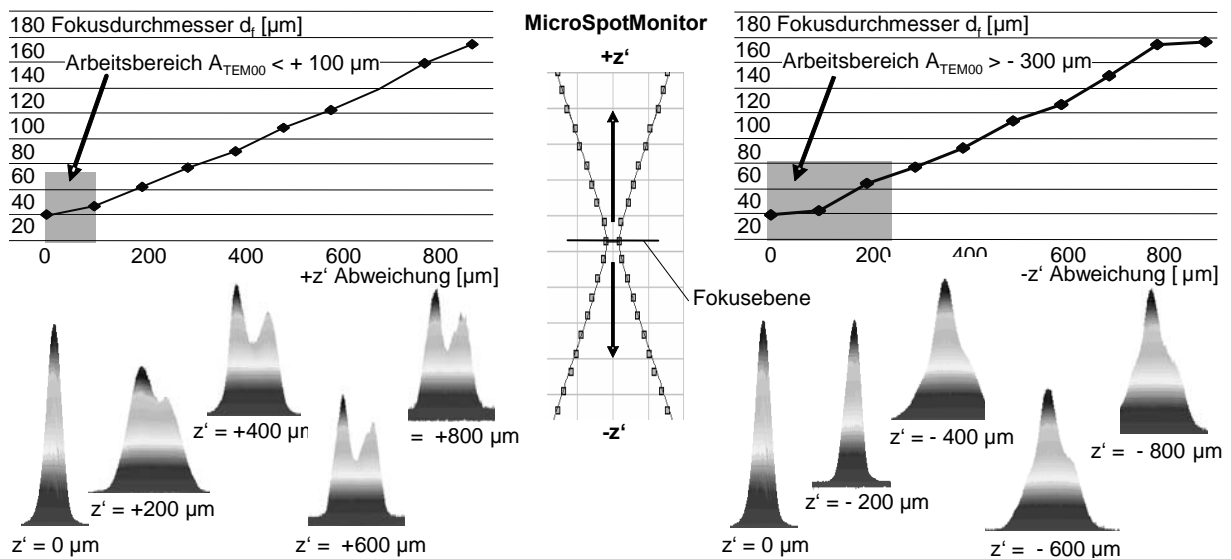


Bild 5-17: Strahlkaustik und Strahlprofile ($I_A = 40 \text{ A}$, $f_p = 10 \text{ kHz}$)
Beam cauterisation and profiles

5.4 Fazit

Conclusion

Zur Umsetzung der durchgängigen Prozesskette zur Herstellung von großflächigen Designstrukturen auf Regeloberflächen wurden eine Kernstrategie, der 3D-Segment-Prozess, entwickelt und deren bestimmende Haupteinflussgrößen definiert. Für die Haupteinflussgröße Laserstrahlstrukturieranlage wurde ein neues Anlagenkonzept bestehend aus einer 5-Achs-Handhabungsanlage mit einem integrierten, speziellen 3-Achs-Lasermodul entwickelt. Nach der Inbetriebnahme der Anlage, welche u. a. die Justage des Strahlengangs und die Kompensation der Positioniergenauigkeiten der Handhabungsachsen aufgrund der veränderten Betriebsbedingungen umfasste, wurden die bestehenden Betriebspunkte des Lasermoduls, welche durch die Optik, den Pumpdiodenstrom I_A und die Pulsfolgefrequenz f_P eindeutig definiert sind, bestimmt. Die Betriebspunkte dienen als Grundlage für die Entwicklung geeigneter Prozessparameter in Kapitel 7. In Tabelle 5-6 sind die Prozessparameter aller Betriebspunkte des Lasermoduls aufgeführt.

Es steht für die nachfolgenden Untersuchungen, insbesondere für die Entwicklung der Laserstrahlstrukturiertechnologie und der CAx-Technologie, eine leistungsfähige Laserstrahlstrukturieranlage zur Verfügung. Die zur Umsetzung des 3D-Segment-Prozesses nötige Steuerung und die Software-Applikationen werden erst in Kapitel 6.3 erarbeitet und umgesetzt.

6 CAx-System: Design-Erstellung, Datenaufbereitung und Steuerungseinheit

CAx system: design, data preparation and control unit

Ziel: Konzeptionierung eines leistungsfähigen CAx-Systems, welches als entscheidendes Bindeglied zwischen Laserstrahlstrukturieranlage und Laserstrahlstrukturiertechnologie fungiert und somit den 3D-Segment-Prozess ermöglicht. Teilumsetzung des CAx-Systems durch spezielle Systemapplikationen bzw. Softwareanpassungen, so dass eine datendurchgängige, prototypenhafte Anwendung erfolgen kann.

Ausgangspunkt der Prozesskette ist die Entwicklung von Designstrukturen. Dafür werden die bestehenden Möglichkeiten einer messtechnischen Aufnahme von Referenzstrukturen und einer direkten Erzeugung durch CAD untersucht. Zur Umsetzung der speziellen Anforderungen, wie dem Strukturmorphing oder der partiellen Entformbarkeit, sowie zur NC-Datengenerierung muss das vollständige Datenmodell der strukturierten Oberfläche zur Verfügung stehen. Dazu werden Algorithmen zur Kachelung von Designstrukturen entwickelt und geeignete Methodiken zur digitalen Übertragung von Strukturen auf Werkzeugoberflächen identifiziert. Daraufhin erfolgt die Segmentierung der Oberfläche durch die zu entwickelnde Splitter-Applikation, die ein Kernfragment des 3D-Segment-Prozesses darstellt. Für den Global- und den Segment-Toolpath müssen in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Systemmodulen spezielle Bearbeitungsdaten generiert werden. Kern ist dabei die Entwicklung eines Softwaremoduls zur Überführung von NC-Daten in Lasermodulsteuerungskommandos – im Folgenden als Scanner-Back-End bezeichnet.

6.1 Entwicklung von Designstrukturen

Development of design structures

Kunde, Designer und Werkzeugbauer stellen unterschiedlichste Ansprüche an die Gestalt von Designstrukturen, so eine hohe Flexibilität in der Strukturentwicklung sichergestellt werden muss. Im Vorfeld (Kap. 2) wurden bereits die wesentlichen Anforderungen der Kunden, der Designer und des Werkzeugbaus erarbeitet, welche im Wesentlichen die gestalterische Ausführung der Strukturen prägen. Die Überführung von Strukturen in die Prozesskette erfordert geeignete Schnittstellen bei der Designstrukturerstellung, so dass auch umfangreiche Anforderungen seitens des Fertigungsprozesses an die vorgelagerten Prozessschritte bestehen:

- Designstruktur muss in einem digitalen Datenformat vorliegen, z. B. STL-Format mit einem geschlossenen Triangulationsverbund ohne Ausreißer und Löcher (wasserdicht)
- Designstrukturauflösung muss mindestens der Scannersystemgenauigkeit entsprechen
- Datengröße muss im CAM-System verarbeitbar sein
- Designstruktur muss für großflächige Oberflächen kachelbar sein
- Designstruktur muss ein strukturmittiges Koordinatensystem aufweisen

6.1.1 Messtechnische Datenaufnahme anhand von Referenzstrukturen

Metrological data recording on the basis of reference structures

Als Referenzstrukturen dienen vorhandene Oberflächen, wobei natürliche Narbungen, wie Leder oder Holz, am häufigsten genutzt werden (Bild 6-1). Außerdem können auch bereits hergestellte Designstrukturen auf Musterplatten oder Bauteilen als Referenz dienen (Bild 6-2). Da die Messtechnik und die nachfolgende Messdatenweiterverarbeitung zu einer nutzbaren Datenbasis sehr zeit- und kostenintensiv sind, gilt im Allgemeinen, dass durch Messtechnik nur Strukturen zurückgeführt werden sollten, die digital nicht in einer ausreichenden Qualität entwickelt werden können.

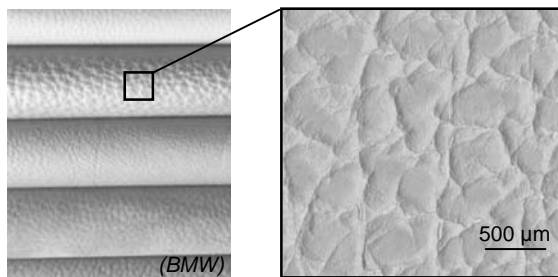


Bild 6-1: Ledernarbungen
Leather grainings

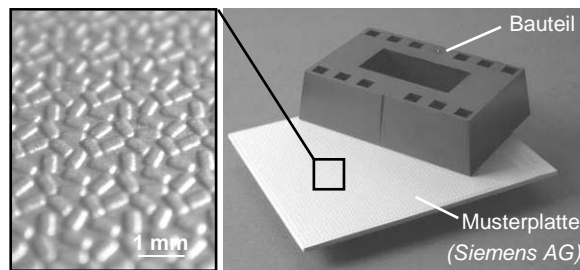


Bild 6-2: Musterplatte mit Riffel-Struktur
Reference panel with ripple structure

Zur digitalen Datenerfassung von komplex und filigran strukturierten Oberflächen werden überwiegend optische Messverfahren eingesetzt. Optische Verfahren verfügen im Vergleich zu taktilen Verfahren über eine wesentlich größere Messwertaufnahme pro Zeit bei vergleichbaren Genauigkeiten. Zusätzlich weisen optische Verfahren überwiegend eine Triple-Punktewolke (X-, Y-, Z-Koordinaten) oder ein 2D-Pixelmuster mit einer definierten Höhenzuordnung durch Farbwerte (TIF, BMP) als Messergebnisse auf, aus denen durch mathematische Algorithmen ein Flächenverbund in Form eines STL-Netzes erzeugt werden kann [HESS02, S. 91-98], [SCHN05, S. 15-25]. Es stehen ein konfokales Mikroskop (Siscan MC64), ein Weißlichtinterferometer (Wyko NT 1100), ein chromatischer Sensor (FRT MicroProf) und eine Mikrostreifenprojektion (GFM MikroCad) zur Verfügung, so dass außer einem Mikrotriangulations- und einem Autofokussensor die wichtigsten Verfahren der Mikrooberflächenvermessung hier eingesetzt werden können. Nachfolgende Aufgabe dient als Zielsetzung:

Messung von großflächigen und überwiegend ebenen Oberflächen mit filigranen Strukturen (μm -Abmessungen und Strukturiefen $< 300 \mu\text{m}$), die durch unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten eine hohe Varianz in ihrer Reflexion (matt bis glänzend) aufweisen. Überführung der Messdaten in ein homogenes STL-Netz mit hoher Triangulationsgenauigkeit.

Anhand zweier Referenzstrukturen wird der Ablauf der Designstrukturierung durch optische Messtechnik, beginnend bei der Erfassung der Referenzstruktur über die Messdatenaufbereitung bis hin zum erzeugten STL-Flächen-Modell, verdeutlicht. Dabei werden auftretende Problemfelder aus Sicht der hier vorliegenden Prozesskette näher untersucht.

Referenzstruktur 1: Leder (vgl. Bild 6-1)

Quelle: natürliche Lederoberfläche; Farbe: beige; Abmessung: max. $150 \times 150 \text{ mm}^2$; Lederdicke: $1,3 \pm 0,1 \text{ mm}$; Flächengewicht: ca. $740 \text{ g} \pm 50 \text{ g/qm}$; Tiefe: max. $150 \mu\text{m}$; Typ: unregelmäßige, vernetzte Oberflächenstruktur; Einsatz: Automobilinnenraum

Referenzstruktur 2: Riffel (vgl. Bild 6-2)

Quelle: Kunststoff-Musterplatte; Material: ABS; Farbe: silber (Lackierung); Abmessungen: max. $200 \times 150 \text{ mm}^2$; Tiefe: max. $150 \mu\text{m}$; Typ: regelmäßige, unvernetzte Oberflächenstruktur; Einsatz: Konsumerprodukt – Schnurlostelefon

Um ein qualitativ hochwertiges Messergebnis zu erzielen, müssen Referenzstrukturen entsprechend ihrer Ausführung und des gewählten Messverfahrens vorbereitet werden:

- Bei flächigen Referenzoberflächen (z. B. Folien oder Echtleder) muss eine ebene Oberfläche sichergestellt werden (Vakuumspanntechnik). Eine mit Wellen überlagerte Mikrostruktur weist erhebliche topographische Messfehler auf.
- Die Oberfläche muss frei von Verunreinigungen sein (z. B. Öl, Fett), die zum einen die Reflexion beeinflussen und zum anderen durch ihre Dicke die Oberfläche verfälschen.
- Hochspiegelnde oder matt-schwarze Oberflächen müssen ggf. mit speziellen Kalksprays behandelt werden, um eine definierte Reflexion (diffus oder gerichtet) zu erzielen. Dadurch wird jedoch die Oberflächentopographie verfälscht.
- Die Oberflächenstruktur muss mit dem Koordinatensystem des Messsystems referenziert werden, was bei komplexen Musterbauteilen sehr aufwändig ist.

Da aufgrund der hellen Farbe und der bestehenden Oberflächenbeschaffenheiten sowohl bei Struktur 1 (Leder – beige) als auch bei Struktur 2 (Riffel – silberfarbend) eine diffuse Reflexion vorliegt, muss keine Kalkspraybehandlung erfolgen. Struktur 1 (Leder) wird wegen der Gefahr einer Wellenbildung mittels eines Vakuumpansystems für die Messvorgänge vorbereitet, so dass eine möglichst ebene Oberfläche sichergestellt wird.

Die Messergebnisse müssen zum Import ins CAM-System in einen homogenen Flächenverbund (z. B. STL-Netz) überführt werden. Voraussetzung für die Erstellung eines feinen Dreiecknetzes und somit für eine hohe Arbeitsgenauigkeit im CAM-System ist eine größtmögliche vertikale und laterale Messauflösung. Im Hinblick auf die Übertragung der gemessenen Strukturen auf eine Bauteiloberfläche (Multiplikation/Kachelung) sollten größtmögliche Messfelder erzeugt werden, begrenzender Faktor ist dabei vor allem das Datenvolumen.

Aus Sicht des industriellen Anwenders (Designer, Werkzeugbauer) sind die in der Messtechnik vorherrschenden Kenngrößen zur Messsystemauswahl oft nicht zielführend, weil entsprechendes Fachwissen fehlt. Es werden daher spezielle, für den Anwender greifbare Kenngrößen definiert. Anhand dieser erfolgt in Tabelle 6-1 eine Bewertung der Messverfahren.

Messsystem	Messzeit [Messpunkte/s] [mm ² /s]	Flächenauflösung [Messpunkte/mm ²]	max. nutzbare Messfeldgröße [mm ²]	Datenmenge im Datenformat [MByte/mm ²]	Messdatenmanipulationsfunktionen	Struktur	Messfehler Rohdaten	wesentliche Vor- oder Nachteile im Hinblick auf Prozesskette	Eignung für Prozesskette
Siscan MC64	245.500 1	245.500	225	0,25 TIF 0,5 FRT	Mitten-Filter	(1)	gering	kurze Messzeit; großes Messfeld; kaum Messdaten- Löcher	+
						(2)	gering		+
Wyko NT 1100	3.530 0,185	19.000	18,6	0,06 BMP 1 ASC 0,08 SDF	Mitten-Filter; DataRestore	(1)	hoch	unzureichende Messfeldgröße für Struktur- multiplikation	-
						(2)	hoch	Einzelstrukturen eingeschränkt weiterverarbeitbar	O
FRT MicroProf (Mark III)	1.000 0,016	62.500	225	1,8 STL 0,19 TIF 3,3 ASC	Mitten-Filter; DataRestore	(1)	gering	hohe Datenqualität; lange Messzeit; nahezu keine Messfehler	+
						(2)	gering		+
GFM MikroCad	30.000 1,435	20.900	123	1,1 ASC 0,04 TIF	Mitten-Filter; DataRestore	(1)	hoch	viele Messausreißer; hoher digitaler Nachbearbeitungs- aufwand	-
						(2)	hoch		O

Messfehler = Ausreißer oder Löcher; + = geeignet; O = bedingt geeignet; - = nicht geeignet, (1) = Leder; (2) = Riffel

Tabelle 6-1: Messsystemvergleich

Comparison of measurement systems

Aus Tabelle 6-1 wird ersichtlich, dass die einzelnen Systeme aufgrund ihrer physikalischen Wirkprinzipien unterschiedliche Messergebnisse aufweisen. Zur Verbesserung der Datenqualität können gegebenenfalls die in den Messsystemen zur Verfügung stehenden Messdatenmanipulationsfunktionen (z. B. Mitten-Filter, DataRestore) eingesetzt werden, um Messfehler zu kompensieren. Aufgrund der kurzen Messzeiten und der großen Messfelder bei hohen Auflösungen eignet sich insbesondere das konfokale Messsystem Siscan MC64 für die Aufnahme von Referenzstrukturen. Strukturen mit Tiefen kleiner als 400 µm, mit steilen Flanken und mit zum Teil dunklen Oberflächen können mit einer hohen Datenqualität bzw. mit geringen Messausreißern digitalisiert werden. Falls höhere Ansprüche an die Datenqualität gestellt werden, kann auf das langsamere chromatische Messsystem FRT MicroProf zurückgegriffen werden.

Bei manchen Referenzstrukturen liegen unzureichende Messdatenqualitäten in Form von Ausreißern und inhomogenen Messwertverteilungen (Messdatenlöcher) sowie zum CAM-System

inkompatible Austausch-Datenformate vor. Die Messdatenqualitäten müssen somit erhöht werden, wofür verschiedene Software-Applikationen genutzt werden können. In Tabelle 6-2 sind die in dieser Arbeit eingesetzten Applikationen zur Manipulation von Messdaten und zur Erzeugung von STL-Netzen aufgeführt. Die Software-Applikationen werden dabei auf einer leistungsstarken, Windows-basierten Workstation (zwei Dual Core Intel XEON 3,06 GHz CPUs, Arbeitsspeicher 4 GByte und Graphikkarte Nvidia Quadro FX 3000 256 MByte) ausgeführt, so dass Limitierungen in der Datenaufbereitung aufgrund mangelnder Systemperformance nahezu ausgeschlossen werden können und daher bei den Software-Applikationen zu suchen sind.

Software	Eingesetzte Hauptfunktionen	Eingangsdaten	Ausgangsdaten
ArtCam Pro 8.003 (Delcam GmbH)	Erzeugung von STL-Netzen aus 2D-pixelbasierten Vorlagen mit Höhenzuordnung durch Farbwerte, Skalierung, Nullpunktverschiebung, Invertierung	TIF, BMP, JPG (max. 100 MByte Grauwerte)	STL (max. 200 MByte)
CopyCAD 6.504 (Delcam GmbH)	Erstellung von STL-Netzen aus Punktwolken; Bearbeitung, Modifizierung und Umwandlung von STL-Netzen (z. B. Skalierung, Nullpunktverschiebung, Invertierung)	STL (ASC)	STL (max. 500 MByte)
Mark III 3.8.13.3 (FRT GmbH)	Aufbereitung und Export von optisch akquirierten Messdaten (Auswertungssoftware des FRT MicroProf)	SDF, ASC, FRT	STL (max. 500 MByte), TIF
Photoshop CS2 (Adobe)	Nachbereitung und Modifikation von pixelbasierten Vorlagen (z. B. Filter: Gauß-Weichzeichner, Ausbessern von Fehlstellen, Umwandlung der Farbpalette)	TIF, BMP, JPEG	TIF, BMP, JPG

Tabelle 6-2: Übersicht der genutzten Software-Applikationen zur Messdatenverarbeitung
Overview of the software applications used for measurement data processing

Ausgabeformate und Datenqualitäten der Messsysteme (vgl. Tabelle 6-1) erfordern unterschiedliche Arbeitsfolgen bei der Datenweiterverarbeitung. Bild 6-3 zeigt dabei die erarbeiteten möglichen Arbeitsfolgen, die in zwei Hauptarbeitsfolgen unterteilt werden können: Pixelvorlage (Formate TIF, BMP, JPG) und Punktwolke (ASC, FRT, SDF).

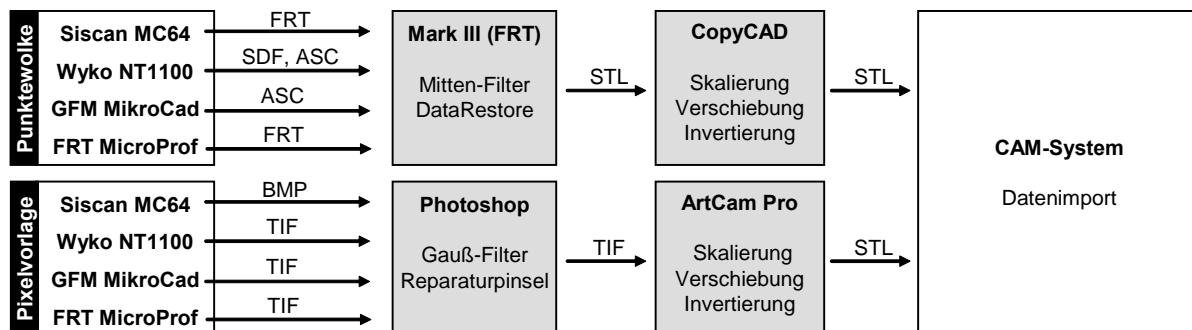


Bild 6-3: Arbeitsfolgen in der Messdatenweiterverarbeitung
Process chains of measurement data processing

Alle auf einer Punktwolke basierenden Messergebnisse (ASC, SDF, FRT) können mit der Software Mark III durch spezielle Filter, wie z. B. Mittenfilter zur Glättung der Messausreißer und DataRestore zum Schließen von Messdatenlöchern, modifiziert und als STL-Netz exportiert werden. Außerdem wird eine einheitliche Verschiebung des Koordinatensystems in das Zentrum des Strukturfelds durchgeführt. Standardmäßig entspricht in Mark III die Triangulationsgröße der Messauflösung des Eingangsdatensatzes, so dass zum Teil sehr hohe Datenmengen vorliegen. So beträgt die aus dem FRT exportierte STL-Datengröße eines quadratischen Felds mit einer Kantenlänge von 10 mm und einer Auflösung von 10 µm etwa 450 MByte, was das obere Limit einer handhabbaren Datenmenge im CAM-System darstellt. Durch eine nachträgliche Reduzierung der Messauflösung kann eine Verkleinerung der Triangulationsgröße erreicht werden. Das STL-Netz aus Mark III in der Version 3.8.13.3 weist eine fehlerhafte Größenskalierung um den Faktor 0,001 auf, was auf einer falschen Interpretation der Einheiten beruht. Die entsprechende Größenanpassung des STL-Modells wird in CopyCAD durchgeführt. Darüber hinaus ermöglicht CopyCAD die Reparatur und die Beschneidung von STL-Netzen zur Steigerung der Datenqualität im Hinblick auf den Import ins CAM-System.

Falls pixelbasierte Messergebnisse in ein STL-Netz überführt werden sollen, kann im Vorfeld die Messdatenaufbereitung in einem Bildbearbeitungsprogramm (z. B. Photoshop) erfolgen. Dazu stehen spezielle Funktionen, wie Gauß-Filter oder Reparatur-Pinsel, zur Verfügung. Vorteil der pixelbasierten Weiterverarbeitung gegenüber der zuvor beschriebenen Punktwolke ist die hohe Manipulationsfähigkeit und die enorme Datenreduktion der Bilddaten. Insbesondere unvernetzte Einzelstrukturen, wie Referenzstruktur 2, können als Pixelvorlagen gut verarbeitet werden. Zudem werden Bildbearbeitungssysteme von den Designern bereits verstärkt im Designprozess genutzt, so dass eine hohe Akzeptanz vorliegt. Nachteilig ist jedoch der zum Teil hohe manuelle Aufwand. ArtCAM Pro ermöglicht die Überführung von Pixelvorlagen in ein STL-Netz. Es liegen jedoch erhebliche Einschränkungen in der Eingangsdatenmenge vor, wodurch die Größe der Bildvorlage und der Pixelauflösung beschränkt wird. Tests haben ergeben, dass die Bildvorlage eine Datenmenge von 100 MB nicht überschreiten darf. Die Triangulationsgröße (Feinheit des STL-Netzes) kann variiert werden, aber ab einer STL-Datenmenge von über 200 MB liegen Programmabstürze vor.

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte in der Arbeitsfolge der Messdatenaufbereitung für die Ausgabeformate Punktwolke und Pixelvorlage anhand der beiden Referenzstrukturen gezeigt. Struktur 1 wird durch konfokale Messtechnik (Siscan MC64) digitalisiert und als Triple-Punktwolke im FRT-Format bearbeitet (Bild 6-4). Bild 6-5 zeigt Struktur 2 mittels Wyko NT 1100 gemessen und als BMP weiterverarbeitet. Obwohl sich die Weißlichtinterferometrie aufgrund der unzureichenden Messfeldgröße nicht für die Messung von Referenzstrukturen eignet, lässt sich jedoch anhand der umfangreichen Messfehler die Datenaufbereitung gut darstellen. In beiden Bildern sind weiterhin die STL-Netze aus den jeweiligen unmodifizierten Rohdaten dargestellt. Daraus wird die Notwendigkeit einer gezielten Messdatenweiterverarbeitung ersichtlich. Die Vorgehensweisen sind auf andere Messverfahren übertragbar.

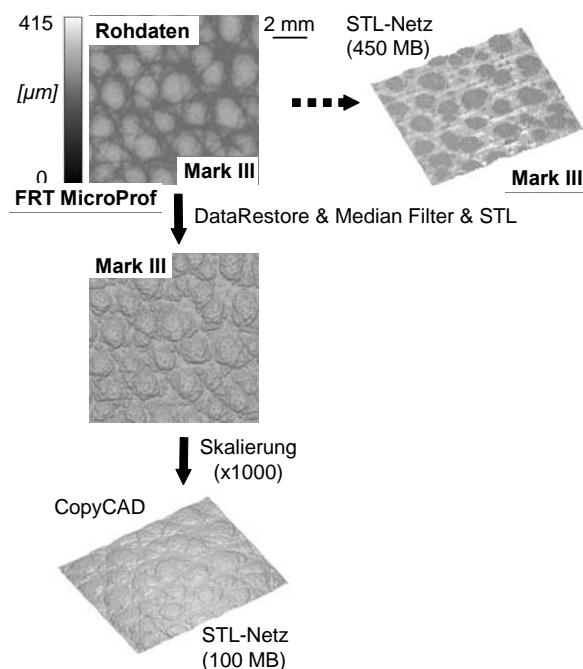


Bild 6-4: Datenaufbereitung einer Punktwolke (Lederoberfläche)

Data processing of a point cloud (leather surface)

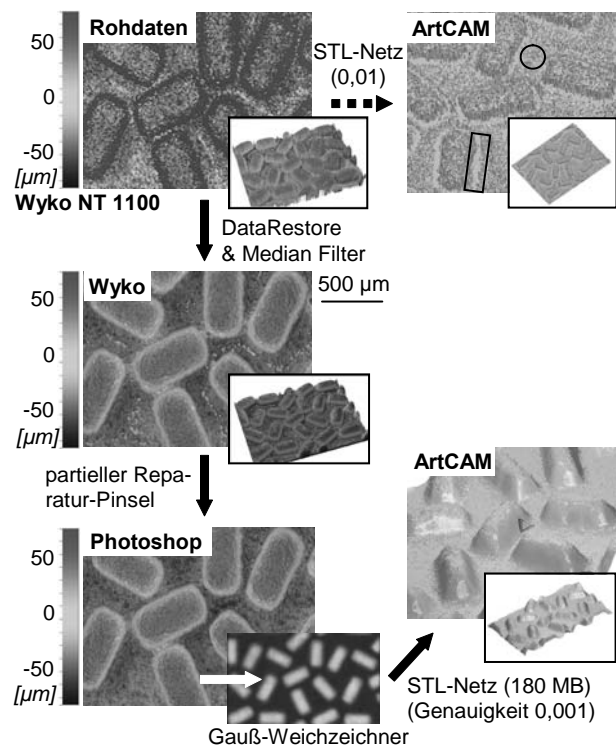


Bild 6-5: Datenaufbereitung einer Pixelvorlage (Riffelstruktur)

Data processing of a pixel map (ripple structure)

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass durch eine geeignete Datenweiterverarbeitung hochwertige STL-Netze erzeugt werden können. Es bestehen jedoch zum Teil hohe manuelle Aufwände. Durch die hohe Datenmenge und die limitierten Messfeldgrößen liegen jedoch begrenzte Strukturflächengrößen vor, so dass eine Multiplikation der Strukturen notwendig ist.

6.1.2 Direkte Strukturentwicklung durch CAD

Direct development of structure through CAD

Neben messtechnisch aufgenommenen Strukturen sollen auch direkt am CAD entwickelte Strukturen mit der Prozesskette bearbeitet werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Ergonomie und Designforschung IED der Universität Duisburg-Essen wurde eine branchenübergreifende Befragung durchgeführt. Dabei wurden mehr als 20 Designabteilungen hinsichtlich ihrer bestehenden Designstrukturentwicklungsprozesse befragt [IED06]. Es lässt sich festhalten, dass eine einheitliche Vorgehensweise bei der Erstellung von CAD-Strukturen vorliegt. In Bildbearbeitungsprogrammen werden durch den Einsatz der zur Verfügung stehenden Werkzeuge neue Designs in Form von flächenbegrenzten 2D-Bildvorlagen entworfen. Dabei erfolgt eine Anlehnung an vorhandene Strukturen, die digital entweder modifiziert oder nachgebaut werden. Bild 6-6 verdeutlicht den Nachbau einer vorhandenen Lederstruktur. Im Gegensatz zu messtechnisch aufgenommenen Strukturen weisen CAD-Strukturen stets eine hohe Datenqualität auf und können leichter den Anforderungen angepasst werden.

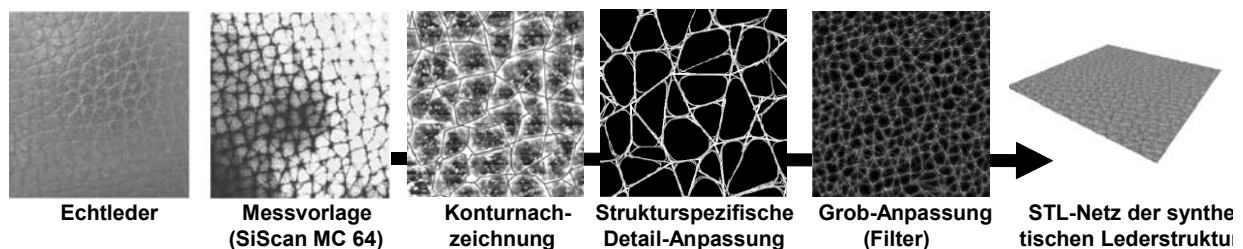


Bild 6-6: Direkte Strukturerstellung anhand einer messtechnisch erzeugten Vorlage

Direct development of structure based on a measured sample

Demnach weisen sowohl durch Messtechnik als auch durch CAD entwickelte Strukturen die gleichen Randbedingungen auf: in der Größe stark limitierte, ebene STL-Netze.

6.1.3 Digitale Kachelung von Designstrukturen

Digital tiling of design structures

Die entwickelten Designstrukturen müssen zur NC-Datengenerierung auf die Werkzeugoberfläche übertragen werden, die meist um ein Vielfaches größer als die zur Verfügung stehende Designstruktur ist. Um große Flächen zu ermöglichen, müssen daher die einzelnen Designstrukturfelder definiert multipliziert werden. Eine nahtlose Multiplikation – also eine Aneinanderreihung ohne Übergangsfehler und Unstetigkeiten in den Randbereichen – erfordert somit kachelbare Strukturen. Die Umsetzung der Kachelbarkeit erfordert eine Betrachtung der wesentlichen Gestaltmerkmale der Designstrukturen, wonach sich vier verschiedene Oberflächenstrukturklassen (I bis IV) definieren lassen. Tabelle 6-3 zeigt typische Klassenvertreter.

Strukturgestaltmerkmal	vernetzt	unvernetzt
regelmäßig	<p>I</p> <p>Schindelstruktur</p>	<p>II</p> <p>Referenzstruktur 2 – Riffel</p>
unregelmäßig	<p>III</p> <p>Krokodilleder</p> <p>Referenzstruktur 1 – Leder</p>	<p>IV</p> <p>Regentropfenoberfläche</p>

Tabelle 6-3: Einteilung der Strukturklassen

Classification of structure classes

Klasse I: Vernetzte, regelmäßige Strukturen = bedingte Kachelbarkeit

Das Strukturfeld muss aufwändig digital zur Kachelung ohne Nahtfehler aufbereitet werden.

Klasse II: Unvernetzte, regelmäßige Strukturen = volle Kachelbarkeit

Es müssen die sich wiederholenden Struktureinheiten lokalisiert, separiert und mit einem eigenen Koordinatensystem versehen werden. Daraufhin kann eine regelmäßige Multiplikation erfolgen. Es liegen keine Strukturfehler an den Nahtstellen vor.

Klasse III: Vernetzte, unregelmäßige Strukturen = stark eingeschränkte Kachelbarkeit

Arbeitsfolge wie bei Klasse I. Es liegt jedoch eine gleichmäßige Wiederholung der Struktur vor, so dass der unregelmäßige Strukturcharakter für den Betrachter verloren gehen kann.

Klasse IV: Unvernetzte, unregelmäßige Strukturen = bedingte Kachelbarkeit

Arbeitsfolge wie bei Klasse II. Unregelmäßiger Charakter der Oberflächen kann wie bei Klasse III verloren gehen, es liegen jedoch keine Strukturfehler an den Nahtstellen vor.

Insbesondere bei den Klassen I und III treten aufgrund der Vernetzung Übergangsfehler an den Nahtstellen auf, die zu vermeiden sind. Ein hier genutzter und auf die Aufgabenstellung angepasster Lösungsweg stellt dabei eine digitale, jedoch aufwändige Aufbereitung der Strukturfelder durch eine kreuzweise Vertauschung der einzelnen Quadranten-Flächensegmente dar (Quadranten-Austausch-Methode). Dadurch können alle vernetzten Strukturen in eine kachelbare Struktur überführt werden. Da die nachfolgende Multiplikation eine regelmäßige Wiederholung der modifizierten Strukturfelder ist, liegt jedoch bei unregelmäßigen Strukturen ein nicht vermeidbares sich wiederholendes Erscheinungsbild vor. Bild 6-7 verdeutlicht die prinzipielle Vorgehensweise der Quadranten-Austausch-Methode anhand einer unregelmäßigen und vernetzten Rindenmulchstruktur (Klasse III) im Arbeitsformat einer 2D-Pixelvorlage.

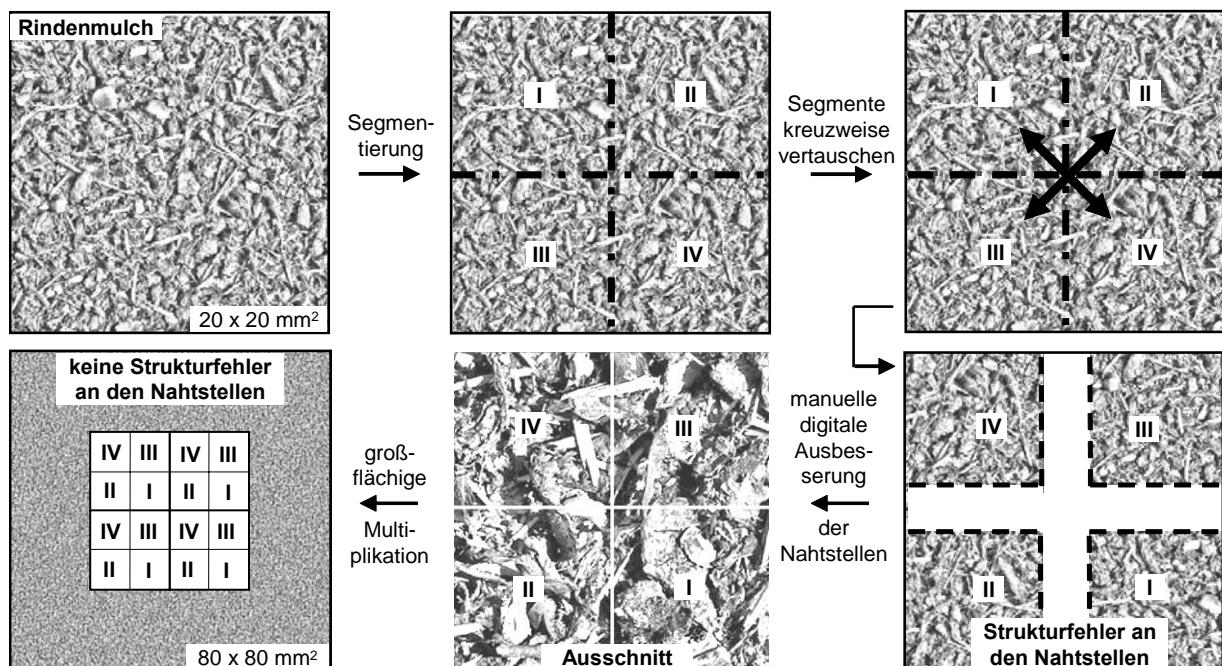


Bild 6-7: Quadranten-Austausch-Methode zur Realisierung der Kachelung

Quadrant-substitution-method for the realisation of the tiling

Durch die Quadranten-Austausch-Methode können Designstrukturen aller Klassen in eine kachelbare Struktur überführt werden. Einzige Einschränkung besteht dabei darin, dass nur Vorlagen mit rechteckiger Grundfläche umgewandelt werden können. Je nach Strukturklasse hat dies jedoch Auswirkungen auf die nachfolgende digitale Übertragung der Designstrukturen auf die Werkzeugoberfläche, insbesondere bei der Oberflächensegmentierung.

6.2 Aufbringung dreidimensionaler Designstrukturen auf Oberflächen

Mapping of three-dimensional design structures on surfaces

6.2.1 Digitale Übertragung von Designstrukturen auf Oberflächen

Digital mapping of design structures on surfaces

Aufgabenstellung: Kachelbare Struktur konturnah und verzerrungsfrei auf Oberfläche übertragen, so dass bauteilspezifische Struktur Anpassungen vorgenommen werden können. Dient als Ausgangsbasis für die Segmentierung – Splitter.

Bei planaren Oberflächen erfordert die Strukturübertragung nur eine geometrische Multiplikation der Struktursegmente, wobei lediglich die Segmentmittelpunkte auf der Oberfläche entsprechend positioniert werden. Das digitale Aufbringen von Strukturen auf gewölbten Oberflächen ist dagegen ein hochkomplexer Vorgang. Diese Aufgabenstellung wird in der 3D-Computergraphik als Texture Mapping bezeichnet. Generell wird unter Texture Mapping die Abbildung einer n-dimensionalen Textur (meist 2D-Bildvorlage) auf eine Oberfläche im dreidimensionalen Raum verstanden [HECK86], [ORLA06], [HANS06, S. 6]. In der Praxis werden zwei grundlegend verschiedene Mapping-Techniken eingesetzt. Bei der ersten Methode werden nur die Farbwerte der Textur auf die Oberfläche übertragen, so dass keine direkte Veränderung der Oberflächenkontur erfolgt. Mit diesen Verfahren können nur visuelle Effekte wie z. B. Transparenz oder Glanz erzeugt werden. Deshalb eignen sie sich nicht für die vorliegende Prozesskette. Bei der zweiten Methode wird dagegen die Oberflächenkontur gemäß der vorliegenden Oberflächenstruktur gezielt verändert bzw. manipuliert [BIRN03], [GRÄF06, S. 32-33]. Die leistungsfähigste Methodik ist dabei das Displacement Mapping, bei dem einzelne Konturpunkte der Bauteiloberfläche entlang ihres Normalenvektors gemäß einer zugeordneten, zuvor definierten Height-Map verschoben werden. Die Farbwerte der Height-Map bestimmen als Gewichtungsfaktor das Maß der Verschiebung. Die Height-Map wird grundsätzlich aus der vorliegenden Textur bzw. Designstruktur erstellt. Je höher die Polygonanzahl der Bauteiloberfläche und die Pixelauflösung der Textur ist, desto feiner kann die Oberfläche verformt werden. Nach dem Displacement Mapping liegt ein vollständig beschriebenes Datenmodell vor, an dem der Designer eventuelle Designmodifikationen durchführen kann. Nach der Polygonberechnung kann eine Weiterverarbeitung im CAM-System erfolgen [STRU04, S. 59], [PÖTZ06], [GRÄF06, S. 16]. Bild 6-8 verdeutlicht die Oberflächenveränderung durch Displacement Mapping und die bestehenden geometrischen Einschränkungen.

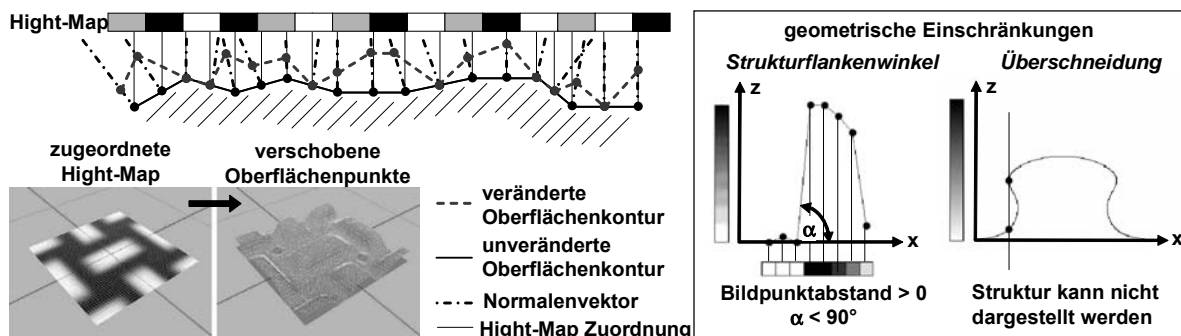


Bild 6-8: Displacement Mapping und dessen geometrische Einschränkungen

Displacement mapping and its geometrical limitations

Nachteile des Displacement Mappings sind neben den langen Rechenzeiten, dass weder rechte Winkel noch Überschneidungen dargestellt werden können [LEON06]. Aufgrund der hier bestehenden Anforderungen an das Strukturdesign, wie die Entformbarkeit, sind diese Einschränkungen jedoch nicht von Bedeutung.

Der wichtigste Arbeitsschritt beim Displacement Mapping ist die Zuordnung der einzelnen Texturpunkte auf der Oberfläche. Die geringsten Verzerrungen werden durch u/v-Height-Maps erreicht. Dabei wird die Oberfläche zuerst durch uniforme u/v-Koordinaten (konstanter Knotenwertabstand entlang der Kontur) parametrisiert. Danach wird dann das definierte u/v-

Koordinatensystem auf die Textur übertragen. Bei einer 2D-Bildvorlage sind u und v äquivalent zu x und y . Jedem Polygonscheitelpunkt der Oberfläche kann ein Texturpunkt zugewiesen werden, so dass durch die gleichen Koordinatensysteme nahezu keine Verzerrungen auftreten [LEON06], [HIRC04], [GRÄF06, S. 22], [EBSE05]. Bild 6-9 verdeutlicht das Displacement Mapping anhand einer u/v -Map.

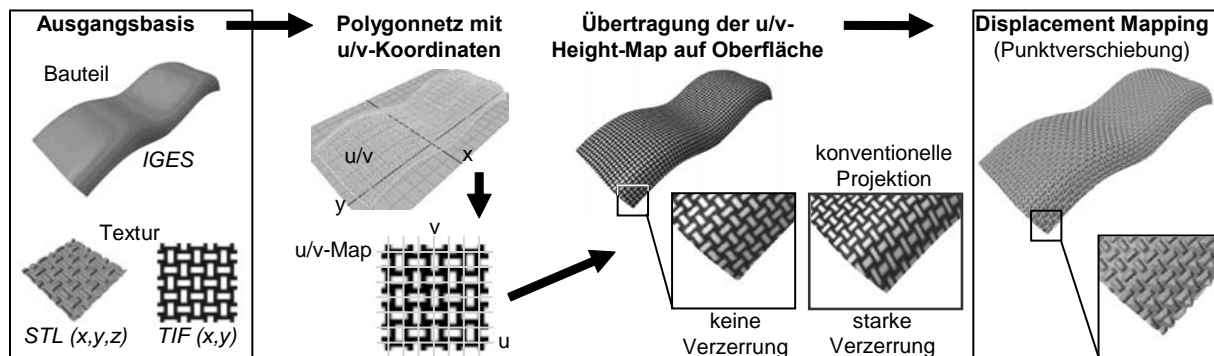


Bild 6-9: Ablauf des Displacement Mapping mittels u/v -Map und Normal-Map
Procedure of displacement mapping with u/v -map and normal map

Obwohl dem Anwender für das Displacement Mapping spezielle Softwareprogramme (z. B. Maya oder Rhino) zur Verfügung stehen, liegen zum Teil hohe manuelle Aufwände vor. Zusätzlich ist umfangreiches Expertenwissen auf dem Gebiet der Designmodellierung erforderlich. Daher kann dieser Prozessschritt nur vom Designer umgesetzt werden. In der 3D-Computergraphik werden laufend verbesserte Softwaremodule entwickelt. Leider erfolgt nur eine unzureichende Portierung dieser Systeme in den Maschinenbau, so dass dort noch große Entwicklungsbedarfe bestehen. In dieser Arbeit wird Autodesk Maya 8.5 eingesetzt.

Insbesondere komplexe und großflächige Bauteiloberflächen erfordern wegen der hohen Datenmengen eine schrittweise Übertragung der Designstruktur auf die Oberfläche. Dabei erfolgt das Displacement Mapping und die Polygonberechnung für jede Einzelteilfläche separat.

6.2.2 Segmentierung der Oberfläche: Splitter

Segmentation of the surface: splitter

Bei der konventionellen Gravurfräsbearbeitung werden stets die NC-Daten für die gesamte strukturierte Oberfläche berechnet, so dass die dadurch vorliegende hohe Datenmenge die Größe und Komplexität der Bauteile und die Oberflächenstruktur begrenzen. Um eine Vorstellung über die vorliegende Datenlimitierung und somit über die maximal bearbeitbaren Oberflächengrößen im CAM-System zu bekommen, soll der folgende Fall als Beispiel dienen:

Für ein $625 \text{ mm}^2 \times 100 \mu\text{m}$ großes STL-Netz der in Bild 2-3 dargestellten Struktur (Datengröße 65 MByte) kann keine einzelne Werkzeugbahn (z' -Level-Constant-Machining) mit einer Schichttiefe s von $10 \mu\text{m}$, einem Spurabstand von $10 \mu\text{m}$ und einer Maschinengenauigkeit von $2 \mu\text{m}$ (entspricht in etwa der Positionierengenauigkeit des 3-Achs-Scannersystems) im CAM-System (Delcam PowerMill Version 6.008) berechnet werden. Erst durch eine Halbierung der Feldgröße können die Werkzeugbahnen verlässlich erzeugt werden, ohne dass Programmabstürze auftreten.

Eine Segmentierung der gesamten Oberfläche und eine darauf folgende sequenzielle Erstellung der NC-Daten reduziert die jeweils vorliegenden Datenmengen erheblich. Wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben, wird ein Oberflächensegment durch seine Abmessung sowie durch die Lage und Orientierung seines Koordinatensystems zum globalen Werkstückkoordinatensystem eindeutig festgelegt. Damit eine Aufteilung der Oberfläche in einzelne Segmente durchgeführt werden kann, muss die maximal nutzbare Segmentabmessung bekannt sein.

Die maximale Segmentabmessung wird durch die Größe des vorliegenden Scannervolumens limitiert ($V_{s,\text{max}} = 1500 \text{ mm}^3$ bei max. z' -Hub von 2,4 mm) (Tabelle 5-3). Dabei muss die Bau-

teilkontur in das Segment passen. Dies hat je nach Werkzeugoberflächenform eine Größenbegrenzung der Segmente zur Folge und erfordert eine Ausrichtung des relativen Segmentkoordinatensystems zum globalen Koordinatensystem. Die nutzbare Segmentgröße wird weiterhin durch den Winkel $\Delta\tilde{n}$ beeinflusst. Ab einem Grenzwert $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$ ist ein inhomogener Laserabtrag zu erwarten. Dies ist auf eine Verringerung der absorbierten Laserstrahlintensität aufgrund erhöhter Oberflächenreflexion (Einfluss der s- und p-Polarisation – Fresnel-Effekt [POPR02]) sowie durch die elliptische Projektion des Strahlfokus auf der Oberfläche (Fokusflächenvergrößerung) zurückzuführen. Der Grenzwert muss durch Versuche bestimmt werden, die jedoch umfangreiche Kenntnisse über prozesssichere Bearbeitungsparameter und -strategien erfordern und daher erst in Kapitel 7 durchgeführt werden können.

Einen Sonderfall der Segmentierung stellen ebene Werkzeugoberflächen dar, wie sie z. B. bei Musterplattenwerkzeugen vorliegen. Dabei entstehen durch die Werkzeugoberflächenform keine Größenlimitierungen, so dass im Allgemeinen das maximale Scannervolumen als Segmentierungsgröße verwendet werden kann (Bild 6-11).

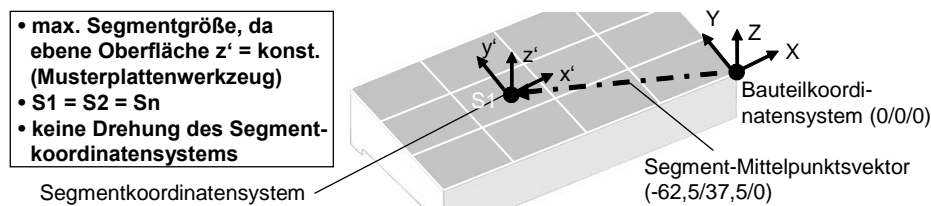


Bild 6-11: Segmentierung einer ebenen Oberfläche

Segmentation of a flat surface

Bei Freiformoberflächen sind im Vergleich zu ebenen Werkzeugoberflächen meist alle Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Außerdem liegen zum Teil Verdrehungen des Segmentkoordinatensystems jeweils um die Winkel $\varphi_{x'}$, $\varphi_{y'}$ und $\varphi_{z'}$ vor (Bild 6-12).

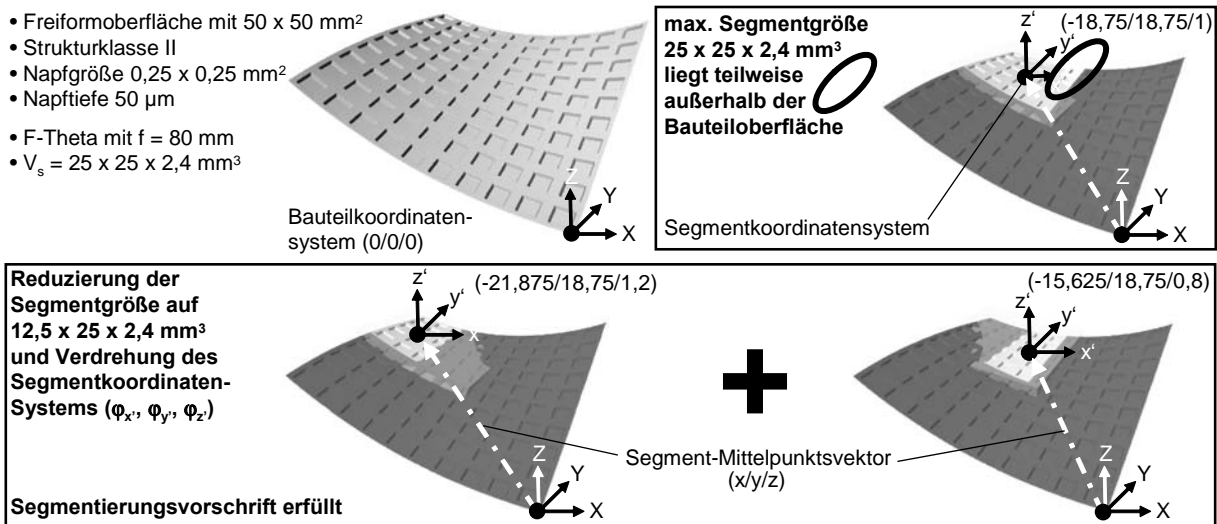


Bild 6-12: Segmentierung einer Freiformoberfläche

Segmentation of a freeform surface

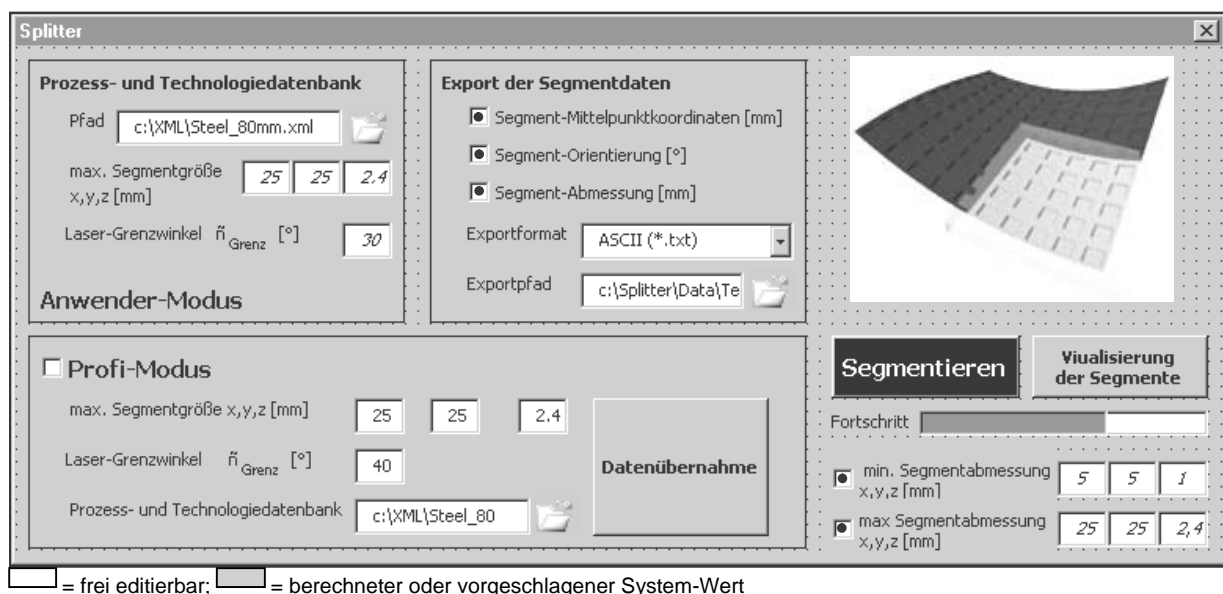
Es lässt sich die nachfolgende Segmentierungsvorschrift definieren:

Zusammenfassen von benachbarten Konturpunkten, solange der Winkelgrenzwert $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$ eingehalten und die maximale Segmentgröße, hier $25 \times 25 \times 2,4 \text{ mm}^3$, nicht überschritten wird.

Für ebene, in der Fläche stark begrenzte Oberflächen kann aufgrund der geringen Komplexität eine manuelle Anwendung der Segmentierungsvorschrift erfolgen. Bei Freiformoberflächen ist die Segmentierung jedoch ein komplexer Vorgang, so dass die Segmentierungsvorschrift durch ein spezielles Softwaremodul unterstützt werden muss. Das vollständig strukturierte Oberflächenmodell weist im Allgemeinen eine sehr hohe Datenmenge auf, so dass am Markt

verfügbare CAM-Systeme überfordert sind. Weiterhin verfügen diese nicht über spezifische Funktionalitäten. Eine alternative Möglichkeit ist die Durchführung der Segmentierung während des Displacement Mappings vor der Polygonberechnung, weil dort die strukturierte Oberfläche in einer verarbeitbaren Datengröße als 2D-Pixelformat vorliegt. Die am Markt verfügbaren Software-Applikationen zum Displacement Mapping verfügen jedoch auch nicht über entsprechende Funktionalitäten. Die Entwicklung einer entsprechenden Splitter-Applikation kann hier nicht geleistet werden, daher wird im Folgenden ein Umsetzungskonzept vorgestellt.

Bild 6-13 stellt das Konzept eines Graphic-User-Interface-Panels (GUI-Panel) zur Oberflächensegmentierung vor. Im Anwender-Modus sind lediglich die Fokussieroptik durch Vorwahl der Prozess- und Technologiedatenbank sowie der Datenexport zu definieren. Alle weiteren Daten zur Ausführung der Segmentierungsvorschrift werden dann automatisch aus der Datenbank entnommen, so dass eine hohe Anwenderfreundlichkeit besteht. Im Profi-Modus kann hingegen der Bediener alle notwendigen Daten direkt eingeben und, falls gewünscht, diese in der Datenbank abspeichern. Nach erfolgreicher Segmentierung können dem Anwender die minimalen und maximalen berechneten Segmentgrößen zur Kontrolle ausgegeben werden. Weiterhin ermöglicht das Modul eine Visualisierung der Segmentverteilung auf der Oberfläche, wobei die Segmentgrenzen als Boxen auf dem Bauteil dargestellt werden.



= frei editierbar; = berechneter oder vorgeschlagener System-Wert

Bild 6-13: GUI-Konzept des Splitter-Moduls

GUI concept of the splitter module

6.3 Steuerungssystem und Generierung von NC-Bearbeitungsdaten

Control system and generation of the NC machining data

Schwerpunkt dieses Kapitels ist die Generierung der NC-Daten für den Global- und den Segment-Toolpath, wobei hinsichtlich einer hohen Anwenderakzeptanz möglichst auf vorhandene CAM- und PP-Module zurückgegriffen wird. Damit die spezielle Bewegungsführung des 3D-Segment-Prozesses mit der vorhandenen Anlage erfolgen kann, wird zuerst ein Steuerungskonzept basierend auf einer synchronisierten Verknüpfung der Handhabungs- mit der Lasermodulsteuerung erarbeitet und umgesetzt. Kernfragment ist dabei eine spezielle Steuerungssoftware für das Lasermodul, das Scanner-Back-End. Zum einen überführt es die ISO-NC-Daten des Segment-Toolpaths in Lasermodulsteuerungskommandos und zum anderen führt es die Kommunikation zwischen den beiden Steuerungssystemen durch.

6.3.1 Steuerungsverknüpfung: Mikron (iTNC 530) – Lasermodul (RTC3)

Control connection: Mikron (iTNC 530) – laser module (RTC3)

Für einen automatisierten 3D-Segment-Prozesse muss die Steuerung folgende, wesentliche Funktionalitäten aufweisen:

- Synchronisation aller einzelnen Steuerungen durch ein System
- einheitliche standardisierte Programmiersprache für alle Systemmodule
- Dateneingabe für alle Systemmodule in einem industriebewährten CAM-System, so dass auch komplexe Bewegungsführungen genutzt werden können
- offenes und portierbares Konzept zur Erweiterung der Funktionalitäten
- echtzeitfähiges System zur Reduzierung von Wartezyklen
- zentrale Verwaltung aller Prozessdaten in einer Datenbank zur Redundanzvermeidung

Die Umsetzung der zuvor definierten Funktionalitäten erfordert ein neuartiges Steuerungskonzept, das eine Verknüpfung der Handhabungssteuerung (Heidenhain iTNC530) mit den einzelnen Lasermodulsteuerungen (Scanlab RTC, EdgeWave Lascon) ermöglicht. Kern des Konzepts muss eine zentrale Steuerungseinheit sein, welche die Koordination aller Systeme zur Sicherstellung einer automatisierten Abfolge des 3D-Segment-Prozesses übernimmt.

Einen ähnlichen Ansatz einer Steuerungsverknüpfung zwischen einer Handhabungsanlage, einer Laserstrahlquelle und einem 3-Achs-Scannersystem wurde zeitparallel von Willenborg in einer Laboranlage zum Laserpolieren umgesetzt [WILL06]. Dabei übernimmt die NC-Steuerung der Handhabungsanlage durch eine Befehlsenerweiterung die Kontrolle über die Scanner- und Lasersteuerung. Zentrale Einheit des Konzepts ist ein NC-Programm, das alle notwendigen Steuerungskommandos sowohl für das Handhabungs- als auch für das Scanner- und Lasersystem beinhaltet. Während der satzweisen Ausführung des NC-Programms stoppt die NC solange bei den Scanner- und Laserbefehlen, bis diese ausgeführt sind. Diese Befehle werden durch die SPS entweder direkt an die Scannersteuerung gesendet oder indirekt durch die SCommand.dll (Applikation auf Industrie-PC) in für die Scannersteuerung verarbeitbare Kommandos übersetzt. Direkte Kommandos sind z. B. Start/Stop des Scanners, indirekte Kommandos sind z. B. die Verfahrwegkommandos der Scannerspiegel. Es wird eine sequenzielle Bearbeitung der Oberfläche ermöglicht [WILL06, S. 97-110]. Aufgrund der im Folgenden vorgestellten wesentlichen Defizite kann die von Willenborg umgesetzte Steuerungsverknüpfung jedoch nicht für die hier vorliegende Anwendung eingesetzt werden:

- Eingabe der NC-Programme für Handhabungsanlage über Text-Editor; keine geometrieorientierte CAM-Kopplung, daher stark begrenzte Bauteilkomplexität
- spezielle Befehle (Dialekt) für Scanner- und Lasersteuerung im NC-Programm, daher keine Portierung auf andere Anlagen möglich und hoher Schulungsaufwand nötig
- Eingabe der Scanner- und Laserkommandos nur nachträglich in das NC-Programm; keine geometrieorientierte Softwareunterstützung, daher sehr zeitintensiv und eingeschränkt
- eigener Scanner-Dialekt ermöglicht nur geringe Komplexität der Scannerbewegung (Linien und Rechtecke) und somit keine komplexen Strukturen
- keine Datenbank oder Ähnliches, in der unterschiedliche Grundeinstellungen des Scanners oder des Lasers sowie Prozesstechnologieparameter gespeichert werden können
- SCommand.dll nutzt nur die von Scanlab zur Verfügung gestellten Bearbeitungsstrategien (flächige Zick-Zack-Bewegung), Strategien für Freiformoberflächen sind nicht verfügbar
- Übergabe der Scanner- und Lasersteuerungskommandos über die SCommand.dll mit erheblichem Zeitverzug (Rechenzeit des PCs), keine Echtzeitfähigkeit

Obwohl das hier entwickelte Steuerungssystem einen ähnlichen Ansatz wie die Laserpoliersteuerung von Willenborg verfolgt, ermöglicht es die automatisierte Abfolge des 3D-Segment-Prozesses. Insbesondere ist dies auf eine konsequente, anwendungsbezogene Entwicklung von leistungsfähigen Schnittstellen und spezialisierten Softwaresystemen zurückzuführen. In Bild 6-14 ist das erarbeitete Steuerungskonzept schematisch dargestellt.

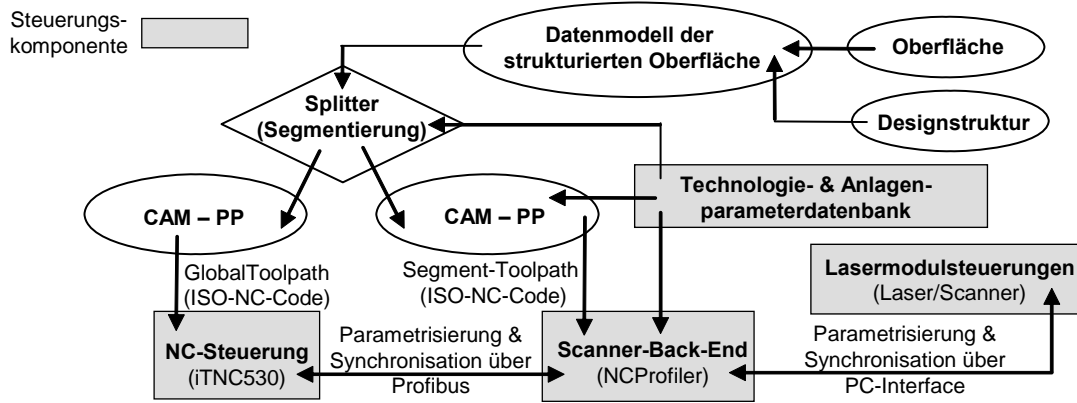


Bild 6-14: Steuerungskonzept des 3D-Segment-Prozesses

Control concept of the 3D segment process

Der 3D-Segment-Prozess erfordert zwei NC-Bewegungsführungen: Global- und Segment-Toolpath. Mittels CAM-Modulen und Post-Prozessoren werden die jeweiligen Toolpaths zu NC-Programmen im ISO-NC-Code generiert. Die Synchronisation der Handhabungs- mit der Lasermodulsteuerung erfolgt mittels der speziellen Softwareapplikation »Scanner-Back-End«, einer Steuerungserweiterung der Heidenhain iTNC530 und einem Profibussystem. Das Scanner-Back-End überführt die ISO-NC-Daten des Segment-Toolpaths in Lasermodulkommandos und steuert die einzelnen Steuerungen des Lasermoduls. Durch die Verwendung des ISO-NC-Codes liegt eine hohe Systemkompatibilität vor. Eine zentrale Technologie- und Anlagen-datenbank enthält alle notwendigen Prozessdaten. Die Erstellung der Technologiedatenbank erfolgt in Kapitel 6.3.3 und deren Umsetzung in Kapitel 7. Die Handhabungsanlagensteuerung übernimmt die Koordination, arbeitet den Global-Toolpath ab und stellt somit eine automatisierte Abfolge des 3D-Segment-Prozesses sicher.

Der Global-Toolpath muss die Bewegungsführungsdaten der Werkzeugmaschine zu den einzelnen Segmentmittelpunkten aufweisen und den Programmnamen des Segments den entsprechenden Segment-Toolpaths zuweisen. Zur Parametrisierung, Synchronisation und Steuerung des Lasermoduls erfolgt eine wechselseitige Kommunikation der Handhabungssteuerung mit dem Scanner-Back-End bzw. dem I/O-Interface der RTC3 über einen echtzeitfähigen Profibus-DP. Dazu wird der Befehlssatz der iTNC 530 um zusätzliche Befehle erweitert, die sich aus den Parametern des Lasermoduls und aus den Steuerungskommandos für das Scanner-Back-End zusammensetzen. Der Profibus-Standard bietet eine offene Programmierschnittstelle, so dass Erweiterungen oder Portierungen auf andere Systemkomponenten möglich sind. Bild 6-17 zeigt einen Auszug eines Global-Toolpaths für die HSM 600U im Heidenhain Klartext-NC-Code mit einer Kommentierung der NC-Sätze.

```

0 BEGIN PGM MikronTest_V1 MM ; Programmstart
1 L X0 Y0 Z0 F200 ; Mittelpunkt 1. Laserfeld
2 L M401 ; Lasererweiterung ON
3 FN19: PLC=52074.1/4 ; Parameter für Scanner-Back-End – Command (hier Lasertool)
4 FN19: PLC=52074.2/17 ; Parameter für Scanner-Back-End – Data (hier 17)
5 L M410 ; Befehl auslesen über SPS (NC-Stopp bis Laser-Busy-Signal aufgehoben)
6 FN19: PLC=52074.1/1 ; Parameter für Scanner-Back-End – Command (hier Scannerprogramm)
7 FN19: PLC=52074.2/1 ; Parameter für Scanner-Back-End – Data (hier 1.nc)
8 L M410 ; Befehl auslesen über SPS (NC-Stopp bis Laser-Busy-Signal aufgehoben)
9 L M411 ; Scanner Start über SPS (NC-Stopp bis Laser-Busy-Signal aufgehoben)
10 L X-20 Y+0 F100 ; Mittelpunkt 1. Laserfeld
11 FN19: PLC=52074.1/1 ; Parameter für Scanner-Back-End – Command (hier Scannerprogramm)
12 FN19: PLC=52074.2/2 ; Parameter für Scanner-Back-End – Data (hier 2.nc)
13 L M410 ; Befehl auslesen über SPS (NC-Stopp bis Laser-Busy-Signal aufgehoben)
14 L M411 ; Scanner Start über SPS (NC-Stopp bis Laser-Busy-Signal aufgehoben)
...
25 LM400 ; Lasererweiterung OFF
26 END PGM MikronTest_V1 MM ; Programmende

```

Bild 6-15: Globales NC-Programm mit Befehlserweiterung im Heidenhain Klartext-NC-Code

Global NC programme with command extension in Heidenhain natural NC code

Nachdem die Position des Lasersegments angefahren ist, können über eine implementierte Hilfsfunktion bis zu 32 Parameter des Lasermoduls (z. B. Laserpumpstrom) mit einer Varianz von bis zu 256 Werten dem Scanner-Back-End übergeben werden. Diese Dateneingabe bietet sich an, falls von der Standardkonfiguration des Lasermoduls abweichende Einstellungen nötig sind. Eine sichere Übergabe der Parameter (M410) wird durch eine NC-Stopp-Routine in Verbindung mit einem Laser-Busy-Signal ermöglicht. Nach Aufruf des Dateinamens wird dieser in das Scanner-Back-End geladen, dabei können bis zu 1024 verschiedene Dateinamen adressiert werden. Der Segment-Toolpath enthält den Aufruf eines Lasertools, der alle nötigen Prozess- und Technologieparameter aus der Datenbank entnimmt. Nach dem Befehl Scanner Start (M411) erfolgt die automatisierte Abarbeitung des Segment-Toolpaths. Am Ende der Segment-Bearbeitung wird das Laser-Busy-Signal aufgehoben und es erfolgt die Weiterverarbeitung des Global-Toolpaths. Durch diese Befehlsabfolge kann eine großflächige Bearbeitung erfolgen. Die umgesetzte Kommunikationsschnittstelle wird in Bild 6-16 verdeutlicht.

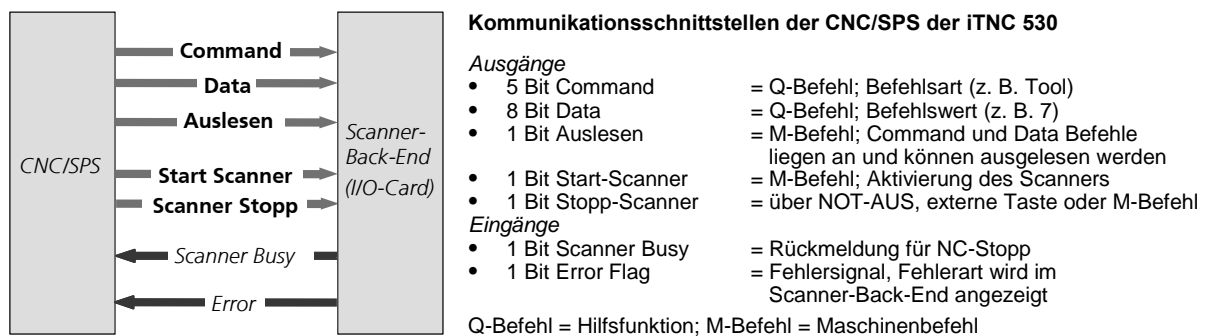


Bild 6-16: Kommunikationsschnittstelle basierend auf Profibus-DP

Communication interface based on Profibus-DP

6.3.2 NC-Datengenerierung: Global-Toolpath

NC-data generation: global tool path

Für einfache Geometrien kann der Global-Toolpath manuell erzeugt werden. Dies kann jedoch bei komplexen und großflächigen Oberflächen nicht mehr vom Bediener geleistet werden, so dass eine Softwareunterstützung benötigt wird. Eine mögliche Umsetzung bzw. Vorgehensweise wird im Folgenden vorgestellt.

Das in Kapitel 6.2.2 vorgestellte Konzept einer Splitter-Applikation liefert als Ausgabeformat z. B. eine ASCII-Datei. Durch einen geeigneten Eingangsfilter werden die Segmentmittelpunkte als eine Punktwolke vom CAM-System interpretiert, wobei sich die Positionskoordinaten der Segmentmittelpunkte auf den Bauteilnullpunkt beziehen. Die Informationen über die Orientierung des Segmentkoordinatensystems werden zur Erstellung von relativen Koordinatensystemen genutzt. Die Bezeichnungen der Segmente werden als Kommentare übergeben. Um eine kollisionsfreie Bewegungsführung zu den einzelnen Segmentmittelpunkten mit den verfügbaren CAM-Standardstrategien durchführen zu können, muss die unstrukturierte Makrogeometrie im CAM-System hinterlegt sein. Der Bediener wählt nun die Segmentmittelpunkte in der gewünschten Reihenfolge an und erzeugt durch einzelne Punkt-Anfahroperationen die Bewegungsführung der Handhabungsmaschine. Der Laser wird dabei als ein unsymmetrisches Werkzeug simuliert, um die Bauteilorientierung berechnen und eine Kollisionsbetrachtung durchführen zu können. Nachdem diese Prozedur für alle Segmentmittelpunkte durchgeführt wurde, kann der NC-Code des Global-Toolpaths durch einen PP erzeugt werden (vgl. Bild 6-15). Der PP berücksichtigt die Maschinenkinematik und erzeugt die zusätzlichen Steuerungskommandos für die Kommunikation mit dem Scanner-Back-End. Bild 6-17 zeigt die Visualisierung einer möglichen Global-Toolpath-Erzeugung, wobei zur besseren Visualisierung die Bauteiloberfläche ausgeblendet ist.

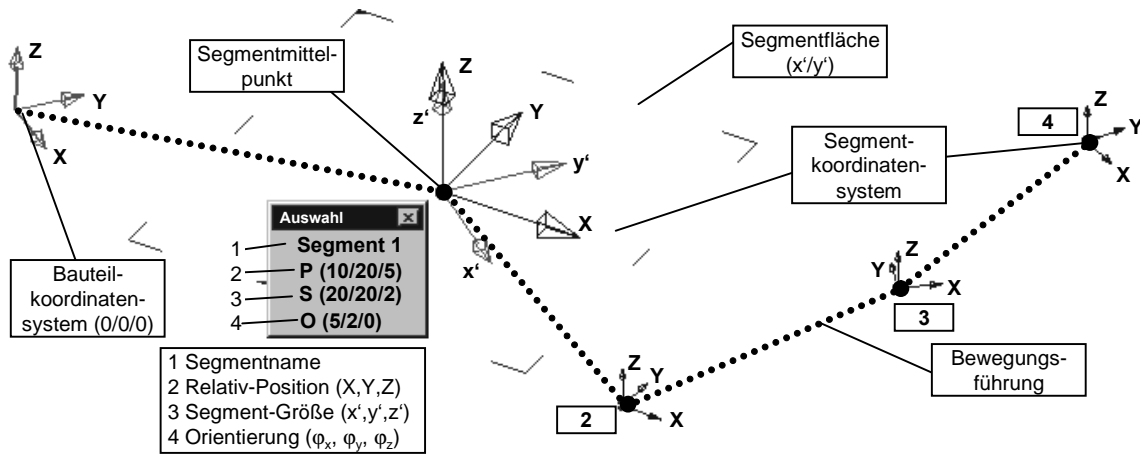


Bild 6-17: Erstellung eines Global-Toolpaths im CAM-System (Powermill)
Generation of a global tool path in the CAM system (Powermill)

6.3.3 NC-Datengenerierung: Segment-Toolpath
NC-data generation: Segment tool path

Ausgangsbasis: Digital beschriebene Segmente (z. B. im STL-Format), die der Segmentierungsvorschrift genügen. Das Koordinatensystem befindet sich stets im Segmentmittelpunkt.

Um eine hohe Anwenderakzeptanz für die Prozesskette sicherzustellen, sollten bei der NC-Datengenerierung des Segment-Toolpaths vor allem konventionelle Frässtrategien genutzt werden. Als CAM-System steht hier PowerMill 8.0.08 zur Verfügung, welches in der Produktion bereits vielfach zur Generierung von NC-Programmen für HSC-Maschinen eingesetzt wird. Es sollten bei der Bahnprogrammierung möglichst keine Laserparameter, wie z. B. Laserleistung oder Pulsfrequenz, vom Bediener abgefragt werden, da in der industriellen Anwendung kein spezielles Lasertechnologiefachwissen vorausgesetzt werden kann. Die Auswahl der Prozessparameter muss anhand greifbarer Kenngrößen, wie Abtragraten oder Abtragqualität, erfolgen. Es müssen daher geeignete Schnittstellen entwickelt werden. Zur Identifizierung von geeigneten Bewegungsführungen müssen die auftretenden Anwendungsfälle definiert werden, die durch die Makrokontur des Segments bestimmt werden:

- (i) Bearbeitung ebener Konturen
- (ii) Bearbeitung gewölbter Konturen

Parameter		Einheit	Beschreibung/Definition
Pulsabstand	S	%	Abstand der Pulsmittelpunkte in Vorschubrichtung mit $S [\%] = v_f / (d_{Abtrag} \cdot f_p) \cdot 100\%$ (Formel 6-1) <i>Beispiele:</i> S (100 %) = d_{Abtrag} , d. h. keine Überlappung der Pulse entlang der Laserbahn S (0 %) = 0, d. h. alle Pulse liegen stets übereinander, so dass kein Vorschub vorliegt
Bahnabstand	n	µm	Abstand der Laserpulse in Zustellrichtung, auch Hatch genannt, mit Hatch $H [\%] = n / d_{Abtrag} \cdot 100\%$ (Formel 6-2) <i>Beispiele:</i> H (100 %) = d_{Abtrag} , kein Überlapp der Pulse von benachbarten Laserbahnen H (0 %) = 0, alle Bahnen liegen übereinander
Vorschub	v_f	mm/s	Bewegungsgeschwindigkeit des gepulsten Lasers in Vorschubrichtung
Abtragwinkel	γ	°	Flankenwinkel des Einzel-Laserpulses in der Oberfläche
Einzelnäpfchendurchmesser	d_{Abtrag}	µm	max. Durchmesser des Einzel-Laserpulses in der Oberfläche
Abtragtiefe	t_{Abtrag}	µm	max. Tiefe des Einzel-Laserpulses in der Oberfläche
Flächenverfahrzyklus	-	-	Verfahrrichtung bzw. -folge und Bahnanordnung

Tabelle 6-4: Wesentliche kinematische Parameter beim Laserabtrag
Main kinematic parameters of the laser ablation

Ein Laserabtrag kann durch schichtkonstantes Aneinandersetzen einzelner Pulsabträge erzielt werden kann. In Tabelle 6-4 werden die wesentlichen kinematischen Bewegungsparameter beim Laserabtrag vorgestellt. Bild 6-18 verdeutlicht graphisch den ein-, zwei- und dreidimensionalen Laserabtrag. Es wird ersichtlich, dass der Einzelpulsgeometrie eine besondere Bedeutung zukommt und dass diese deshalb näher untersucht werden muss.

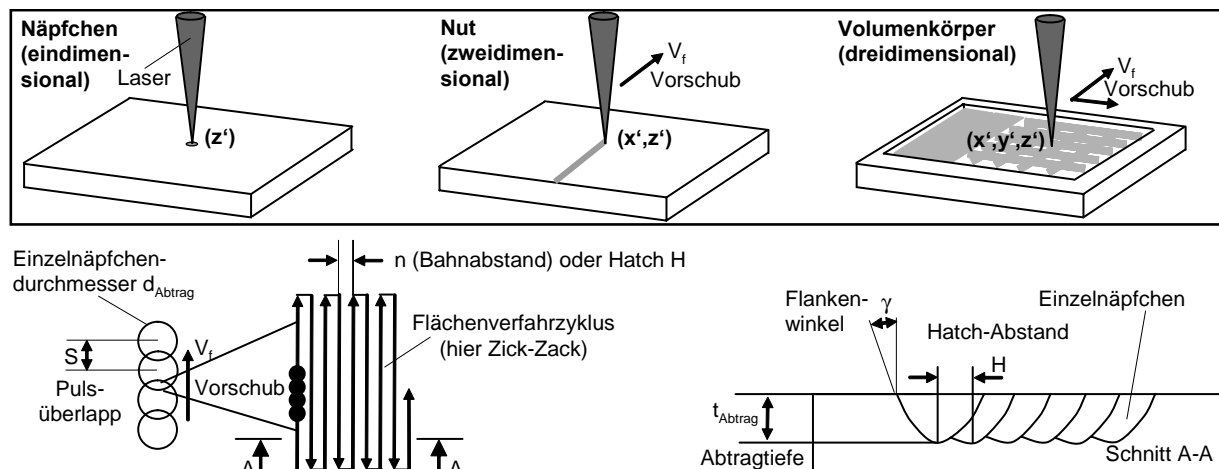


Bild 6-18: Kinematische Parameter beim ein-, zwei- und dreidimensionalen Laserabtrag [nach LÄSS94, S. 20]

Kinematic parameters of the one-, two- and three-dimensional laser ablation

Das Herausarbeiten von Volumenkörpern erfolgt meist schichtweise im 2½D-Prozess. In Bild 6-19 sind die wichtigsten Fräs-Flächenverfahrenszyklen dargestellt. Bei einer Laserbearbeitung sollten diese Verfahrenszyklen auch zur Verfügung stehen. Durch Abtragversuche werden in Kapitel 7 die Auswirkungen der verschiedenen Flächenverfahrenszyklen auf den Abtrag untersucht.

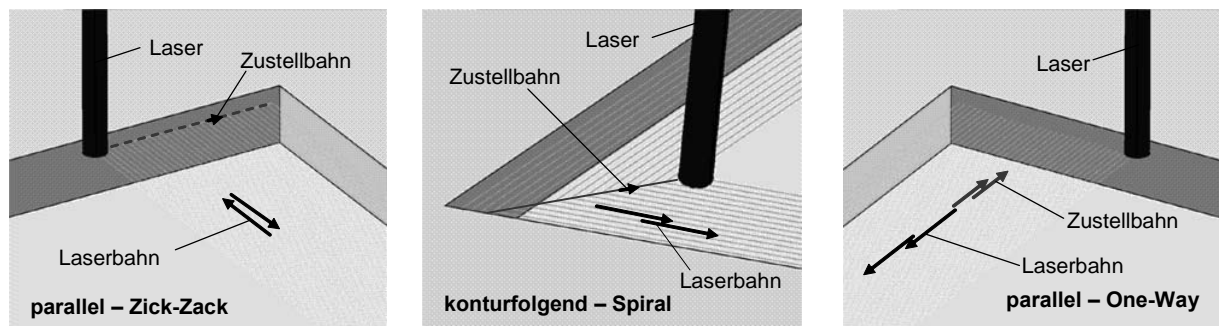


Bild 6-19: Flächenverfahrenszyklen beim schichtweisen Abtragen (Basis: Frästechnologie)

Plane machining strategies of the layer based cutting (basis: milling technology)

Bei beiden Anwendungen (i) und (ii) muss das Segment in einzelne Schichten unterteilt werden, wie es auch bei der Frästechnologie üblich ist. Der Schichttiefe und dem Verlauf der Schichten kommen dabei große Bedeutungen zu.

Schichttiefe

Die Schichttiefe h hat maßgeblichen Einfluss auf die Abbildungsgenauigkeit der Struktur (Treppenstufeneffekt). Eine geringe Schichttiefe weist grundsätzlich kleine Treppenstufen und somit eine höhere Abbildungsgenauigkeit auf. Bei einer geringen Schichttiefe wird die Struktur in eine hohe Anzahl von Schichten unterteilt, was den Berechnungsaufwand und die Datenmenge deutlich erhöht. Die optimale Schichttiefe muss durch Bearbeitungsversuche bestimmt werden. Die gewählte Schichttiefe sollte der Abtragtiefe entsprechen.

Verlauf der Schichten

Man unterscheidet grundsätzlich eine Aufteilung der Struktur in zur Z-Ebene parallele Schichten (z' -Level-Constant-Machining, Bild 6-20) und in konturparallele Schichten entlang der Flä-

chennormalen (Constant-Offset-to-Contour-Machining, Bild 6-21). Bei der Bearbeitung einer Ebene (i) ist der Verlauf der Schichten bei beiden Methoden gleich. Aufgrund der einfacheren Programmierung wird daher meist das z' -Level-Constant-Machining genutzt, da eine geringere Anzahl von Berechnungsparametern zu definieren ist. Bei der Bearbeitung einer gewölbten Kontur (ii) wird dagegen das Constant-Offset-to-Contour-Machining eingesetzt, wodurch eine homogenere Bahnaufteilung und Bewegungsführung sowie eine geringere Anzahl von Bearbeitungsschichten (NC-Datenreduzierung) erzielt werden kann.

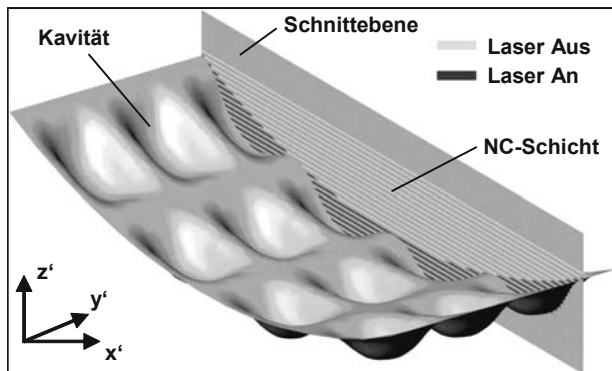


Bild 6-20: z' -Level-Constant-Machining

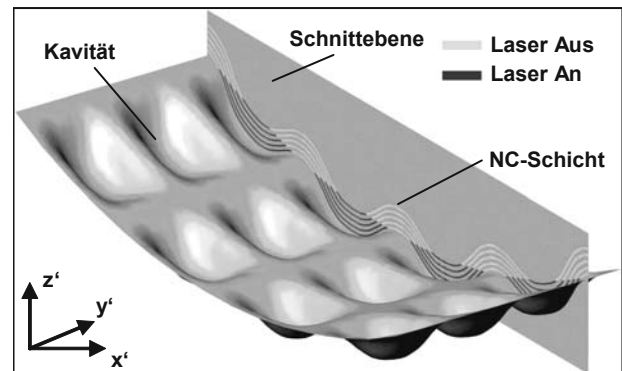


Bild 6-21: Constant-Offset-to-Contour-Machining

Nach dem Import des Segments ins CAM-System wird zuerst das Rohteilmodell erzeugt. Je nach vorliegender Makrokontur muss die entsprechende Methodik zur Erzeugung der Schichten (vgl. Bild 6-20 und 6-21) ausgewählt werden. Es liegen somit einzelne Schichten vor, für deren Bearbeitung geeignete Bewegungsführungen für den Laserstrahl generiert werden müssen. Dabei werden vorhandene CAM-Strategien eingesetzt, bei denen der Laser als konventionelles Kugelfräserschaffwerkzeug angesehen wird. Dabei entspricht der Werkzeugdurchmesser dem Laserstrahldurchmesser d_f , die Schnitttiefe a_p der Schichttiefe h und die seitliche Zustellung a_e dem Bahnabstand n . Die Werkzeuglänge l wird mit dem Arbeitsabstand des Lasers gleichgesetzt. Neben den geometrischen Kenngrößen des Laserstrahls müssen nun die restlichen Technologieparameter für den Laserstrahlabtrag, wie Laserpumpstrom I_A , Pulsfrequenz f_p und Vorschub v_f , definiert werden. Diese können im CAM-System jedoch nicht ohne umfangreiche softwaretechnische Anpassungen abgebildet werden. Daher wird hier ein spezielles, auf alle CAM-Systeme übertragbares, additives Lösungskonzept vorgeschlagen und umgesetzt. Alle für den Laserabtrag notwendigen Parameter werden durch eine zusätzliche Erweiterung, das so genannte Laser-Tool Tx, im NC-Code repräsentiert. Die Technologie- und Anlagendatenbank enthält dabei alle Zuordnungen der Laser-Tools (Kapitel 6.3.4).

Ein wesentlicher Unterschied beim Laserabtrag gegenüber der Fräsbearbeitung besteht in der Abtragszustellung, was durch die unterschiedlichen Abtragmechanismen begründet ist. Beim Fräsen muss bei der zu bearbeitenden Schicht stets eine Zustellung zum Materialabtrag (a_p , a_e) gefahren werden, damit die Schneiden des Fräasers in das Material eintauchen. Daher wird immer auf die noch nicht vorhandene Zerspankontur programmiert. Beim Laserabtragen erfolgt hingegen der Abtrag von der Oberfläche in die Tiefe, so dass kein Untermaß berücksichtigt werden muss. Dieser Umstand hat Auswirkungen auf die Schichtaufteilung, so dass beim Laserabtragen die erste Schicht die Oberflächenkontur darstellt ($h = 0$). Weiterhin ist für einen homogenen Laserabtrag ein konstanter Bahnabstand erforderlich, da der Laserstrahl stets über dem gesamten Fokussdurchmesser Material abträgt.

Die Ausführung der in Bild 6-19 aufgezeigten Verfahrenzyklen erfolgt taschenweise, d. h., es werden geschlossene Bereiche zusammengefasst und sequenziell abgearbeitet. Vorteile der Taschenbearbeitung gegenüber anderen Strategien, wie z. B. der Ebenenbearbeitung, sind:

- minimierte Positionierbewegungen – reduzierte Bearbeitungszeiten
- geringere Anzahl von An- und Abfahrten (Laser An/Aus) – höhere Abtragqualität
- längere, kontinuierliche Laserbearbeitungszyklen – homogenerer Abtrag

Die Erstellung der Bewegungsführung des Laserstrahls in Form einer Taschenbearbeitung erfolgt hier stets mit der Methodik – Abtragen mit Rasterstrategie – in Powermill 6.0.08. Durch diesen Algorithmus erfolgt die vollständige Bewegungsführung des Laserstrahls im Segment. Bild 6-22 im Anhang A2 zeigt das dazu entsprechende Programmier-GUI-Panel – Abtragen mit Rasterstrategie – in Powermill 6.0.08. Die für den Laserprozess zu definierenden Parameter sind dabei markiert und erläutert. Ein angepasster PP realisiert die Ausgabe der Bewegungsführung im ISO-NC-Code, so dass eine hohe Portierungsmöglichkeit besteht. Bild 6-23 zeigt den Ausschnitt eines ISO-NC-Programms für ein Segment.

```

N10 ; Programmstart
N20 T2                                (Definition des Laser-Tools, hier Nummer 2)
N30 G01 X-0.5731 Y-0.7536 Z-0.01      (Positionierbewegung der Scannerspiegel)
N40 M301                              (Laser An: Schaltung von Pulsfrequenz und die Laserleistungsvorgabe)
N50 X0.5993 Y-0.7536                 (Positionierbewegung der Scannerspiegel)
...
N42870 X-1.9291 Y3.1533 Z-0.1        (Positionierbewegung der Scannerspiegel)
N42880 X-2.6916                      (Positionierbewegung der Scannerspiegel)
N42890 M300                          (Laser Aus)
N42900 X-1.0205 Y1.8159 Z0           (Positionierbewegung der Scannerspiegel)
N42910 ; Programmende

```

Bild 6-23: Segment-Toolpath im ISO-NC-Code

Segment tool path in ISO-NC-Code

Der Segment-Toolpath muss nun durch eine geeignete Softwareapplikation in für das Lasermodul verständliche Kommandos überführt werden. Dazu wird das Scanner-Back-End benötigt, welches speziell für die vorliegende Anwendung entwickelt wurde.

= frei editierbarer Parameter; = aus der Datenbank vorgeschlagener Systemparameter

Bild 6-24: GUI-Panel zur Laser-Tool-Auswahl mit Datenbankzugriff

GUI panel for the selection of the laser tool with access to the data bank

Die Auswahl des geeigneten Laser-Tools erfolgt anhand von greifbaren Kenngrößen in der Prozess- und Technologiedatenbank, so dass kein spezielles Laserfachwissen nötig ist und somit eine hohe Benutzerfreundlichkeit vorliegt. Dazu verfügt das Scanner-Back-End, das in Bild 6-24 gezeigt und dessen Bedienung daraufhin beschrieben wird, über eine separate graphische Benutzeroberfläche mit einer intuitiven Benutzerführung. Nach dem Aufrufen der Prozess- und Technologiedatenbank muss der Bediener zuerst einen verfügbaren Abtragwerkstoff definieren. Daraufhin wählt er eine mögliche Abtragrate aus. Abhängig von seiner Entscheidung werden dann nur noch die zur Abtragrate verfügbaren Rauheiten vom System dem Bediener vorgeschlagen. Nach diesem Schema wird auch die Schichttiefe s gewählt. Danach wird dem Bediener das passende Laser-Tool ausgegeben. Es ist auch eine andere Reihenfolge der Parameterauswahl möglich. Zur Kontrolle werden dem Bediener die ausgewählten Parameter angezeigt. Im Profi-Modus kann der Bediener alle verfügbaren Parameter eigenständig eingeben oder verändern. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Datenübernahme in die Datenbank.

6.3.4 Softwaremodul für die Steuerungsschnittstelle und zur Überführung von Segment-ISO-NC-Daten in Lasermodulsteuerungskommandos: Scanner-Back-End

Software module for the control interface and for the transfer of segment ISO NC data into laser module control commands: Scanner-Back-End

Für die Umsetzung des 3D-Segment-Prozesses wird eine Schnittstelle in Form eines hochfunktionalen Softwaremoduls, im Folgenden als Scanner-Back-End bezeichnet, benötigt. Dessen Aufgaben sind in Bild 6-25 symbolisch dargestellt und werden nachfolgend aufgelistet:

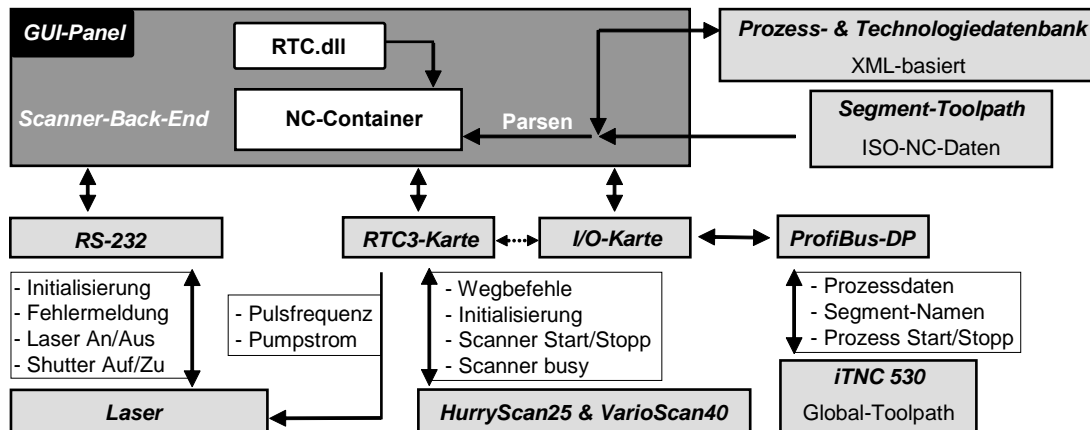


Bild 6-25: Aufgabenschema und Schnittstellen des Scanner-Back-Ends

Task plan and interfaces of the Scanner-Back-End

- Überführung der ISO-NC-Daten des Segment-Toolpaths in Wegbefehle und Steuerungsbefehle des Scanners und Steuerungskommandos für die Laserstrahlquelle
- Initialisierung des Lasermoduls: Betriebsbereitschaft des Scanners und des Lasers
- Steuerungskonsole für die einzelnen Systeme des Lasermoduls (Fehlerrückmeldung)
- Kommunikationspartner mit der iTNC 530 über Profibus-DP zur Sicherstellung eines automatisierten 3D-Segment-Prozesses
- Verwaltung der Prozess- und Technologiedatenbank

Basis des Scanner-Back-Ends ist die am Fraunhofer IPT entwickelte Analyse- und Optimierungssoftware für komplexe NC-Programme »NCProfiler«, die um spezielle Funktionalitäten in Form eines zusätzlichen Moduls erweitert wurde. Im Folgenden werden die wesentlichen Funktionalitäten des Scanner-Back-Ends vorgestellt.

Parsen der ISO-NC-Daten und der Prozess- und Technologieparameter

Unter Zuhilfenahme der RTC3.dll überführt das Scanner-Back-End die ISO-NC-Daten des Segment-Toolpaths und die für den Betrieb des Scannersystems notwendigen Parameter in Steuerungskommandos der RTC3-Karte (spezieller, firmenspezifischer Dialekt der Firma Scanlab AG). Dieser Prozessschritt wird als Parsen bezeichnet. Die Zuordnung bzw. Interpretation der ISO-NC-Befehle zu den speziellen RTC3-Befehlen ist in der Prozess- und Technologiedatenbank definiert. Die RTC3-Karte liefert das Laser-Trigger-Signal LTS und die Laser-Pump-Strom-Vorgabe LPS_v, so dass die wesentlichen Laserstrahlquellenparameter vorliegen.

Da die RTC3 nicht über alle für den 3D-Segment-Prozess notwendigen Befehle verfügt, müssen die vorliegenden Befehlseinschränkungen durch zusätzliche Funktionalitäten des Scanner-Back-Ends kompensiert werden (z. B. Schichtwiederholung). Der konvertierte Datensatz wird in den Listenspeicher der RTC3-Karte geschrieben. Da der Listenspeicher der RTC3-Karte auf 4000 Befehle beschränkt ist, führt das Scanner-Back-End einen kontinuierlichen Schreibvorgang in den RTC3-Speicher durch. Dadurch können auch Segmente mit über 1.000.000 Wegbefehlen, was eine typische Anzahl bei einem Segment mit einer Abmessung von 25 x 25 x 0,1 mm³ darstellt, verarbeitet werden.

Das entwickelte GUI-Panel wird in Bild 6-26 mit einer Erklärung der Funktionalitäten vorgestellt. Der manuelle Modus wird insbesondere für die in Kapitel 7 und 8 durchzuführenden Prozessuntersuchungen und Pilotbearbeitungen genutzt.

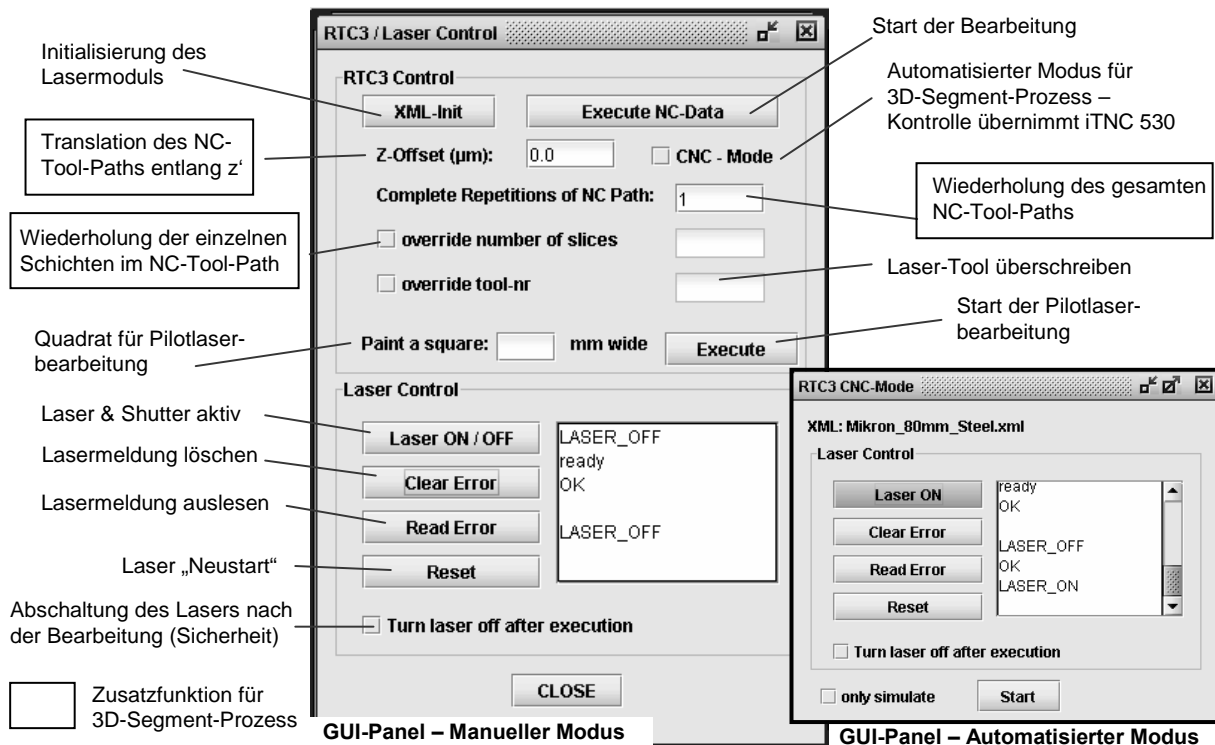


Bild 6-26: GUI-Panel für manuellen und automatisierten Modus des Scanner-Back-Ends

GUI panel for the manual and automatic mode of the Scanner-Back-End

Initialisierung des Lasermoduls: Betriebsbereitschaft des Scanners und des Lasers

Eine Scannerbearbeitung erfordert im Vorfeld stets eine Initialisierung des 3-Achs-Scanner-Systems. Dabei werden die geometrischen Parameter, wie z. B. die optikspezifischen Kompensationstabellen zur Reduzierung der optischen Verzeichnungen (correction file), die Lage und Größe des Arbeitsvolumens (field width, offsets, working area) sowie die Orientierung des Scannerkoordinatensystems (x' invert, y' invert, x'/y' flip), in die RTC3-Karte geladen. Die Kommunikation zwischen Scanner-Back-End und Lasernetzteil erfolgt durch eine RS232-Schnittstelle, mit der die Initialisierungsbefehle der Laserstrahlquelle aufgerufen werden. Dazu gehört die Ausgabe der Lasertriggerfrequenz zur Auslösung der Laserpulse [SCAN02]. Außerdem erfolgen über die RS232 die Befehle Laser An/Aus und Shutter Auf/Zu sowie die Ausgabe von Fehlermeldungen und des Laserbetriebsstatus. Alle zuvor beschriebenen Prozeduren werden vor jeder Bearbeitung selbstständig durch das Scanner-Back-End durchgeführt.

Kommunikation mit der iTNC 530 über ProfiBus-DP

Die Scanner-Back-End-Software steuert das Lasermodul während der Segmentbearbeitung. Die dazu notwendigen Initialbefehle erhält das Scanner-Back-End über die I/O-Karte-ProfiBus-DP-Schnittstelle aus dem Global-Toolpath. Im Falle der automatisierten Abarbeitung des 3D-Segment-Prozesses befindet sich das Scanner-Back-End im so genannten CNC-Modus, wobei das Scanner-Back-End selbstständig im Hintergrund und somit ohne manuelle Steuerungsbefehle arbeitet. Bild 6-27 zeigt die wesentlichen Systemmodule (GUI-Panels) der Softwareapplikation Scanner-Back-End während der Bearbeitung.

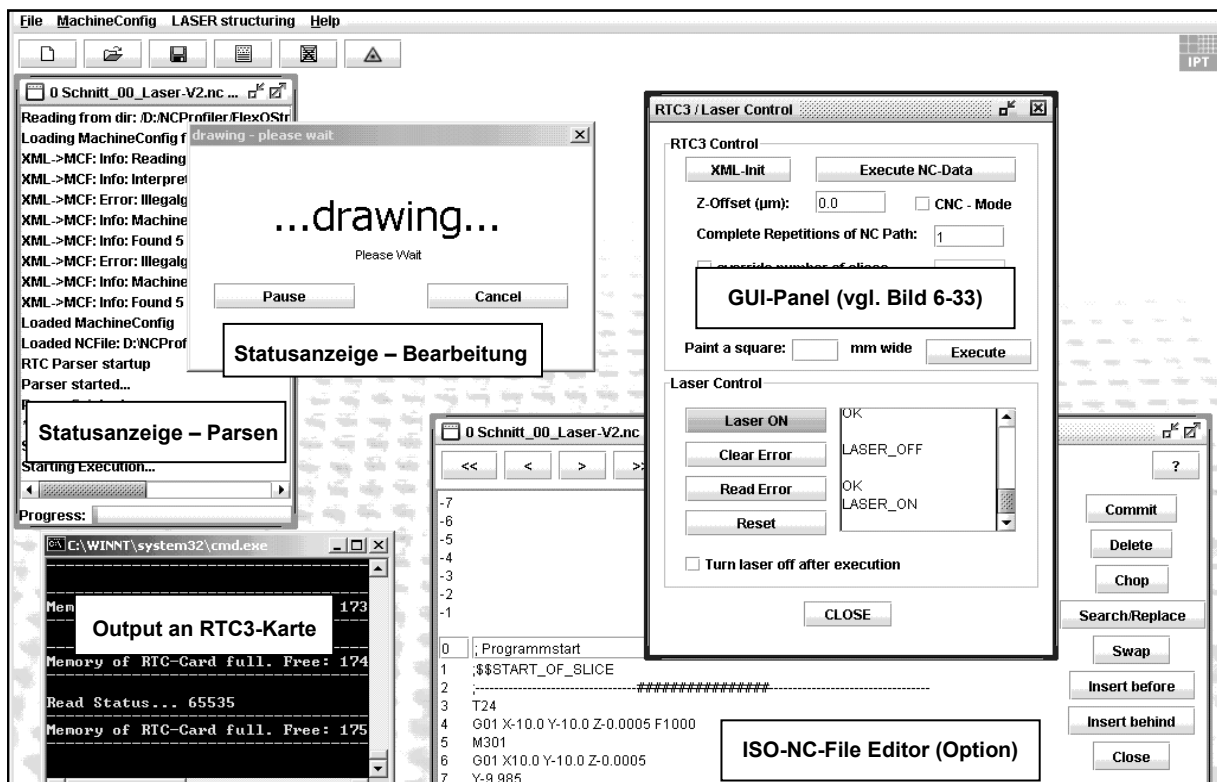


Bild 6-27: Softwareapplikation Scanner-Back-End
Software application Scanner-Back-End

Steuerungskonsole für die einzelnen Systeme des Lasermoduls

Neben der automatisierten Abarbeitung des Segment-Toolpaths (Synchronisation durch Global-Toolpath) ermöglicht das Scanner-Back-End auch einen manuellen Betriebsmodus, der durch ein GUI-Panel bedient werden kann. Dieser Modus ermöglicht die Ansteuerung des Lasers, die Abarbeitung vorgefertigter Segment-ISO-NC-Datensätze und die Manipulation der Laserbearbeitung durch zusätzliche Funktionalitäten.

Prozess- und Technologiedatenbank

Der Prozess- und Technologiedatenbank kommt eine besondere Bedeutung zu, weil sie alle notwendigen Daten zur Ausführung des 3D-Segment-Prozesses zentral verwaltet. Dadurch liegt keine Datenredundanz vor. Zugriff haben das Scanner-Back-End sowie die speziellen Module des CAM-Systems. Die Datenbank beinhaltet:

- die Bearbeitungsparameter in Form von vordefinierten Laser-Tools in Abhängigkeit vom Material und von der eingesetzten Laseroptik
- die Initialisierungsparameter des Lasermoduls: 3-Achs-Scanner und Laserstrahlquelle
- die Zuordnungen zum Parsen
- sämtliche technologische Kennwerte des Lasermoduls und der Handhabungsanlage
- alle notwendigen mathematischen Operationen zur Modifikation der Bewegungsdaten

Die Prozess- und Technologiedatenbank ist als native XML-Datenbank ausgeführt, so dass die Informationen direkt in einem zentralen und offenen Dokument abgelegt sind. Das Scanner-Back-End ist in der Programmiersprache Java geschrieben, so dass die Nutzung von XML-Datenbanksystemen aufgrund des nicht notwendigen Export-Import-Prozesses sinnvoll ist. Weiterhin weist das XML-Dokument einen baumartigen Aufbau auf, so dass Datenstrukturen mit wenig Aufwand und sehr übersichtlich realisiert werden können. Der XML-Standard ist zudem ein offener Standard des W3Cs (World Wide Web Consortium), so dass keine kostenpflichtigen Lizenzen vorliegen. Bei einer großen Datenbasis sind XML-Datenbanken nicht so leistungsfähig wie relationale Datenbanksysteme (z. B. SQL = Structured Query Language). Dieser Nachteil ist hier jedoch zu vernachlässigen, da die vorliegende XML-Datenbank eine Datenmenge kleiner als 200 kByte aufweist. Bild 6-28 zeigt einen Ausschnitt aus der XML-

Datenbank, in dem die globalen Steuerungsbefehle des Lasermoduls (Initialisierungsparameter) abgelegt sind. Bearbeitungsparameter sind in Form von unterschiedlichen Laser-Tools Tx organisiert, deren Definition in Kapitel 7 erfolgt.

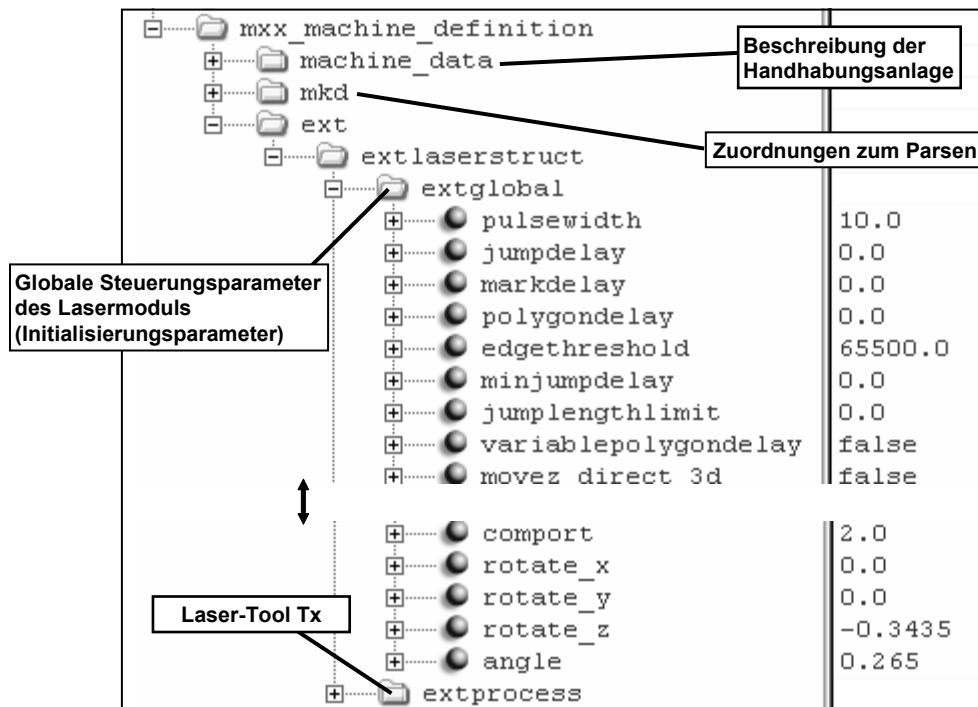


Bild 6-28: Globale Initialisierungsparameter in XML-Datenbank (Auszug)

Parameter of the global initialisation in XML data base (abridgement)

6.4 Fazit

Conclusion

Anhand zweier Referenzstrukturen wurden unterschiedliche optische Messverfahren für den Einsatz in der Prozesskette evaluiert und daraufhin greifbare Bewertungsgrößen für den Anwender definiert. Sowohl das konfokale Mikroskop Siscan MC64 als auch der chromatische Sensor FRT MicroProf eignen sich zur Datenakquisition von Designstrukturen, weil diese eine hohe Datenqualität, einen großen Messbereich und geeignete Datenschnittstellen aufweisen. Es wurden geeignete Arbeitsfolgen zur Datenaufbereitung und -weiterverarbeitung erarbeitet, so dass hochwertige STL-Netze der Designstrukturen erzeugt werden können. Limitierende Faktoren sind die hohen Datenmengen und der hohe manuelle Aufwand. Insbesondere bei pixel-basierten Messdaten kann mit Bildbearbeitungsprogrammen wie Photoshop die Messdatenqualität erheblich verbessert werden. Punktwolken als Ausgabeformat lassen sich direkt in CAx-Systemen weiterverarbeiten und in STL-Netze überführen.

Die großflächige Bearbeitung von Oberflächen erfordert aufgrund der begrenzten Abmessungen der Designstrukturen eine Multiplikation bzw. Kachelung. Aus der Gesamtheit aller möglichen Strukturformen wurden vier Strukturklassen definiert und es wurde ein einheitlicher Algorithmus zur Erzeugung der Kachelbarkeit weiterentwickelt – die Quadranten-Austausch-Methode. Für die darauf folgende digitale Übertragung der Designstrukturen auf die Oberfläche wurde die Leistungsfähigkeit des Displacement Mappings mittels u/v-Height-Map untersucht. Das Verfahren eignet sich aufgrund der nahezu verzerrungsfreien Übertragung für die hier verfolgte Anwendung. Die vorliegenden Technologienachteile – keine Darstellungsmöglichkeit von rechten Winkeln und Hinterschneidungen – sind aufgrund der Nutzung des Kunststoffspritzgießens nicht von Bedeutung.

Zur Realisierung des 3D-Segment-Prozesses wird die strukturierte Oberfläche in Segmente unterteilt, dazu wurde eine allgemeingültige Segmentierungsvorschrift erarbeitet. Das Splitter-Modul stellt ein Konzept zur automatisierten Oberflächensegmentierung dar, wobei die Segmentierungsdaten als Punktwolke exportiert werden.

Das hier umgesetzte Steuerungskonzept ermöglicht die automatisierte Abfolge des 3D-Segment-Prozesses. Mittels ProfiBus erfolgt eine Synchronisation und Koppelung der CNC/SPS (Heidenhain iTNC 530) mit den einzelnen Lasermodulsteuerungen. Die automatisierte Abfolge des 3D-Segment-Prozesses wird durch den Global-Toolpath gesteuert, wobei die iTNC 530 eine umfangreiche Befehlsenerweiterung erhalten hat.

Zur ISO-NC-Datengenerierung des Global- und des Segment-Toolpaths wurden Systematiken im CAM-System erarbeitet, wobei vor allem bestehende Frässtrategien verwendet werden. Das speziell entwickelte Scanner-Back-End überführt die Kommandos des Segment-Toolpath in für das Lasermodul verständliche Befehle. Das Scanner-Back-End steuert zudem die einzelnen Lasermodulsysteme und kommuniziert mit der CNC/SPS zur Sicherstellung des automatisierten 3D-Segment-Prozesses. Eine Prozess- und Technologiedatenbank (XML-Format) speichert zentral alle für den Prozess notwendigen Informationen und Parameter.

7 Laserstrahlstrukturiertechnologie

Laser beam structuring technology

Ziel: Erarbeitung von Bearbeitungsparametern zur abbildungstreuen, großflächigen und reproduzierbaren Herstellung von Mikrostrukturen. Die Parameter sollen als Laser-Tools für den 3D-Segment-Prozess zur Verfügung stehen.

Eine systematische Erarbeitung des verfolgten Teilziels erfordert zu Beginn eine Planung der Versuche. Daraufhin erfolgt eine theoretische Betrachtung des Abtragmechanismus, der durch die vorliegenden Betriebsparameter der Laserstrahlquelle zu erwarten ist. Durch praktische Versuche werden Laserparameter zur Herstellung eines homogenen, reproduzierbaren und schmelzminimierten Laserabtrags erarbeitet. Dies erfolgt durch komplexer werdende Abtragversuche, beginnend bei der Betrachtung des Einzelpulses über den zweidimensionalen Abtrag (Gräben) bis hin zu 3D-Strukturen. Dabei müssen prozesstechnologische Abhängigkeiten der Parameter untereinander erkannt und optimiert werden. Zum Abschluss werden die erarbeiteten Prozessparameter in der bereits definierten Prozess- und Technologiedatenbank als Laser-Tools abgebildet. In Hinblick auf den 3D-Segment-Prozess müssen die Prozessparameter auf die zuvor erarbeiteten Bearbeitungsstrategien übertragen werden, wobei dies sowohl für ebene als auch für Regeloberflächen durchgeführt wird. Dabei müssen Multiplikationsstrategien zur nahtlosen Kachelung erarbeitet werden, die dann anhand von Testbearbeitungen mit unterschiedlichen Strukturklassen auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht werden.

7.1 Versuchsdurchführung

Execution of the experiments

7.1.1 Versuchsplanung und wesentliche Einflussgrößen beim Laserstrahlstrukturieren

Planning of the experiments

In Bild 7-1 ist der in dieser Arbeit genutzte Versuchsplan schematisch dargestellt.

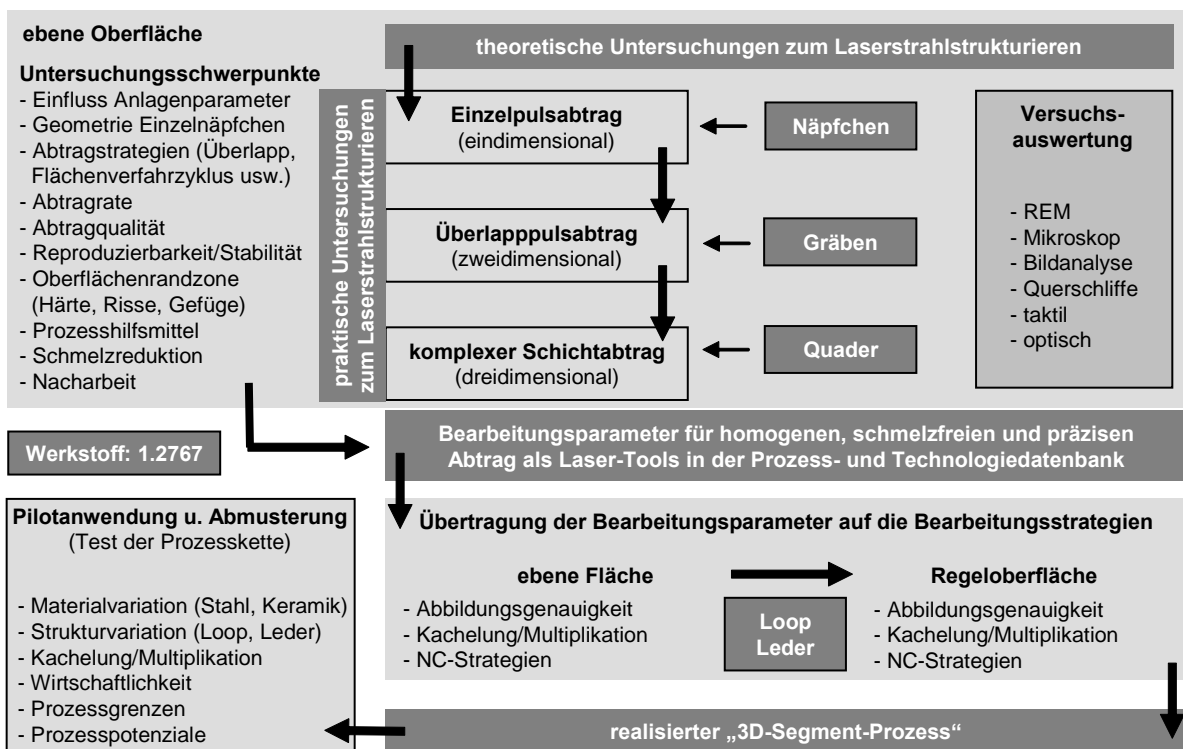


Bild 7-1: Schematische Darstellung des Versuchsplans

Diagram of experiment plan

7.1.2 Auswahl von Testwerkstoffen, -oberflächen und -strukturen

Selection of test materials, surfaces and structures

Testwerkstoff

Im Spritzgießwerkzeugbau werden überwiegend hochbelastbare Stahlwerkstoffe eingesetzt. Daher wird hier ein typischer Formwerkzeugstahl der Güte 1.2767 (45NiCrMo16) verwendet. Es handelt sich dabei um einen nickellegierten, sehr zähen Kaltarbeitsstahl mit guter Durchhärbarkeit. Weiterhin zeichnet er sich durch gute Polier-, Narbätz- und Erodierbarkeit aus. Tabelle 7-1 im Anhang A3 enthält die in der Literatur und von den Herstellern veröffentlichten Werkstoffkonstanten, die jedoch hauptsächlich für konventionelle Wärmebehandlungsverfahren wie das Härten ermittelt wurden. Die Gültigkeit der Parameter für hohe Prozesstemperaturen und kurze Bestrahlungsdauern, wie sie beim Sublimationsabtrag vorliegen, ist nicht nachgewiesen, so dass diese nur zur Prozessabschätzung dienen können.

Testoberflächen

Die unstrukturierte Makrogeometrie von Spritzgießwerkzeugen wird überwiegend durch HSC-Schlichtfräsen oder durch Schleifen hergestellt, so dass nachfolgende Oberflächenzustände verwendet werden:

- ebene Oberfläche: geschliffen mit $R_a \approx 0,45 \mu\text{m}$
- gewölbte Regeloberfläche: schlichtgefästä mit $R_a \approx 0,45 \mu\text{m}$

Teststrukturen

Für die Erarbeitung der grundlegenden Bearbeitungsparameter werden als Teststrukturen Einzelnapfchen, Gräben und Quader verwendet, weil deren Geometrien sicher messtechnisch erfasst werden können. Einzelnapfchen und Gräben stellen zudem die Basis des komplexen 3D-Abtrags dar. Insbesondere mit Quaderstrukturen können die für die Prozess- und Technologiedatenbank wichtigen Kenngrößen wie Abtragsrate V_{Abtrag} , Rauheit R_a und Schichttiefe s für die einzelnen Laserparameter ermittelt werden. Die Übertragung der Parameter auf geeignete Bearbeitungsstrategien erfolgt dagegen mit komplexen Strukturen aus den Klassen II und III. Die Spezifikationen der Strukturen erfolgt in den entsprechenden Kapiteln.

7.1.3 Mess- und Auswertungssysteme

Measurement and analysis systems

Um die Einflüsse der Prozessparameter und Bearbeitungsstrategien auf das Abtragergebnis bewerten und daraus Rückschlüsse ziehen zu können, müssen eindeutige Kenngrößen des Laserabtrags definiert werden. Bild 7-2 zeigt die Kenngrößen beim eindimensionalen Abtrag (Einzelpuls) und beim komplexen 3D-Abtrag (zusammengesetzte Einzelpulse).

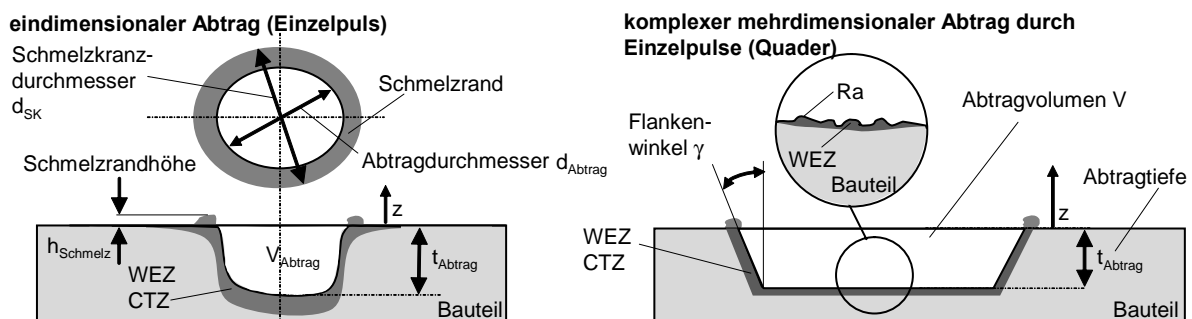


Bild 7-2: Abtragskenngrößen analog zu VDI-Richtlinie 2906 und 32540 [BERG00, S. 49]

Characteristics of the ablation according to VDI guideline 2906 and 32540

Mit den geometrischen Kenngrößen des fokussierten Laserstrahls (vgl. Bild 5-19) und den kinematischen Bewegungsparametern (vgl. Bild 6-21) liegt eine vollständige Beschreibung des Laserabtrags vor. Gemäß DIN V 32540 werden zur Charakterisierung eines komplexen Abtrags Quantitäts- und Qualitäts-Kenngrößen herangezogen [VDIV97].

Charakterisierung	KenngroÙe	Beschreibung bzw. Definition
Quantität	Abtragvolumenrate	$V_{\text{Abtrag}} = V / t$ [mm ³ /min]
Quantität	Schichttiefe	s, die pro Laserüberlauf erzeugte gemittelte Abtragtiefe t_{Abtrag}
Qualität	Rauheit	Mittenuwert Ra und Rautiefe Rz (DIN 4762)
Qualität	Prozessrückstände	Schmelzrandhöhe h_{Schmelz} (in der DIN V 32540 vorgeschlagener Rückstandsanteil R_K wird hier nicht verwendet, weil aufgrund der ausgewählten Strukturen keine eindeutige Bezugsfläche definiert werden kann)
Qualität	Werkstoffbeeinflussung	Aufhärtung, Risse, metallurgische Veränderung in der WEZ und CTZ
Qualität	Konturabweichungen	makroskopische Gestalt des Abtrags, wobei nur die geometrische Soll-/Ist-Abweichung der 1. Ordnung bestimmt wird (DIN 4760)

Tabelle 7-2: AbtragkenngroÙen gemäß DIN V 32540

Characteristics of the ablation according to DIN V 32540

Für die KenngroÙenbestimmung werden taktile und optische Messverfahren eingesetzt (Tabelle 7-3). Durch standardisierte MessgroÙen besteht eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Messmittel	Typ	Messaufgabe
Mikroskop mit digitaler Bildbearbeitung	Zeiss Axiophot mit SoftImaging System (Analysis Auto)	schnelle visuelle Begutachtung des Oberflächenabtrags hinsichtlich Form und Schmelzablagerungen, Formprüfung und Gefügeanalyse
Rasterelektronenmikroskop (REM)	Zeiss DSM 962	EDX-Analyse (partielle Materialanalyse), optische Begutachtung des Oberflächenabtrags mit bis zu 10.000-facher Vergrößerung
geätzte Querschliffe (REM oder Mikroskop)	---	metallurgische Begutachtung der Randzone (z. B. Aufhärtung; Risse) und der Schmelzablagerungen
taktile Messtaster	Form Talysurf Serie 2	Rauheits- und Formprüfung
optischer Sensor	Veeco NT 1100; FRT Micro-Prof und Siscan MC64	Querschnittsprofile zur Analyse von Form und Abmessungen des Abtrags, Schmelzablagerungen, Rauheits- und Formprüfung

Tabelle 7-3: Messmittel zur Bestimmung der AbtragkenngroÙen

Measurement systems for the determination of the ablation characteristics

7.2 Theoretische Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren

Theoretical investigations of the laser beam structuring process

Die Herstellung von filigranen Oberflächenstrukturen in Stählen mit einer hohen Bearbeitungsqualität und Geometrieflexibilität erfordert einen Sublimationsabtrag mit möglichst kurzen Pulslängen. In Kapitel 5 wurden die Betriebsparameter der Laserstrahlquelle erarbeitet, die eine geometrische und Leistungs-Zeit-bezogene Beschreibung des Laserstrahls zulassen. Im Rahmen einer theoretischen Betrachtung der physikalischen Abtragmechanismen werden nun die für den Laserabtrag wesentlichen ProzessstellgroÙen identifiziert, aus denen in den praktischen Untersuchungen ein optimiertes Prozessparameterfenster bestimmt wird. Die physikalischen Wechselwirkungen zwischen Laserstrahl und Werkstoff bestimmen die Qualität und Quantität des Abtrags. Infolge der auftretenden Nichtlinearitäten und Werkstoffparameterunsicherheiten müssen insbesondere bei Metallen wesentliche Vereinfachungen bei der Modellbeschreibung des Sublimationsabtrags vorgenommen werden, um die Komplexität des Prozesses zu verringern [TÖNS93], [SCHM95], [CALL99], [PESC81], [TREU85], [CHRY91]. Ein weiteres Problem innerhalb der Modellbeschreibung stellt die Plasmabildung bei hohen Strahlintensitäten in Verbindung mit kurzen Pulslängen dar. Zur Beschreibung fehlen geeignete Lösungsansätze in der Plasmaphysik. Die verfügbaren Modelle erlauben daher bislang keine sicheren Rückschlüsse auf die Abtragqualität und -quantität [POPR05a, S. 111], [CSER05, S. 27]. Der Einzelpuls stellt die Basis jedes komplexen 3D-Abtrags dar und wird deshalb im Folgenden näher betrachtet.

Absorptionsphase

In der oberflächennahen Randzone wird die durch den Laserstrahl bereitgestellte Laserstrahlintensität $I_{M, \text{Laser}}$ durch Absorption in Wärme umgewandelt. Metalle besitzen im Allgemeinen eine hohe Reflexion und eine entsprechend geringe Absorption von Laserstrahlung. Die Absorption hängt im Wesentlichen von optischen Werkstoffkonstanten (z. B. Absorptionsindex κ),

vom geometrischen Zustand (z. B. Rauheit R_a , Einstrahlwinkel γ) und von der Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Oxidschicht) sowie von Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Druck) ab. Sie folgt dabei der Beziehung aus der Energiebilanz [POPR05a, S. 13-14, S. 29]:

$$A = 1 - R - T \quad \text{mit } A = \text{Absorption, } R = \text{Reflexion und } T = \text{Transmission} \quad (\text{Formel 7-1})$$

Die optische Eindringtiefe δ_{opt} gibt an, bis in welche Materialtiefe der wesentliche Teil der Strahlungsenergie absorbiert wird [POPR05a, S. 24]:

$$\delta_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot \kappa} = 1,41 \text{ nm} \quad (\text{Formel 7-2})$$

Obwohl der Absorptionsindex κ temperaturabhängig ist und bei höheren Temperaturen δ_{opt} geringfügig zunimmt, ist hier die Bauteildicke s stets um ein Vielfaches größer als δ_{opt} . Daher kann die Transmission T bei der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden. Die geringe optische Eindringtiefe δ_{opt} hat weiterhin zur Folge, dass die Energieumwandlung direkt an der Oberfläche abläuft. Für nachfolgende Überlegungen kann die Wärmequelle somit als flache Oberflächenquelle angenommen werden.

Bei höheren Temperaturen nimmt die Absorption von Stahl zu. Da bei den hier vorliegenden geringen Dauerstrichleistungen und großen Bauteilvolumina keine Bauteilaufwärmung in der Startphase des Prozesses zu beobachten ist, wird hier der Temperatureinfluss vernachlässigt. Die Oberflächenrauheit (R_a) und der Winkel $\Delta\tilde{n}$ haben dagegen erheblichen Einfluss auf die Absorption [POPR05a, S. 33-35]. Da die Absorption für 1.2767 bei unterschiedlichen Oberflächenrauheiten R_a und Winkeln $\Delta\tilde{n}$ nicht bekannt ist, muss diese bestimmt werden. Dabei wird die Reflexion bei vernachlässigter Transmission bestimmt, so dass $A = 1 - (R_G + R_D)$ gilt. Absolute Absorptionswerte bzw. die gerichtete (R_G) und diffuse (R_D) Reflexion können aufgrund der vorhandenen Funktionalität der Messtechnik nur für einen Winkel von $\Delta\tilde{n} = 0^\circ$ ermittelt werden (Tabelle 7-4).

Oberflächenzustand R_a	Winkel $\Delta\tilde{n}$	Absorption A
poliert ($R_a = 0,01 \mu\text{m}$)	0°	0,38
geschliffen/gefräst ($R_a = 0,45 \mu\text{m}$)	0°	0,5

Absorptionsmessung durch 2-Strahl-Spektralphotometer (Messfläche 1 cm^2); $T_0 = 20^\circ\text{C}$; $\lambda = 1064 \text{ nm}$; $I \ll I_{\text{Schwell,S}}$

Tabelle 7-4: Absorptionsgrade für verschiedene Oberflächenrauheiten R_a (Material: 1.2767)
Absorption values of different surface roughness R_a (material: 1.2767)

Zur Messung der Reflexion bei variierendem Winkel $\Delta\tilde{n}$ wird ein spezieller Versuchsaufbau, bestehend aus einer angestellten Werkstückprobe und einem Leistungsmessgerät vom Typ Fieldmaster LM 45 (Bild 7-3, links), eingesetzt. Die von der Probe reflektierte Laserleistung wird in Bezug zu einem Normal (hier: $\Delta\tilde{n} = 0^\circ$) gesetzt. Es muss die Bedingung Einfall- gleich Ausfallwinkel eingehalten werden, um die gerichtete Reflexion R_G mit dem Messsensor einfangen zu können. Der diffuse Reflexionsanteil R_D kann dagegen nicht bestimmt werden, wobei dieser bei polierten und fein geschliffenen Oberflächen vernachlässigt werden kann. Eine technische Oberfläche – z. B. 100Cr 6 gefräst – weist dagegen bei einer Wellenlänge $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ und einem Winkel $\Delta\tilde{n} = 0^\circ$ einen diffusen Reflexionsanteil R_D von etwa 25 % auf [POPR02]. Gesicherte Ergebnisse und somit Rückschlüsse auf die Absorption können daher nur bei der geschliffenen Testoberfläche erarbeitet werden. Bild 7-3 (rechts) zeigt den relativen Reflexionsverlauf R_G in Abhängigkeit vom Winkel $\Delta\tilde{n}$. Anhand des Kurvenverlaufs ist erkennbar, dass hier die typische p-Polarisation des Laserlichts bei der Bestrahlung von Metallen gemessen wurde. Daher kann gemäß Fresnel-Theorie davon ausgegangen werden, dass bis zu einem Winkel von $\Delta\tilde{n} = 40^\circ$ die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen des Laserlichts (s und p) keine Prozessbeeinflussung hervorrufen [POPR02]. Bild 7-3 kann weiterhin entnommen werden, dass bei einem Winkel $\Delta\tilde{n} = 20^\circ$ die gerichtete Reflexion R_G um ca. 5 % abnimmt bzw. somit die Absorption um 5 % zunimmt.

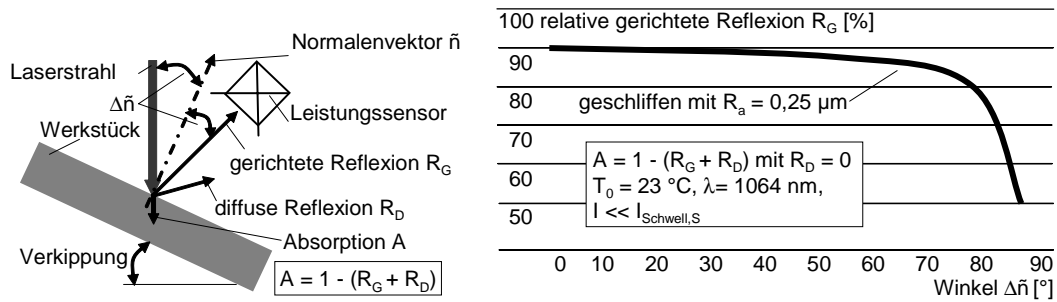


Bild 7-3: Relative, gerichtete Reflexion R_G in Abhängigkeit vom Winkel $\Delta\tilde{n}$ (p-Polarisation)
Relative, directional reflection depending on the angle $\Delta\tilde{n}$ (p polarization)

Aufgrund der vorliegenden Oberflächenquelle (Formel 7.2) kann die tatsächlich absorbierte und somit zur Wärmeerzeugung nutzbare Intensität I_{Abs} direkt an der Oberfläche ($z = 0$) bestimmt werden (Vernachlässigung von Strahlungs- und Konvektionsverlusten) [LÄSS94, S. 26-27], [POPR02].

$$I_{\text{Abs}} = A \cdot I_{\text{M,Laser}} \quad [\text{W/cm}^2] \text{ bei } z = 0 \quad (\text{Formel 7-3})$$

Für die Betriebsparameter des Lasers (Tabelle 5-6) liegen somit die absorbierten Intensitäten I_{Abs} in einem Bereich zwischen $4 \cdot 10^8$ und $1,4 \cdot 10^{11}$ W/cm². Bei einer Winkelabweichung von $\Delta\tilde{n} = 10^\circ$ ist eine Verminderung von I_{Abs} um ca. 40 % bei der geschliffenen Oberfläche abzuschätzen.

Aufheizphase

Die thermische Energie wird durch Wärmeleitung in das Bauteilinnere transportiert, so dass sich ein Temperaturfeld bildet [POPRa05, S. 41]. Darin erfolgt entsprechend der vorliegenden Temperatur eine Veränderung des Gefüges. Die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone (WEZ), welche am Rand der Wärmeedringtiefe definiert ist [ANGS03], lässt sich durch die thermische Eindringtiefe δ_w abschätzen. Sie nimmt durch die Wechselwirkungszeit t_{ww} und die temperaturabhängige Temperaturleitfähigkeit χ zu. Durch die Pulslänge τ_p und die Vorschubgeschwindigkeit der Scannerachsen v_f wird t_{ww} bestimmt [YEH01, S. 11-12]. Ein hochwertiger Abtrag lässt sich durch eine geringe Ausbildung der WEZ (Gefügeveränderung) charakterisieren.

$$\delta_w = \sqrt{4 \cdot \chi \cdot t_{\text{ww}}} \quad \text{mit } t_{\text{ww}} = \frac{d_o}{v_f} \text{ für ruhenden Einzelpuls ist } t_{\text{ww}} = \tau_p \quad (\text{Formel 7-4})$$

$$\delta_{w,\text{min}} = 0,4 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{für } \tau_p \text{ 5,1 ns bei } I_A = 45 \text{ A und } f_p = 5 \text{ kHz}$$

$$\delta_{w,\text{max}} = 0,8 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{für } \tau_p \text{ 18,6 ns bei } I_A = 25 \text{ A und } f_p = 40 \text{ kHz}$$

Es ist eine Ausdehnung der WEZ von maximal 0,8 μm bei einem Einzelpuls zu erwarten. Bei komplexen Strukturen wird der gepulste Laserstrahl dagegen durch den Scanner bewegt, so dass sich im Vergleich zur Einzelpulsbearbeitung t_{ww} und somit δ_w erhöht.

Aufschmelzen und Schmelzaustrieb

Bei einer ausreichenden Intensität $I_{\text{Schwell,S}}$ wird eine schmelzflüssige Phase erzeugt, weil mehr Energie zugeführt als durch Wärmeleitung in tiefere Schichten abgeführt werden kann. Die Schmelze wird entweder durch den Dampfdruck des Plasmas herausgeschleudert oder erstarrt durch Selbstabschreckung und bildet einen Teil der WEZ aus [POPR02]. Die maximale theoretische Dicke des Schmelzfilms s_{Schmelz} kann bei vollständiger Sublimation am Rand der optischen Eindringtiefe δ_{opt} durch Formel 7-5 abgeschätzt werden [TREU92].

$$s_{\text{Schmelz}} = \frac{w \cdot (T_V - T_S)}{I_{\text{Abs,min}}} \approx 10 \text{ nm} \quad \begin{array}{l} \text{mit } T_V = \text{Verdampfungstemperatur} \\ T_S = \text{Schmelztemperatur} \\ (\text{ebene, geschliffene Oberfläche}) \end{array} \quad (\text{Formel 7-5})$$

Die Schwellintensitäten sowohl für Schmelzen als auch für Verdampfen sind von der Pulslänge abhängig [CHRY91]. In der Literatur sind keine entsprechenden Intensitätswerte für den Werkstoff 1.2767 verfügbar. Für eine gaußförmige Intensitätsverteilung können die pulsabhängigen, absorbierten Schwellintensitäten bestimmt werden, wobei eindimensionale Wärmeleitung, konstante Schmelzfrontgeschwindigkeit v_B und Verdampfungstemperatur T_V am Rand der Schmelze angenommen werden [YEH01, S. 8], [POPR02].

$$I_{\text{Schwell,S/V}} = \frac{2 \cdot \lambda_W \sqrt{2 \cdot \pi}}{A \cdot d_0 \arctan \sqrt{\frac{32 \cdot \chi \cdot \tau_P}{d_0^2}}} \cdot T_{\text{S/V}} + \rho \cdot H_{\text{S/V}} \cdot v_B \quad \text{mit } H_V \gg H_S, \quad (\text{Formel 7-6})$$

$$\text{mit } v_B = \frac{1}{s_{\text{Schmelz}}} \cdot \chi \cdot \ln \frac{T_V - T_0}{T_S - T_0}$$

Nach Formel 7-6 liegen die berechneten Schmelzschwellintensitäten $I_{\text{Schwell,S}}$ für 1.2767, für die hier vorliegenden Betriebsparameter und für s_{Schmelz} zwischen $5,8 \cdot 10^6$ und $9,5 \cdot 10^6$ W/cm².

Verdampfen

Bei $I_{\text{Schwell,V}}$ wird die Verdampfungstemperatur T_V erreicht. Der sich bildende Dampf wird teilweise zu einem Metaldampfplasma ionisiert. Im Plasma wird die Absorption des Laserstrahls als ideal angenommen ($A = 1$). Solange das Plasma Kontakt mit der Oberfläche hat, wird die vollständig in Wärme umgewandelte Laserenergie nahezu verlustfrei direkt in die Oberfläche transportiert. Wird die Intensität jedoch weiter gesteigert, dann hebt sich bei $I_{\text{Schwell,V-A}}$ das Plasma von der Oberfläche und schirmt den Laserstrahl von der Oberfläche ab. Hierbei sind verminderte Abtragraten und erhöhte Oberflächenrauheiten zu erwarten. Eine Plasmaabhebung kann durch spezielle Atmosphären, Wellenlängenverkürzung, Pulsleistungsminimierung und kurze Pulsängen unterbunden werden [POPR05a, S. 109], [CSER05, S. 59].

Mit Formel 7-6 und s_{Schmelz} lässt sich $I_{\text{Schwell,V}}$ für den vorliegenden Werkstoff im Betriebsbereich des Lasermoduls bestimmen, sie beträgt zwischen $4,27 \cdot 10^9$ und $5,0 \cdot 10^9$ W/cm². Bei einigen Betriebsparametern liegt die zur Verfügung stehende mittlere Strahlintensität $I_{\text{M,Laser}}$ unter $I_{\text{Schwell,V}}$, so dass ein Misch-Abtrag aus Schmelzen und Sublimation zu erwarten ist. Die relevanten Betriebsparameter sind in Tabelle 5-6 gekennzeichnet. Die Intensität $I_{\text{Schwell,V-A}}$ kann dagegen nicht berechnet werden: Sie kann nur empirisch durch Versuche bestimmt werden.

Zur Herstellung komplexer Strukturen wird der Abtragdurchmesser d_{Abtrag} benötigt, da z. B. der Pulsabstand S einen wichtigen Prozessparameter darstellt. Zur Bestimmung von d_{Abtrag} fehlen jedoch geeignete Berechnungsgrundlagen, so dass dieser durch eine berechenbare Vergleichsgröße abgeschätzt werden muss. Dazu kann der oberflächige Durchmesser der Wärmeeinflusszone d_{WEZ} genutzt werden, welcher nach Formel 7-7 bestimmt werden kann [TREU85]. Da die thermische Eindringtiefe δ_w im Vergleich zum Strahldurchmesser d_0 gering ist, kann die seitlich hinausdiffundierende Wärme vernachlässigt werden. Die Wärmeausbreitung erfolgt somit hauptsächlich in die Tiefe des Werkstücks. Daher stellt die eindimensionale stationäre Lösung der Wärmeleitungsgleichung für ein halbumendlich ausgedehntes Material eine gute Näherung dar [ALLM95], [LÄSS94, S.29], [POPR05a, S. 42-57]. Unter Anwendung der Formel 7-7 folgt für die Betriebsparameter $35 \mu\text{m} < d_{\text{WEZ}} < 43 \mu\text{m}$, so dass ein erster Anhaltswert für die Dimension von d_{Abtrag} vorliegt.

$$d_{\text{WEZ}} = \frac{d_0}{\sqrt{2}} \sqrt{-\ln \frac{T_S \cdot \rho \cdot c \cdot \sqrt{\pi \cdot \kappa}}{4 \cdot I_{\text{Abs}} \cdot \sqrt{\tau_P}}} \quad \text{mit } d_{\text{Abtrag}} < d_{\text{WEZ}} \quad (\text{Formel 7-7})$$

Da der reale d_{WEZ} nur sehr aufwändig durch Querschliffe beim Abtragprozess bestimmbar ist, wird für die nachfolgenden Untersuchungen der Durchmesser des Schmelzrands d_{SK} als versuchs-technische Abschätzung von d_{WEZ} herangezogen ($d_{\text{SK}} = d_{\text{WEZ}}$). Der Schmelzranddurchmesser d_{SK} kann dagegen sehr einfach mit einem Messmikroskop bestimmt werden.

Bei idealer bzw. reiner Sublimation kann die optische Eindringtiefe δ_{opt} als Abtragtiefe t_{Abtrag} angenommen werden (hier $\delta_{\text{opt}} = t_{\text{Abtrag}} = 1,41 \text{ nm}$) [LÄSS94, S.27], [POPR02]. Dieser Ansatz wird hier nicht verfolgt, da in Vorversuchen deutlich höhere Abtragtiefen (Faktor 1000) gemessen wurden. Daher können hier keine sinnvollen theoretischen Abschätzungen für die Abtragtiefe t_{Abtrag} vorgenommen werden.

Aus den vorherigen Überlegungen kann ein Zusammenhang zwischen der Abtragqualität/-quantität und der Laserstrahlintensität aufgestellt werden (Bild 7-4). Ziel der praktischen Untersuchungen in Kapitel 7 ist es, den Laserstrahlabtragprozess in einem Parameteroptimum auszulegen, in dem die höchstmögliche Abtragqualität bei größtmöglicher Abtragrate vorliegt.

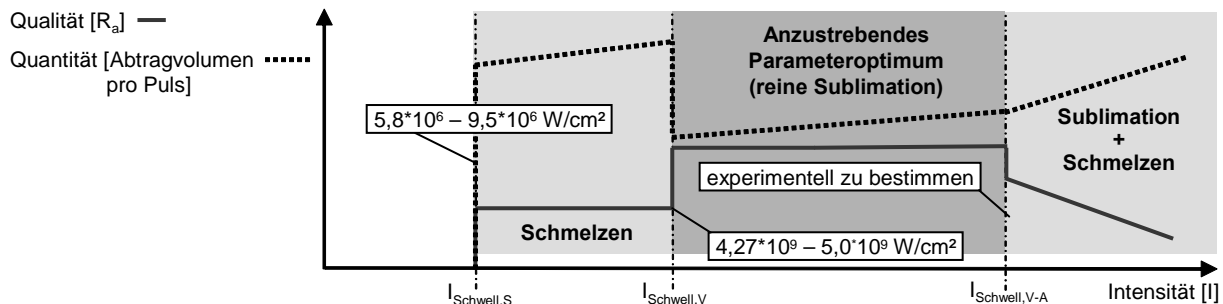


Bild 7-4: Definition des optimalen Prozessparameterbereichs

Definition of the optimal process parameter range

Für die Betriebsparameter des Lasermoduls kann zusammengefasst werden:

- die Absorption A wird im Wesentlichen von der Rauheit R_a und dem Winkel Δn beeinflusst
- bei reiner Sublimation gilt pro Puls (theoretisch): max. Tiefe der WEZ = $\delta_w = 0,8 \text{ }\mu\text{m}$; $35 \text{ }\mu\text{m} < d_{\text{WEZ}} \approx d_{\text{Abtrag}} < 43 \text{ }\mu\text{m}$; Abtragtiefe t_{Abtrag} nicht gesichert berechenbar
- keine gesicherte theoretische Abschätzung der Abtragtiefe t_{Abtrag}
- absorbierte Intensitäten I_{Abs} betragen zwischen $4 \cdot 10^8$ und $1,4 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$
- WEZ wird durch Pulslänge τ_P und Vorschubgeschwindigkeiten v_f bestimmt
- bei den Abtragversuchen gilt: wird $d_{\text{SK}} = d_{\text{WEZ}}$
- inerte Atmosphäre kann Plasmaabhebung unterbinden
- Schmelzschwellintensität $I_{\text{Schwell,S}}$ für 1.2767 zwischen $5,8 \cdot 10^6$ und $9,5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$
- Verdampfungsschwellintensität $I_{\text{Schwell,V}}$ für 1.2767 zwischen $4,27 \cdot 10^9$ und $5,0 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$
- Intensität $I_{\text{Schwell,V-A}}$ nicht berechenbar, d. h. empirische Bestimmung notwendig
- einige Betriebsparameter weisen eine unzureichende Intensität für eine reine Sublimation auf, so dass ein Misch-Abtrag (Schmelzen und Sublimation) zu erwarten ist

7.3 Praktische Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren

Practical investigation of the laser beam structuring process

In Rahmen von praktischen Untersuchungen werden unter Berücksichtigung der bisher erarbeiteten Erkenntnisse geeignete Bearbeitungsparameter bestimmt. Dabei wird die Komplexität der Abtragstrukturen sukzessive gesteigert, so dass schlussendlich Parameter für einen dreidimensionalen Schichtabtrag unter Verwendung der Anlagentechnik vorliegen. Eine Übersicht über die wichtigsten Untersuchungsgrößen sind dem Versuchsplan zu entnehmen.

7.3.1 Einzelpulsabtrag (eindimensional): Näpfchen

Single pulse ablation (one-dimensional): dimples

Bild 7-5 (Anhang A4) zeigt exemplarisch die detaillierte Auswertung eines Einzelpulses mit Wyko NT 1100, wobei eine Schnittdarstellung des Abtragnäpfchens erzeugt wurde.

Betriebsbereitschaft der Laserstrahlquelle: Pulsstabilität

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse muss der Laser stets in einem konstanten und reproduzierbaren Betriebsmodus arbeiten. Die Betriebsbereitschaft des Lasers nach dem Einschalten

wurde bereits in Kapitel 5 mit $t_{\text{Ein}} = 25$ min bestimmt. Die Einschwingdauer t_s , welche jeweils nach einer Änderung eines Laserstrahlparameters im laufenden Betrieb zu berücksichtigen ist, wird mittels des bereits in Kapitel 5 genutzten Strahlkaustikmessgeräts bestimmt. Durch eine Synchronisation der Pulsfrequenz f_p mit der Triggerfrequenz des Messgeräts können Pulsfolgen gezielt aufgenommen und hinsichtlich der Pulsspitzenleistung ausgewertet werden. Nach einer Pulsfrequenzänderung liegen konstante Pulsspitzenleistungen erst nach dem fünften Laserpuls vor. Für $f_p = 5$ kHz beträgt somit die Einschwingdauer $t_s = 0,001$ s. Die Einschwingdauer ist bei der Scannerbearbeitung zu berücksichtigen.

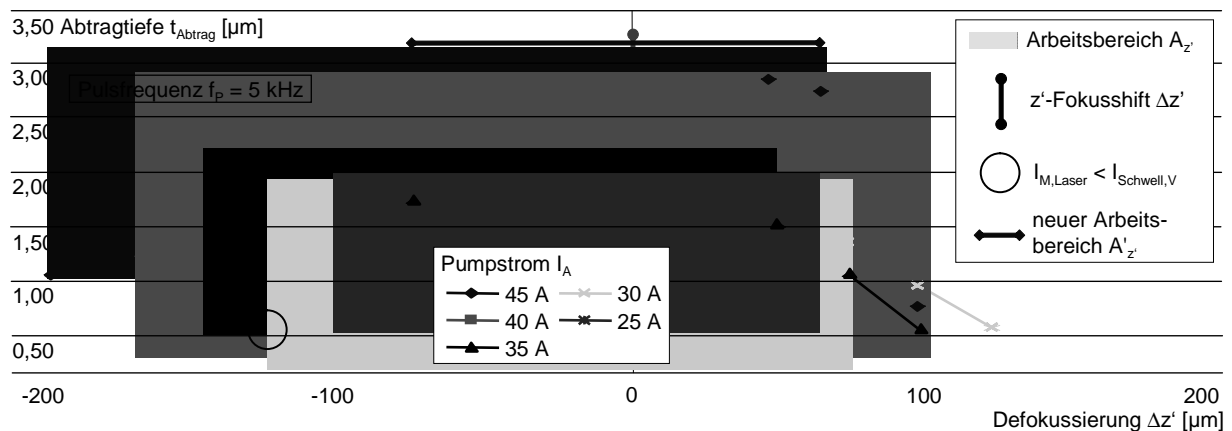
Da der Laser keine aktive Pulsunterdrückung aufweist, kann bei ruhenden Scannerspiegeln kein einzelnes, repräsentatives Abtragnäpfchen erzeugt werden. Zur Herstellung einzelner Abtragnäpfchen muss daher eine spezielle Versuchsdurchführung angewendet werden. Mit Hilfe der Scannerspiegel werden bei unveränderten Laserparametern mehrere parallele Geraden abgefahren. Bei geeigneter Wahl der Vorschubgeschwindigkeit v_f liegen auf den Geraden mehrere, mit konstanten Parametern erzeugte Einzelpulse. Um einen nahezu ortsfesten Abtrag erzielen zu können, muss v_f möglichst gering gewählt werden. Der während eines Pulses mit der Pulslänge τ_p zurückgelegte Vorschubweg x muss im Bezug zu d_{Abtrag} minimal sein. Der Puls-zu-Puls-Abstand muss größer als d_{SK} sein, um eine gegenseitige Pulsbeeinflussung ausschließen zu können. Daher wird hier der Pulsabstand mit $S = 200$ % festgesetzt. Mit Formel 6-2 und $d_{\text{Abtrag}} = d_{\text{WEZ}} (= d_{\text{SK}})$ ergibt sich:

- $v_f = 430$ mm/s bei $f_p = 5$ kHz
- $v_f = 860$ mm/s bei $f_p = 10$ kHz
- $v_f = 1720$ mm/s bei $f_p = 20$ kHz
- $v_f = 3440$ mm/s bei $f_p = 40$ kHz

Beim Betriebsparameter $f_p = 40$ kHz und $I_A = 25$ A liegt der größte Vorschubweg mit $x = 0,064$ μm vor. Bei allen Parametern gilt stets $d_{\text{WEZ}} = d_{\text{SK}} = 43$ $\mu\text{m} \approx d_{\text{Abtrag}} \gg v_f \tau_p = x$. Somit kann der Vorschubweg x in Hinblick auf den Abtragprozess vernachlässigt werden.

Auswirkungen der Laserparameter auf den Pulsabtrag

In Kapitel 5 konnte durch Strahlkaustikmessungen eine Veränderung des Fokusedurchmessers d_f , des Arbeitsbereiches A_z' und der Fokusslage $\Delta z'$ bei variiertem Pumpstrom I_A und Pulsfrequenz f_p festgestellt werden. Inwieweit diese Veränderung den Abtragprozess hinsichtlich t_{Abtrag} , d_{Abtrag} und WEZ/Schmelzrand beeinflusst, wird im Folgenden untersucht. Einen ganzheitlichen Überblick über die Ergebnisse und die daraus definierten Parameter gibt Tabelle 7-5. Erst nachdem die charakteristischen Abtragparameter definiert sind, erfolgt eine Untersuchung der Einflüsse des Einstrahlwinkels γ und einer veränderten Atmosphäre auf den Einzelpulsabtrag.

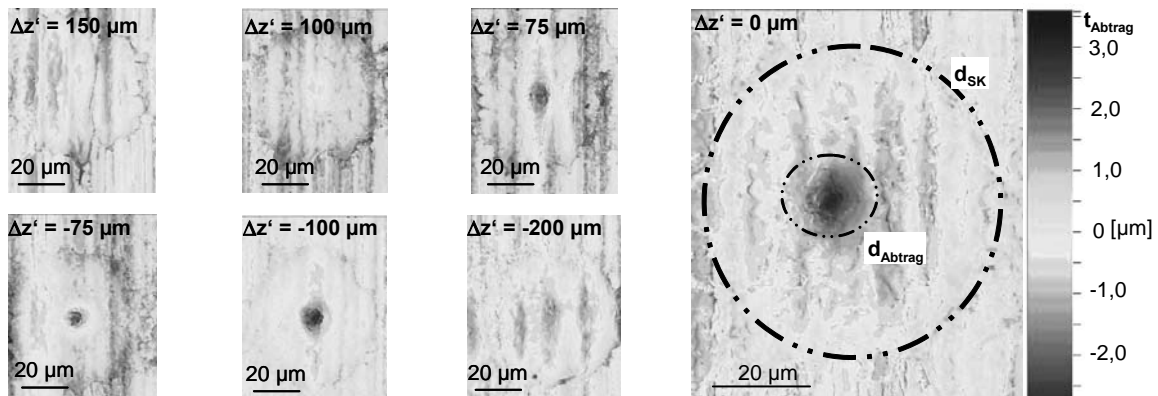


Arbeitsabstand in Maschinenkoordinaten $Z_{\text{Ref}} = -71,655$ mm und $\Delta z' = 0$; Umgebungstemperatur $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; Material 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-6: Einzelpuls-Abtragtiefe t_{Abtrag} bei variiertem Defokussierung $\Delta z'$

Single pulse ablation depth t_{Abtrag} with varied defocussing $\Delta z'$

Bild 7-6 zeigt die Auswirkungen des Pumpstroms I_A bei konstanter Pulsfrequenz $f_P = 5$ kHz auf die Abtragtiefe t_{Abtrag} bei variiertem Defokussierung $\Delta z'$. Der Arbeitsbereich $A_{z'}$ und der z' -Fokusshift $\Delta z'$ sind für den jeweiligen Betriebspunkt dargestellt (vgl. Kap. 5). Zudem ist der Betriebsparameter gekennzeichnet, bei dem aufgrund der Fokusvergrößerung durch Defokussierung eine Unterschreitung der berechneten Schmelzschwellintensität $I_{\text{Schwell,S}}$ vorliegt. Verschiedene 2D-Ansichten (Wyko NT 1100) ausgewählter Einzelpulsabträge mit den Parametern $I_A = 45$ A und $f_P = 5$ kHz sowie variiertem Defokussierung $\Delta z'$ sind in Bild 7-7 dargestellt.



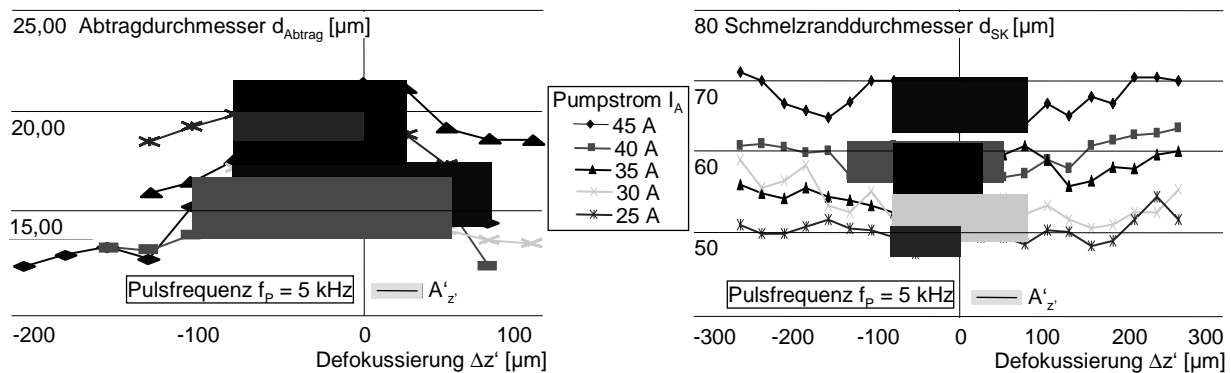
$Z_{\text{Ref}} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluf; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse; die in den Messergebnissen sichtbaren vertikalen Strukturen sind Schleifriefen (geringer Volumenabtrag)

Bild 7-7: 2D-Ansichten ausgewählter Einzelpulsabträge ($I_A = 45$, $f_P = 5$ kHz, $\Delta z'$ variiert)

2D views of selected single pulse ablations ($I_A = 45$, $f_P = 5$ kHz, $\Delta z'$ varied)

Die Abtragergebnisse zeigen, dass die maximale Abtragtiefe t_{Abtrag} im Bereich des zuvor bestimmten z' -Fokusshifts $\Delta z'$ vorliegt. In den Arbeitsbereichen $A_{z'}$ liegen zum Teil keine messbaren Abtragergebnisse vor, so dass neue Arbeitsbereiche $A'_{z'}$ bestimmt werden müssen. In der Mitte von $A'_{z'}$ wird ein neuer Fokusshift $\Delta z'$ definiert, der in der Technologiedatenbank verrechnet wird. Innerhalb $A'_{z'}$ besteht zudem eine nahezu konstante Abtragtiefe. Ein Arbeitsbereich mit konstanten Abtragparametern ist außerdem wichtig, um mögliche Positioniergenauigkeiten der Strahlführung und der Bauteilpositionierung in Strahlrichtung kompensieren zu können. Bei einem Pumpstrom von $I_A = 45$ A wird $A'_{z'}$ mit $-75/+75$ μm definiert, wobei eine mittlere Abtragtiefe t_{Abtrag} von $2,8$ μm vorliegt und kein neuer Fokusshift definiert werden muss. Bild 7-7 zeigt, dass das Abtragnäpfchen durch einen konzentrischen Schmelzrand gekennzeichnet ist. Bei einer Pulsfrequenz von $f_P = 5$ kHz liegt d_{SK} bzw. d_{WEZ} stets über den Berechnungen (Formel 7-7). Obwohl alle Parameter eine ausreichende Intensität zur Sublimation aufweisen, liegt vermutlich ein Misch-Abtrag vor. Dieses Phänomen wird auf eine Plasmaabschirmung und eine damit verbundene Strahlabschirmung zurückgeführt.

Für das in Bild 7-6 untersuchte Parameterregime ist in Bild 7-8 (links) d_{Abtrag} dargestellt, der innerhalb der neuen Arbeitsbereiche nur geringe Schwankungen aufweist. Für $I_A = 45$ A beträgt z. B. der gemittelte Abtragsdurchmesser im $A'_{z'}$ nur $15,6$ μm , was exakt dem Fokussdurchmesser d_f entspricht. In Bild 7-8 (rechts) ist der Verlauf des Schmelzranddurchmessers d_{SK} für $f_P = 5$ kHz dargestellt. Es liegt nahezu keine Veränderung der Ausbreitung des Schmelzrands und somit auch der WEZ bei variiertem Defokussierung und konstanten Pumpströmen vor. Durch eine Reduzierung der Pumpströme verringert sich der Schmelzrand bzw. die WEZ. Dies ist ein Indiz für eine geringere Plasmaabschirmung.

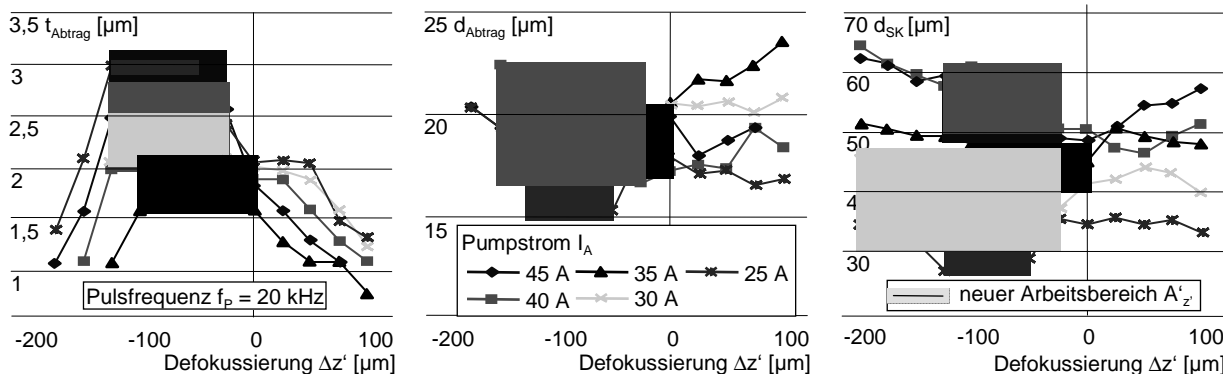


$Z_{Ref} = -71,655 \text{ mm } (\Delta z' = 0)$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ }\mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-8: Einzelpuls-Abtragsdurchmesser d_{Abtrag} und Einzelpuls-Schmelzranddurchmesser d_{SK} bei variiertem Defokussierung $\Delta z'$ und bei variiertem Pumpstrom I_A

Single pulse ablation diameter d_{Abtrag} and single pulse molten edge diameter d_{SK} with varied defocussing $\Delta z'$ and pump current I_A

Bei einer Pulsfrequenz von $f_p = 10 \text{ kHz}$ lassen sich vergleichbare Parameterverläufe wie bei $f_p = 5 \text{ kHz}$ beobachten. Erst bei einer Erhöhung der Pulsfrequenz auf $f_p = 20$ und 40 kHz zeigen die Ergebnisse eine deutliche Verbesserung des Abtragprozesses. Neben einer Steigerung der Abtragtiefe ist eine Reduzierung von d_{SK} festzustellen. Bei einigen Parametern muss davon ausgegangen werden, dass deren Intensität im Bereich $I_{Schwell,V} < I_{Abs} < I_{Schwell,V-A}$ liegt. In Bild 7-9 sind die Einzelpulsabträge bei veränderter Defokussierung $\Delta z'$, bei unterschiedlichen Pumpströmen I_A und bei konstanter Pulsfrequenz $f_p = 20 \text{ kHz}$ abgebildet, wobei bereits die neuen, angepassten Arbeitsbereiche A'_z dargestellt sind.



$Z_{Ref} = -71,655 \text{ mm } (\Delta z' = 0)$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen $R_a = 0,45 \text{ }\mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse

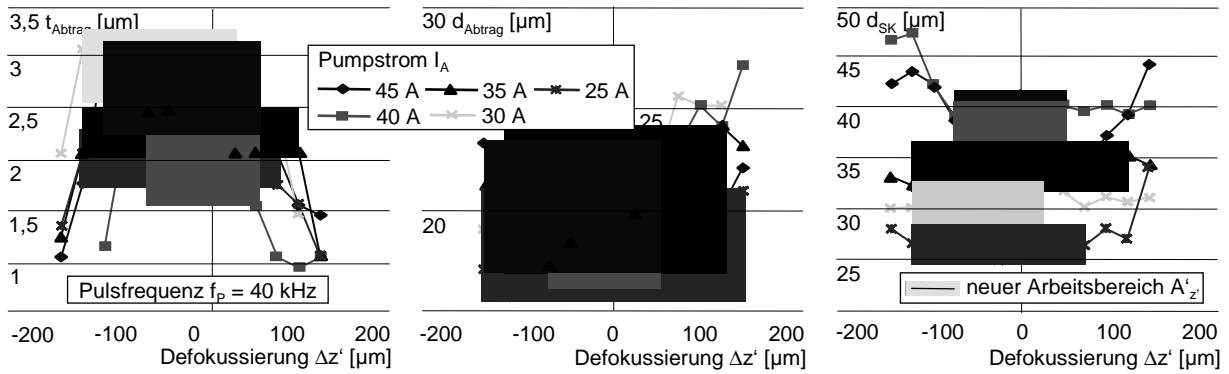
Bild 7-9: Einzelpulsabtrag mit variiertem Defokussierung $\Delta z'$ ($f_p = 20 \text{ kHz}$)

Single pulse ablation with varied defocussing $\Delta z'$ ($f_p = 20 \text{ kHz}$)

Mit abnehmendem Pumpstrom I_A reduziert sich der Abtrag pro Puls bei einer Pulsfrequenz von $f_p = 20 \text{ kHz}$ stetig. Bis $I_A = 35 \text{ A}$ ist der reale d_{WEZ} (d_{SK}) stets größer als der berechnete Wert und es sind deutliche Schmelzablagerungen auf der Oberfläche zu beobachten. Da für die Sublimation ausreichende Intensitäten vorherrschen, ist davon auszugehen, dass diese Parameter im Plasmaabschirmbereich arbeiten. Bei einer Reduzierung des Pumpstroms auf $I_A = 25 \text{ A}$ steigt der mittlere Abtrag im Arbeitsbereich hingegen auf $2,9 \text{ }\mu\text{m}$ sprunghaft an. Weiterhin liegt ein minimierter, mittlerer Abtragsdurchmesser d_{Abtrag} von $15,7 \text{ }\mu\text{m}$ vor. Der berechnete d_{WEZ} wird durch den realen, mittleren d_{SK} von $26,8 \text{ }\mu\text{m}$ unterschritten. Die Schmelzablagerungen sind im Vergleich zu höheren Pumpströmen verringert. Die Erhöhung der Abtragqualität und -quantität ist auf eine Unterschreitung der Plasmaabschirmschwelle zurückzuführen. Für den Betriebspunkt mit $I_A = 25 \text{ A}$ und $f_p = 20 \text{ kHz}$ gilt also: $I_{Schwell,V} < I_{Abs} (25A/20 \text{ kHz}) < I_{Schwell,V-A}$.

Bild 7-10 zeigt die Abtragergebnisse für eine Pulsfrequenz mit $f_p = 40 \text{ kHz}$. Hier weisen die Einzelpulse mit einem Pumpstrom von $I_A = 30 \text{ A}$ die beste Abtragqualität und -quantität auf, so dass dieser als Hauptbearbeitungsparameter definiert wird. Eine Verringerung des Pump-

stroms auf $I_A = 25$ A führt bei gleichbleibender Abtragqualität zu einer deutlichen Abnahme der mittleren Abtragtiefe, was auf die Erreichung der Sublimationsschwelle hindeutet.



$Z_{Ref} = -71,655$ mm ($\Delta z' = 0$); $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse

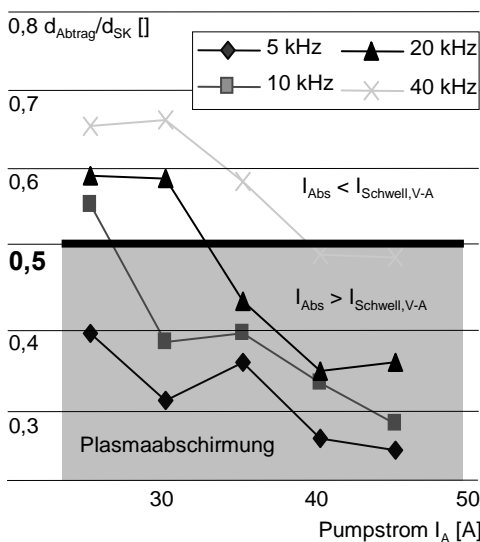
Bild 7-10: Einzelpulsabtrag bei variiert Defokussierung $\Delta z'$ ($f_p = 40$ kHz)

Single pulse ablation with varied defocussing $\Delta z'$ ($f_p = 40$ kHz)

Basierend auf den zuvor erarbeiteten Ergebnissen, auf Formel 7-3 und auf Tabelle 5-6 lässt sich nachfolgende Abschätzung für die Plasmaabschirmschwelle $I_{Schwell,V-A}$ durchführen. Wie zu erwarten war, wird die Plasmaabschirmschwelle von der Pulslänge τ_P beeinflusst.

- $I_{Schwell,V-A} > 5,6 \cdot 10^9$ W/cm² ($\tau_P = 12,5$ ns)
- $> 5,0 \cdot 10^9$ W/cm² ($\tau_P = 11,8$ ns)
- $> 3,8 \cdot 10^9$ W/cm² ($\tau_P = 14,5$ ns)
- $> 2,0 \cdot 10^9$ W/cm² ($\tau_P = 16,9$ ns)

Die Zuordnung der Betriebsparameter zu den einzelnen Intensitätsstufen wird durch die dimensionslose Darstellung d_{Abtrag}/d_{SK} bei variiertem Pumpstrom I_A in Bild 7-11 verdeutlicht. Falls das Verhältnis $d_{Abtrag}/d_{SK} > 0,5$ ist, kann von einer Bearbeitung unterhalb der Plasmaabschirmschwelle ausgegangen werden.



$Z_{Ref} = -71,655$ mm ($\Delta z' = 0$); $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-11: Zuordnung der Betriebsparameter zu den Intensitätsstufen

Allocation of the operating parameters to the intensity values

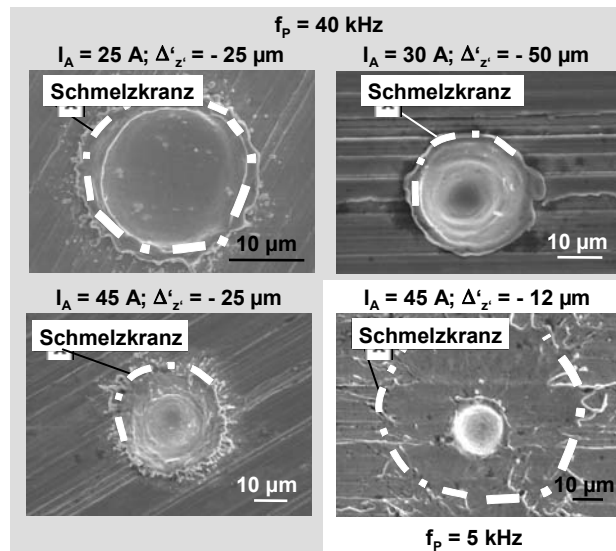


Bild 7-12: REM-Aufnahmen von Einzelpulsen

SEM-views of single pulses

Bild 7-12 zeigt charakteristische REM-Aufnahmen von Laserpulsen mit $f_p = 40$ kHz und 5 kHz, um Aussagen über die Form des Abtrags und der Schmelze treffen zu können. Die zuvor erarbeiteten Erkenntnisse werden bestätigt. Die geringste WEZ und Schmelzrandausbildung liegt beim Hauptbearbeitungsparameter vor. Eine Reduzierung des Pumpstroms I_A auf 25 A verringert den Abtrag, was auf die Zunahme der Reflexion zurückzuführen ist. Eine Steigerung des Pumpstroms I_A auf 45 A führt zu einem deutlichen Anstieg der Schmelzrandausbildung, wobei der Schmelzrand (bzw. -kranz) das Abtragnäpfchen dicht umgibt. Der ursprüngliche Referenzparameter ($I_A = 45$ A, $f_p = 5$ kHz), welcher die höchste Strahlintensität aufweist, zeichnet sich durch einen großen Schmelzranddurchmesser aus. Dies ist auf einen inhomogenen Abtrag durch eine Plasmaablösung zurückzuführen.

Untersuchung des Einflusses von Atmosphären auf den Abtrag

Bei den Versuchen konnte eine Plasmabildung in der Umgebungsatmosphäre (Raumluf unter Normaldruck) ohne Fokussierung auf eine Oberfläche beobachtet werden (Bild 7-13). Dieses Atmosphärenplasma bildet sich auch beim Abtragprozess aus und schirmt zusammen mit dem Metaldampfplasma den Laserstrahl von der Oberfläche ab. Im Allgemeinen bildet sich das Metaldampfplasma früher und schneller sowie weitaus stärker aus, so dass es größere Prozessauswirkungen als das Atmosphärenplasma aufweist. Das Atmosphärenplasma kann jedoch durch eine Bearbeitung im Vakuum oder durch den Einsatz einer inerten Atmosphäre mit höherer Ionisationsenergie reduziert werden. Helium (He) weist mit ungefähr 2370 kJ/mol eine deutlich höhere Ionisationsenergie als Luft (Stickstoff = 1400 kJ/mol) auf.

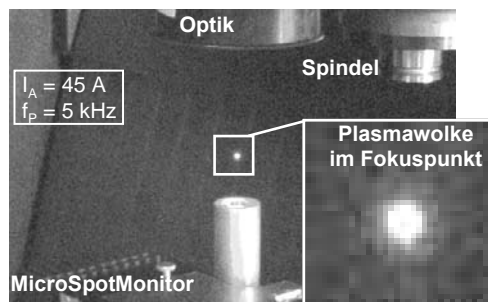


Bild 7-13: Plasmaerzeugung in Luft
Plasma generation in air

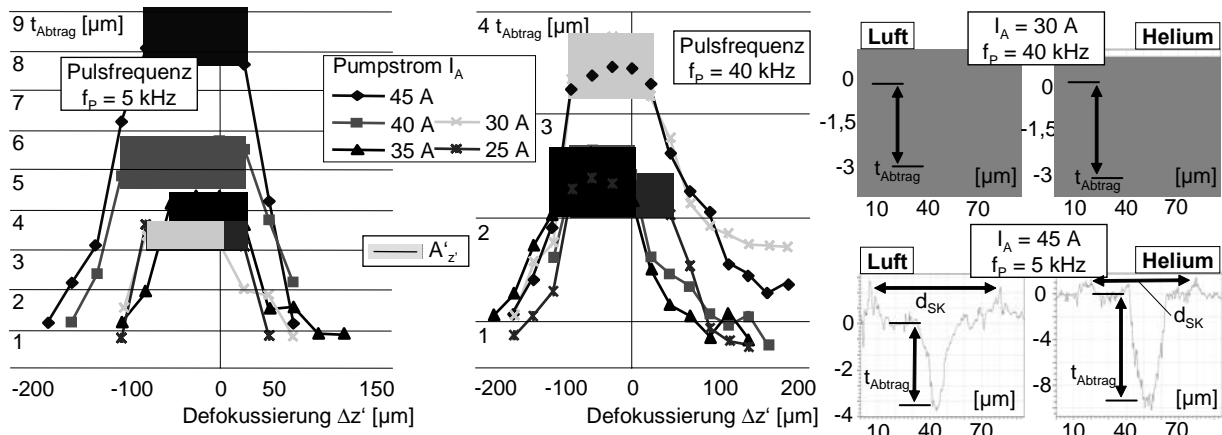


Bild 7-14: Bearbeitungsbox
Machining box

Zur Erhöhung des Plasmaabschirmschwellwerts wird in der Literatur neben dem Einsatz von kurzen Laserpulsen das Arbeiten im Vakuum oder in inerter Atmosphäre vorgeschlagen [POPR05a, S. 35]. Für entsprechende Untersuchungen wird eine gasdichte Schutzkammer eingesetzt (Bild 7-14). Diese weist auf der Oberseite ein für Laserstrahlung transmissives Glasfenster auf, durch die der Laserstrahl auf die Bauteiloberfläche eingestrahlt wird. Durch Gasanschlüsse kann der Schutzkammer Luft entzogen oder diese mit Helium geflutet werden.

Insbesondere bei geringen Pulsfrequenzen ($f_p = 5$ und 10 kHz) und somit kurzen Pulslängen kann durch den Einsatz einer He-Atmosphäre die Abtragtiefe t_{Abtrag} gesteigert werden (Bild 7-15, links), da die bei Raumluf vorliegende starke Gas-Plasmabildung unterbunden wird. Aufgrund der höheren Ionisierungsenergie von He wird deutlich weniger Gas-Plasma erzeugt. Der Laserstrahl wird weniger von der Oberfläche abgeschirmt bzw. es wird weniger Energie vom Plasma absorbiert und somit steht mehr Energie zur Sublimation zur Verfügung. Dieser Effekt der Abtragsteigerung nimmt jedoch bei steigenden Pulslängen bzw. Pulsfrequenzen ab, weil sich die Plasmaerzeugung generell bei geringeren Intensitäten reduziert. Bei allen Betriebsparametern ist der Abtragdurchmesser d_{Abtrag} und der Schmelzranddurchmesser d_{SK} im Vergleich zur Bearbeitung in Raumluf nahezu unverändert (Bild 7-15, rechts), so dass von einer Erhöhung des Plasmaabschirmschwellwerts durch eine He-Atmosphäre nicht ausgegangen werden kann. Weiterhin liegen konstante Abtragresultate nur in einem verkleinerten Arbeitsbereich vor. Bei den Parametern mit $f_p = 5$ und 10 kHz beträgt die durchschnittliche Steigerung der Abtragtiefe durch die Verwendung von He gegenüber Raumluf ca. 100 % (bei $I_A = 45$ A und $f_p = 5$ kHz maximale Steigerung von ca. 200 %). Bei Pulsfrequenzen über 20

kHz ist nur noch eine Steigerung von 15 % festzustellen (Bild 7-15, Mitte). Da die maximal verfügbare Abtragleistung beim Hauptbearbeitungsparameter durch die Verwendung von He nicht wesentlich gesteigert werden kann und zudem ein hoher konstruktiver und finanzieller Aufwand für die industrietaugliche Umsetzung einer Schutzkammer zur Freiformoberflächenbearbeitung erforderlich wäre, wird hier vom Einsatz einer He-Atmosphäre abgesehen.



$Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$ ($\Delta z' = 0$); $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-15: Abtrag bei Helium-Atmosphäre (links) sowie Vergleich von Abtragnäpfchen (rechts)
Ablation in helium atmosphere (left) and comparison of ablation dimples (right)

Bei der Vakuumbearbeitung wird die Schutzkammer zuerst mit Helium geflutet, um den Einfluss von Restluft zu minimieren. Anschließend wird ein Unterdruck von ca. 2 mbar erzeugt. Im Vergleich zur He-Bearbeitung konnte im Vakuum keine messbare Verbesserung des Abtragprozesses hinsichtlich t_{Abtrag} , d_{Abtrag} und d_{SK} beobachtet werden, so dass keine Aussage über eine Verschiebung der Plasmaabschirmschwelle getroffen werden kann. Es ist lediglich eine Verringerung des Einflusses der Defokussierung $\Delta z'$ auf den Abtrag feststellbar. Dies rechtfertigt nicht den noch höheren finanziellen und konstruktiven Aufwand einer Vakuumbearbeitung.

Bestimmung des Winkelgrenzwerts $\Delta \tilde{n}_{\text{Grenz}}$

Insbesondere bei gewölbten Oberflächen wird zur Umsetzung der Segmentierungsvorschrift der Winkelgrenzwert $\Delta \tilde{n}_{\text{Grenz}}$ benötigt (vgl. Kapitel 6.2.2). Generell erfolgt bei einer Zunahme des Winkels $\Delta \tilde{n}$ eine Abnahme der Absorption A (bzw. eine Zunahme der Reflexion R) und eine Vergrößerung der projizierten Fokusfläche. Beide bewirken eine Verringerung der Strahlintensität I_{Abs} . Da der hier eingesetzte Hauptbearbeitungsparameter in einem Intensitätsbereich liegt, bei dem das Plasma auf der Oberfläche anliegt ($A = 1$), ist eine Beeinflussung des Winkels $\Delta \tilde{n}$ auf das Abtragergebnis auszuschließen. Bei der Bestrahlung einer geneigten Oberfläche vergrößert sich jedoch die Form des Laserfokus aufgrund seiner Projektionsabbildung. Die Fläche des Laserfokus kann bei geneigter Oberfläche durch Formel 7-8 berechnet werden.

$$A_{\text{Fokus}} = \frac{r_f^2 \cdot \pi}{\cos(\Delta \tilde{n})} \quad \text{Formel 7-8}$$

Bei $\Delta \tilde{n} \neq 0^\circ$ kann I_{Abs} durch Steigerung der Dauerstrichleistung P_D um den Faktor $1/[\cos(\Delta \tilde{n})]$ konstant gehalten werden. Nach Bild 5-13 steht P_D im proportionalen Zusammenhang zum Pumpstrom I_A , wobei unter Berücksichtigung von Tabelle 5-6 nachfolgende Abschätzung bei einer Pulsfrequenz von $f_p = 40 \text{ kHz}$ erfolgt (Formel 7-9):

$$P_D [\text{W}] = (1,25 \cdot I_A \left[\frac{\text{W}}{\text{A}} \right] - 28,9 [\text{W}]) \quad \text{bei } f_p = 40 \text{ kHz} \quad \text{Formel 7-9}$$

Es ergibt sich die durch Formel 7-10 beschriebene Abhängigkeit zwischen $\Delta\tilde{n}$ und I_A , welche in der Prozess- und Technologiedatenbank durch einen Pumpstrom-Override berücksichtigt wird. Die nötigen Informationen zur Berechnung der Winkel $\Delta\tilde{n}$ werden dem Scanner-Back-End durch Ausgabe des Flächennormalenvektors im ISO-NC-Code (vgl. Bild 6-29) übergeben.

$$I_{A(\Delta\tilde{n})} = \frac{P_{D(90^\circ)} [A/W]}{1,25 \cdot \cos(\Delta\tilde{n})} + 23,1 [A] \quad \begin{array}{l} P_{D(90^\circ)} = 8,6 \text{ W} \\ (I_A = 30 \text{ A}, f_P = 40 \text{ kHz}) \end{array} \quad \text{Formel 7-10}$$

Falls von einer exakten Einhaltung der Fokusebene im Prozess ausgegangen werden kann (Annahme: $P_{G(5)} = 0 \mu\text{m}$), ergibt sich beim Hauptbearbeitungsparameter der nachfolgend durch Formel 7-11 beschriebene Zusammenhang für den Winkelgrenzwert $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$. Bei der maximalen Winkelabweichung des Normalenvektors ($\Delta\tilde{n} = 71,6^\circ$) liegt eine rechnerische Fokusflächenvergrößerung von ca. 212 % vor. Dabei wird der maximale Pumpstrom $I_A = 45 \text{ A}$ durch den Pumpstrom-Override erreicht.

$$0,3141 \leq \cos(\Delta\tilde{n}_{(x)}) \quad \text{mit } \Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}} \leq 71,6^\circ \text{ und } P_{G(5)} = 0^\circ \mu\text{m} \quad \text{Formel 7-11}$$

Gemäß der in Kapitel 5 durchgeführten Versuche muss jedoch eine reale Positionierungsgenauigkeit $P_{G(5)}$ von bis zu $40 \mu\text{m}$ bei einer 5-Achs-Bewegung angenommen werden. Positionierungsgenauigkeiten rufen stets Defokussierungen hervor, so dass durch eine Vergrößerung der Fokusfläche geringere Intensitäten vorliegen. Ob der Arbeitsbereich A'_z die Einflüsse der Positionierungsgenauigkeit kompensieren kann, muss im Folgenden untersucht werden.

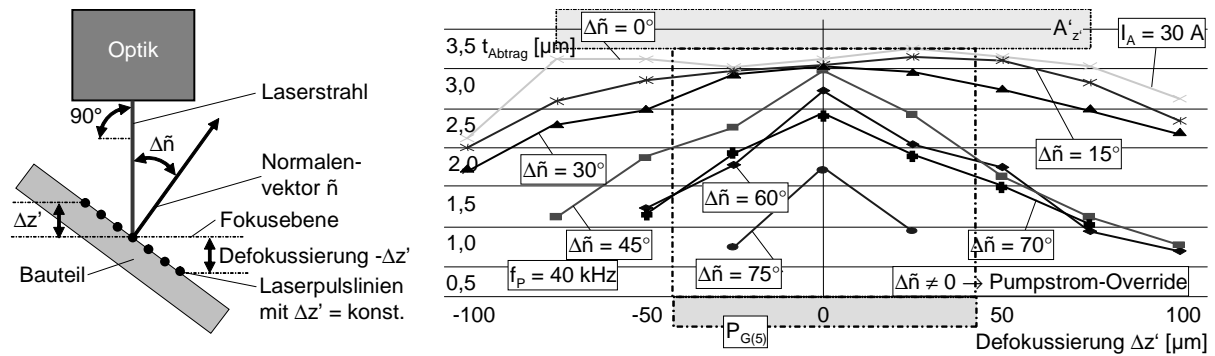
Da die reale Positionierungsgenauigkeit im Prozess nicht vorhergesagt werden kann, kann keine In-Prozess-Kompensation durch einen zusätzlichen Pumpstrom-Override erfolgen. Bei einer maximalen Defokussierung von $40 \mu\text{m}$ (analog zu $P_{G(5)}$) vergrößert sich der Fokusdurchmesser d_f beim Hauptbearbeitungsparameter von $19,6 \mu\text{m}$ auf ca. $23 \mu\text{m}$. Um die Intensität konstant zu halten, muss bei einer ebenen Oberfläche ($\Delta\tilde{n} = 0^\circ$) eine Erhöhung des Pumpstroms I_A von 30 A auf $32,6 \text{ A}$ erfolgen. Dies kann wie eine zusätzliche einachsige Verkippung des Bauteils um $\Delta\tilde{n}_{(x)} = 43,6^\circ$ interpretiert werden. Die zusätzliche Auswirkung der Positionierungsgenauigkeit $P_{G(5)}$ auf die einzelnen Grenzwinkel kann durch eine Superpositionierung mit Formel 7-11 berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich der in Formel 7-12 dargestellte Zusammenhang für $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$. Bei einer Defokussierung um $40 \mu\text{m}$ ($P_{G(5)}$) beträgt der Winkelgrenzwert $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}} = 28^\circ$. Bei diesem Grenzwinkel sind die unterschiedlichen Einflüsse der s- und p-Polarisationen auf die Reflexion und somit auf die Absorption des Laserlichts bei Metallen nach Fresnel zu vernachlässigen [POPR02].

$$0,883 \leq \cos(\Delta\tilde{n}) \quad \text{mit } \Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}} \leq 28^\circ \quad \text{Formel 7-12}$$

Durch Einzelpulsabtragversuche an einachsig angestellten Oberflächen soll im Folgenden der theoretisch bestimmte Winkelgrenzwert $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$ für den Hauptbearbeitungsparameter bestätigt werden. Zur Kompensation der Fokusvergrößerung erfolgt der zuvor berechnete winkelabhängige Pumpstrom-Override. Bei den Versuchen wird weiterhin der Einfluss einer Defokussierung (simulierte Positionierungsgenauigkeit) auf den Grenzwinkel berücksichtigt, in dem Laserpulslinien entlang $\Delta z' = \text{konstant}$ erzeugt werden. Bild 7-16 (links) zeigt den Versuchsaufbau und die Versuchsauswertung hinsichtlich t_{Abtrag} . Eine mehrachsige Verkippung des Normalenvektors kann versuchstechnisch nicht reproduzierbar umgesetzt werden.

Aus Bild 7-16 (rechts) wird ersichtlich, dass sich die zuvor erarbeiteten Zusammenhänge in den Versuchsergebnissen widerspiegeln. Bei fehlender Defokussierung ($\Delta z' = 0$) kann mit Hilfe des Pumpstrom-Overrides die Abtragtiefe t_{Abtrag} bis zu einem Winkel von $\Delta\tilde{n} = 70^\circ$ nahezu konstant gehalten werden. Bei einem Winkel von $\Delta\tilde{n} = 71,6^\circ$ ist der maximale Pumpstrom-Override von $I_A = 45 \text{ A}$ erreicht, so dass keine weitere Steigerung des Pumpstroms zur Fokusflächenkompensation möglich ist. Dies wird durch den deutlich verminderten Abtrag bei $\Delta\tilde{n} = 75^\circ$ bestätigt. Falls die reale Positionierungsgenauigkeit $P_{G(5)}$ durch eine definierte Defokussie-

ung $\Delta z'$ simuliert wird, dann liegen nur bis zu einem Winkel von $\Delta \tilde{n} = 30^\circ$ konstante Abtragtiefen vor. Im Folgenden wird daher stets die Einhaltung der Grenzwinkelbedingung aus Formel 7-12 berücksichtigt.



$Z_{\text{Ref}} = -71,655$ mm - 0,05 mm ($\Delta z'$); $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ µm; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-16: Versuchsaufbau (links) und Bestimmung des Winkeleinflusses $\Delta \tilde{n}$ auf den Einzelpulsabtrag mit Pumpstrom-Override (Hauptbearbeitungsparameter)

Experimental setup (left) and determination of the influence of the angle $\Delta \tilde{n}$ on the single pulse ablation with pump current override (main process parameter)

Tabelle 7-5 fasst die ermittelten Abtragkenngrößen für die Betriebspunkte zusammen, wobei der jeweils angepasste Fokusschift Δ'_z und der Arbeitsbereich A'_z auf die Fokusebene des Referenzparameters ($I_A = 45$ A; $f_p = 5$ kHz) bezogen sind.

Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
mittlere Abtragtiefe	t_{Abtrag}	µm	1,7	1,6	1,9	2,7	2,8
mittlerer Abtragdurchmesser	d_{Abtrag}	µm	19	15,7	19,8	14,64	15,6
mittlerer Schmelzranddurchm.	d_{SK}	µm	49,5	52,2	57	58,7	66,2
angepasster Arbeitsbereich	A'_z	µm	-75/0	-75/75	-75/25	-100/50	-75/75
angepasster Fokusschift	Δ'_z	µm	-38	0	-25	-25	0
Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
mittlere Abtragtiefe	t_{Abtrag}	µm	2,4	1,7	1,9	2,3	2,4
mittlerer Abtragdurchmesser	d_{Abtrag}	µm	19	16,8	19,3	18	16,6
mittlerer Schmelzranddurchm.	d_{SK}	µm	34,6	44,9	50	56,1	62,2
angepasster Arbeitsbereich	A'_z	µm	-75/25	-75/0	-50/50	-75/75	-150/50
angepasster Fokusschift	Δ'_z	µm	-25	-38	0	0	-50
Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
mittlere Abtragtiefe	t_{Abtrag}	µm	2,9	2,3	1,7	2,1	2,6
mittlerer Abtragdurchmesser	d_{Abtrag}	µm	15,7	19,2	18	17,7	18
mittlerer Schmelzranddurchm.	d_{SK}	µm	26,8	32,7	42,7	52,9	52
angepasster Arbeitsbereich	A'_z	µm	-125/-50	-100/-25	-100/0	-125/-25	-125/-25
angepasster Fokusschift	Δ'_z	µm	-88	-68	-50	-75	-75
Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
mittlere Abtragtiefe	t_{Abtrag}	µm	2	3	2,1	2,2	2,9
mittlerer Abtragdurchmesser	d_{Abtrag}	µm	18,4	19,8	19,6	18,3	18,8
mittlerer Schmelzranddurchm.	d_{SK}	µm	26,7	30,1	33,9	37,6	39,2
angepasster Arbeitsbereich	A'_z	µm	-125/75	-125/25	-125/125	-75/50	-100/50
angepasster Fokusschift	Δ'_z	µm	-25	-50	0	-13	-25

$Z_{\text{Ref}} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; Normaldruck; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ µm; gemittelte Ergebnisse; bezogen auf Referenzparameter: $I_A = 45$ A; $f_p = 5$ kHz

Tabelle 7-5: Kenngrößen der Betriebsparameter (Hauptbearbeitungsparameter = ████████)
Characteristics of the operating parameters (main process parameter = ████████)

Folgendes Zwischenfazit kann aus den Einzelpulsabtragversuchen gezogen werden:

- Tendenziell sinkt die Plasmaabschirmschwelle $I_{Schwell, V-A}$ mit zunehmender Pulslänge τ_P .
- Alle Betriebsparameter weisen einen Fokusschift $\Delta'z'$ auf, der stets zu berücksichtigen ist.
- Betriebsparameter mit $f_P = 40$ kHz und $I_A = 30$ A weist den größten Abtrag pro Puls bei geringsten Schmelzablagerungen auf. Da aufgrund der hohen Pulswiederholfrequenz auch die höchste Abtragleistung vorliegt, dient dieser als **Hauptbearbeitungsparameter**.
- Eine He-Atmosphäre steigert den Pulsabtrag insbesondere bei hohen Pulsspitzenleistungen aufgrund einer erhöhten Unterdrückung des Atmosphärenplasmas. Beim Hauptbearbeitungsparameter ist die Abtragsteigerung jedoch zu vernachlässigen. Realisierung einer He-Atmosphäre ist sehr kostenintensiv, so dass davon Abstand genommen wird.
- Eine Prozessverbesserung im Vakuum konnte nicht nachgewiesen werden.
- Falls eine ebene Bearbeitung vorliegt ($\Delta\tilde{n} = 0$), kann die Positioniergenauigkeit der Anlage $P_{G(5)}$ über die definierten Arbeitsbereiche A'_z kompensiert werden.
- Konstante Abtragergebnisse liegen vor, falls $\Delta\tilde{n}_{Grenz}$ kleiner als 28° ist und ein Pumpstrom-Override gemäß Formel 7-10 erfolgt. Die Einflüsse der s- und p-Polarisationen des Laserlichts auf die Absorption können unterhalb von $\Delta\tilde{n} = 40^\circ$ vernachlässigt werden.
- Die Prozess- und Technologiedatenbank enthält die Kenngrößen aller Betriebsparameter.

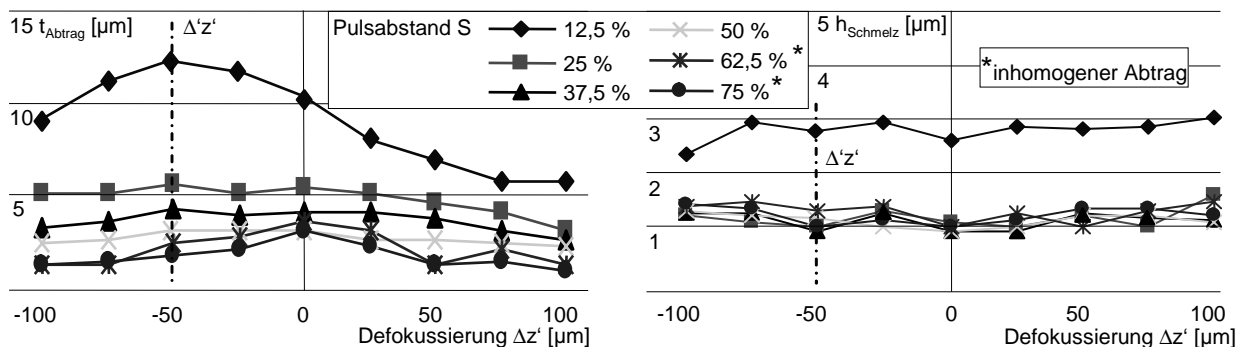
7.3.2 Überlapppulsabtrag (zweidimensional): Gräben Overlap pulse ablation (two-dimensional): grooves

Durch einen definierten Hatchabstand H bilden Gräben, die wiederum durch den Pulsabstand S beeinflusst werden, die Grundlage des flächigen und voluminösen Abtrags. Im Folgenden wird daher der Einfluss des Pulsabstands S auf die qualitative und quantitative Ausbildung der Gräben untersucht, wobei hauptsächlich der Hauptbearbeitungsparameter in Raumluft Verwendung findet. Die erzeugten Gräben werden hinsichtlich Abtragtiefe t_{Abtrag} , Abtragbreite d_{Abtrag} , Wärmeeinflusszone d_{WEZ} / Schmelzrand d_{SK} und Schmelzrandhöhe $h_{Schmelz}$ ausgewertet. Tabelle 7-6 enthält die Versuchsparameter des Hauptbearbeitungsparameters.

Pulsabstand S [%]	12,5	25	37,5	50	62,5	75
Pulsabstand S [μm]	2,5	5	7,5	10	12,5	15
Vorschub v_f [mm/s]	99	198	297	396	495	594

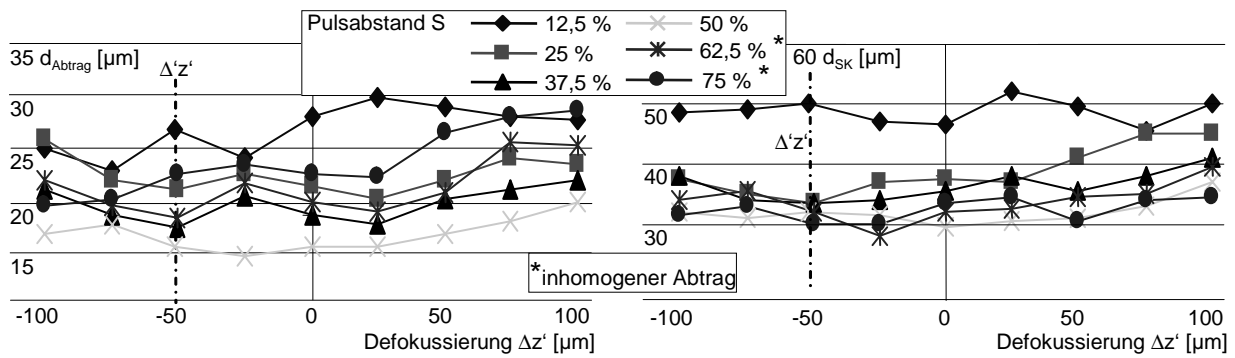
Tabelle 7-6: Parameter für Überlappversuche – Pulsabstand S [%] bei $f_P = 40$ kHz
Parameters for overlap tests – pulse distance S [%] with $f_P = 40$ kHz

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass innerhalb des untersuchten Parameterregimes beim Hauptbearbeitungsparameter ($I_A = 30$ A) die besten Abtragergebnisse erzielt werden. Dies ist auf den vorliegenden Intensitätsbereich zurückzuführen. Die Bilder 7-17 und 7-18 zeigen die Auswertung der Abtragversuche für den Hauptbearbeitungsparameter.



$I_A = 30$ A, $f_P = 40$ kHz; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-17: Einfluss des Pulsabstands S auf t_{Abtrag} und $h_{Schmelz}$ ($I_A = 30$ A; $f_P = 40$ kHz)
Influence of the pulse distance S on t_{Abtrag} and $h_{Schmelz}$ ($I_A = 30$ A; $f_P = 40$ kHz)

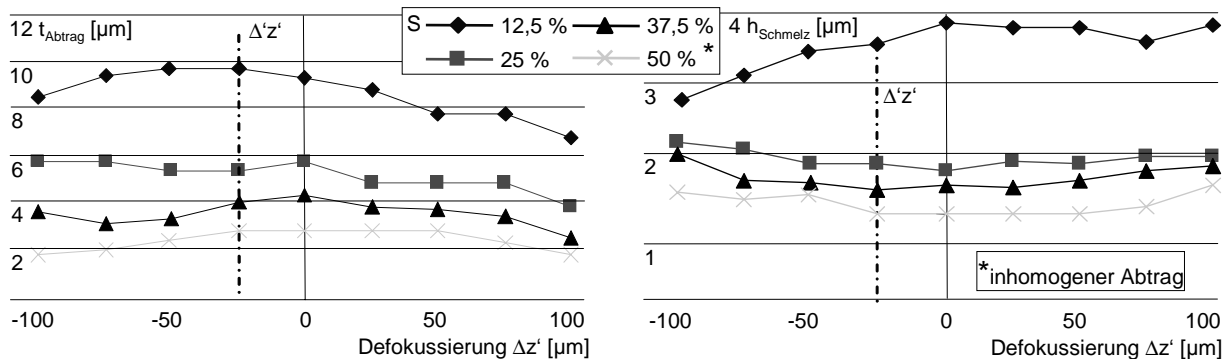


$I_A = 30$ A, $f_P = 40$ kHz; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-18: Einfluss des Pulsabstands S auf d_{Abtrag} und d_{SK} ($I_A = 30$ A; $f_P = 40$ kHz)

Influence of the pulse distance S on d_{Abtrag} and d_{SK} ($I_A = 30$ A; $f_P = 40$ kHz)

Bei einem Pulsabstand S von 12,5 % liegt mit ca. 13 μm die tiefste Abtragspur vor, wobei jedoch eine deutliche Schmelzrandhöhe ($h_{Schmelz} \approx 3$ μm) zu beobachten ist. Aufgrund des hohen Überlappfaktors erfolgt dabei eine nahezu ortsfeste Mehrfachpulsung, wie sie beim Laserstrahlbohren bekannt ist. Die hohe Schmelzrandezeugung ist mit unzureichendem Materialaustrieb zu begründen, da aufgrund der hohen Pulsüberdeckung sowohl flüssige als auch erstarrte Schmelze mit hoher Laserstrahlintensität in Wechselwirkung tritt. Bei einer Verringerung des Pulsabstands ($25\% \leq S \leq 50\%$) wird die Schmelzrandbildung auf ein Minimum reduziert, so dass nahezu im gesamten Arbeitsbereich A'_z eine konstante Schmelzrandhöhe $h_{Schmelz}$ von 1 μm definiert werden kann. Im Mittel beträgt die Abtragtiefe t_{Abtrag} dabei etwa 4 μm . Der Abtragsdurchmesser d_{Abtrag} und d_{SK} liegen im Bereich der bei den Einzelpulsuntersuchungen ermittelten Werte. Innerhalb $25\% \leq S \leq 50\%$ nehmen die Abtragtiefe t_{Abtrag} , der Abtragsdurchmesser d_{Abtrag} und die Ausbildung des Schmelzrands d_{SK} erwartungsgemäß mit geringerem Pulsabstand leicht zu. Ab einem Pulsabstand von 62,5 % sind erste Inhomogenitäten in der Ausbildung einer konstanten Abtragspur festzustellen. Eine Verringerung des Pumpstroms auf $I_A = 25$ A ($I_{Schwell,V} < I_{Abs} < I_{Schwell,V-A}$) weist bei allen Pulsabstandsfaktoren geringere Abtragtiefen bei leicht vergrößerten Schmelzrandhöhen auf (Bild 7-19). Inhomogenitäten in der Ausbildung einer konstanten Abtragspur sind bereits bei einem Pulsabstand S von 50 % festzustellen.

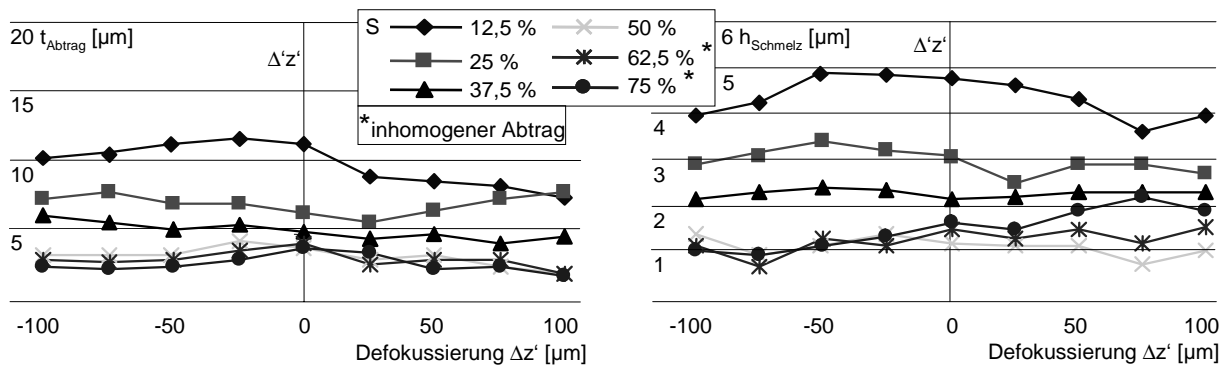


$I_A = 25$ A, $f_P = 40$ kHz; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45$ μm ; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-19: Einfluss des Pulsabstands S auf t_{Abtrag} und $h_{Schmelz}$ ($I_A = 25$ A; $f_P = 40$ kHz)

Influence of the pulse distance S on t_{Abtrag} and $h_{Schmelz}$ ($I_A = 25$ A; $f_P = 40$ kHz)

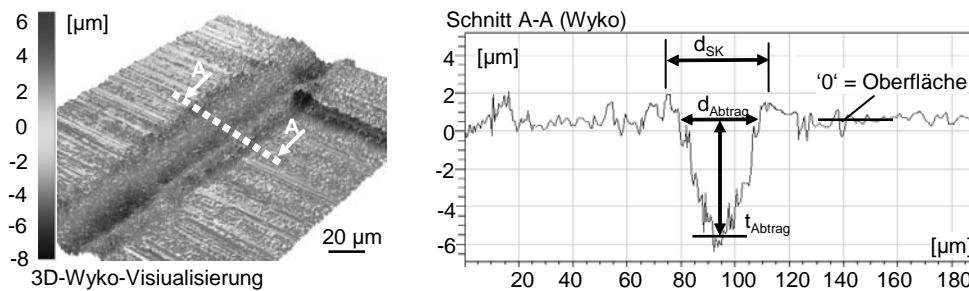
Eine Steigerung des Pumpstroms auf $I_A = 35$ A ($I_{Abs} \leq I_{Schwell,V-A}$) bewirkt gegenüber dem Hauptbearbeitungsparameter eine Steigerung der Schmelzrandhöhe bei vergleichbaren Abtragtiefen (Bild 7-20), was auf vereinzelte Plasmaabschirmungen zurückzuführen ist.



$I_A = 35 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$; gemittelte Ergebnisse

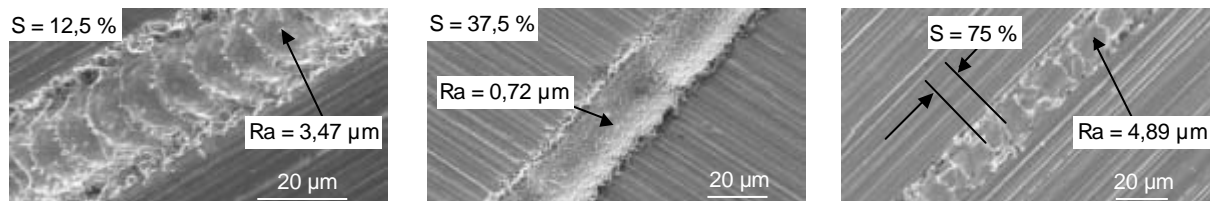
Bild 7-20: Einfluss des Pulsabstands S auf t_{Abtrag} und h_{Schmelz} ($I_A = 35 \text{ A}$; $f_P = 40 \text{ kHz}$)
Influence of the pulse distance S on t_{Abtrag} and h_{Schmelz} ($I_A = 35 \text{ A}$; $f_P = 40 \text{ kHz}$)

Bild 7-21 zeigt eine durch den Hauptbearbeitungsparameter, einen Pulsabstand von $S = 25\%$ und eine Defokussierung um $\Delta z' = -50 \text{ µm}$ erzeugte Abtragspur, welche mit einem Weißlichtinterferometer (Wyko NT 1100) gemessen und daraufhin durch eine entsprechende Analysesoftware als Querschnitt graphisch visualisiert wurde. Deutlich ist die homogene Abtragspur mit minimalem Schmelzrand zu erkennen. Zum Vergleich sind in Bild 7-22 Abtragspuren mit jeweils einem Pulsabstand S von $12,5\%$, $37,5\%$ und 75% dargestellt. Anhand der ermittelten Rauheiten R_a im Abtraggrund lassen sich die Abtraghomogenitäten bestimmen. Bei optimalem Parametersatz liegt eine Rauheit R_a von deutlich unter 1 µm vor, ansonsten ist die Rauheit R_a deutlich erhöht und es bildet sich eine schuppige Oberfläche aus.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche $R_a = 0,45 \text{ µm}$

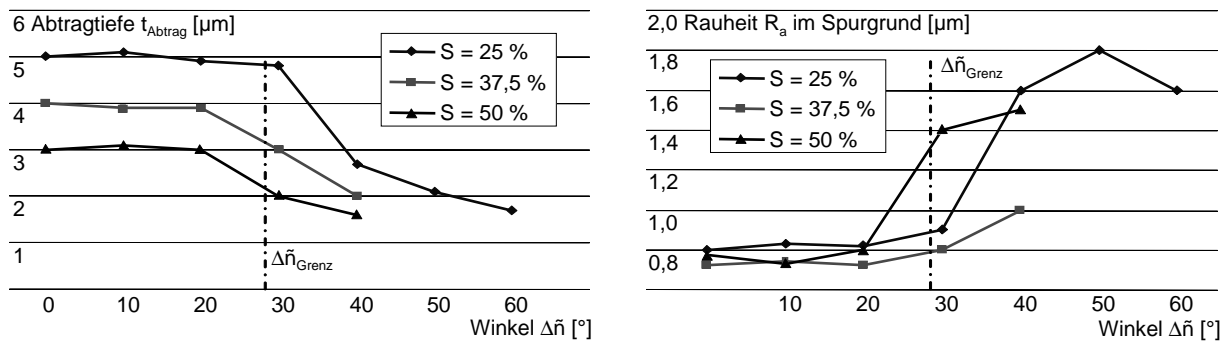
Bild 7-21: Visualisierung eines Abtraggrabens mit Wyko NT 1100 (Pulsabstand $S = 25\%$)
Visualisation of an ablation groove with Wyko NT 1100 (pulse distance $S = 25\%$)



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$

Bild 7-22: REM-Aufnahmen verschiedener Abtraggräben mit variiertem Pulsabstand S
SEM-views of different ablation grooves with varied pulse distance S

Zur Übertragung der Ergebnisse auf gewölbte Oberflächen wird für den Hauptbearbeitungsparameter der Einfluss einer einachsig verkippten Oberfläche ($\Delta n \neq 0$) auf den Abtragprozess bei variiertem Pulsabstand S ($25\% < S < 50\%$) untersucht (Bild 7-23). Es wird der Pumpstrom-Override zur Kompensation der Strahlverzeichnung genutzt. Dabei lehnt sich die Versuchsdurchführung an den in Bild 7-16 (links) dargestellten Aufbau an, wobei ohne gezielte Defokussierung gearbeitet wird. Die Auswertung bezüglich t_{Abtrag} und R_a erfolgt mittels Wyko NT 1100. Ab einem Winkel Δn von 30° liegt kein konstanter Grabenabtrag mehr vor.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ Pumpstrom-Override; gemittelte Ergebnisse

Bild 7-23: Einfluss der Oberflächenneigung $\Delta\tilde{n}$ und des Pulsabstands S auf den Grabenabtrag
Influence of the surface declination and of the pulse distance S on groove ablation

Folgendes Zwischenfazit kann aus den Überlappabtragversuchen gezogen werden:

- Homogene Abträge liegen beim Hauptbearbeitungsparameter in einem Pulsabstandregime S zwischen 25 % und 50 % vor, dabei beträgt der Abtrag t_{Abtrag} im Mittel $4 \mu\text{m}$, die Schmelzrandhöhe h_{Schmelz} etwa $1 \mu\text{m}$ und die Rauheit R_a im Abtraggrund etwa $1 \mu\text{m}$. Dieses Parameterregime wird für die nachfolgenden Untersuchungen weiter genutzt.
- Mit abnehmendem Pulsabstand nimmt die Abtragtiefe t_{Abtrag} im Parameterregime zu.
- Die Vorschubgeschwindigkeit v_f nimmt mit zunehmendem Pulsabstand ab, so dass bei höheren Pulsabständen eine verringerte Bearbeitungszeit besteht.
- Bei ebener Bearbeitung liegen stets konstante Abträge im Arbeitsbereich A'_z vor.
- Bei geneigten bzw. gewölbten Oberflächen ist ein Grenzwinkel $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}$ von 28° einzuhalten.

7.3.3 Schichtabtrag (dreidimensional): Quader

Layer ablation (three-dimensional): cubic

Flächenverfahrenzyklus

Ein flächiger Abtrag wird durch eine Aneinanderreihung von Einzelgräben erzeugt, wobei die wichtigsten Stellgrößen der Hatch H bzw. der Bahnabstand n und der eingesetzte Flächenverfahrenzyklus sind. Über eine geeignete Stapelstrategie werden dann einzelne Abtragflächen schichtweise zu einem dreidimensionalen Abtrag zusammengesetzt. Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es, die Rauheit R_a im Abtraggrund zu minimieren und eine reproduzierbare Schichttiefe s zu erzielen. Zudem soll die Schmelzranderzeugung am Abtragrand auf ein Minimum verringert werden. Ein homogener flächiger Abtragprozess weist im Allgemeinen eine geringe Oberflächenrauheit R_a und Schmelzranderzeugung h_{Schmelz} auf. Für einen Pulsabstand S zwischen 25 % und 50 % werden mit dem Hauptbearbeitungsparameter zuerst einschichtige Abträge in einer Ebene erzeugt, wobei der Hatch H zwischen 12,5 % und 62,5 % sowie die im CAM-System verfügbaren Flächenverfahrenzyklen – Zick-Zack, One-Way und Spiral (vgl. Bild 6-21) – variiert werden. Tabelle 7-7 enthält die Versuchsparemeter.

Hatch H [%]	12,5	25	37,5	50	62,5	100 = d_f
Bahnabstand n [μm] (*gerundet)	2,5*	5*	7,5*	10*	12,5*	19,8

Tabelle 7-7: Versuchsparemeter für Überlappversuche – Hatch H [%] / Bahnabstand n [μm]

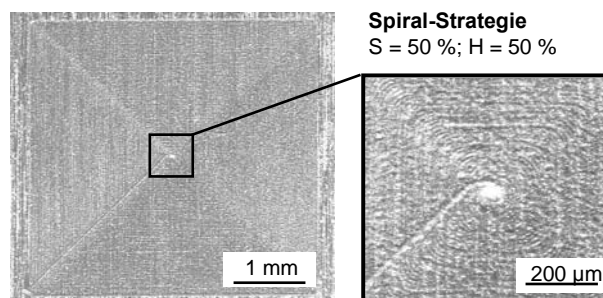
Parameters for distance tests – hatch H [%] / track distance n [μm]

Bei der Zick-Zack-Strategie kann der Laser aus systemtechnischen Gründen entlang der Zustellbahn nicht ab- und angeschaltet werden (vgl. Bild 6-23), weil die Signallauf- und Schaltzeiten des Lasers größer sind als das sich aufgrund des Zustellwegs ergebende Zeitintervall (hier Bahnabstand n). Gegebenenfalls liegt in diesem Bereich ein zusätzlicher Abtrag vor.

Für die One-Way-Strategie wird im Vergleich zur Zick-Zack-Strategie eine erhöhte Bearbeitungszeit benötigt, weil im Leerhub kein Abtrag erfolgt. Der Leerhub wird vom Scanner als Jump umgesetzt, so dass durch eine separate Vorschubanpassung der Jump-Bewegung eine

Verringerung des Zeitverlusts erfolgen kann. Der Einfluss einer höheren Jump-Geschwindigkeit auf den Abtragprozess (z. B. Positionierungsgenauigkeiten aufgrund von Scannerspiegelabbremsvorgängen) wird im Folgenden nur dann untersucht, falls mit der One-Way-Strategie bessere Oberflächenrauheiten als mit der Zick-Zack-Strategie erzielt werden können. Außerdem erfolgt bei jeder Abtragbahn ein erneutes Anschalten der Laserstrahlquelle, so dass ein inhomogener Abtrag am Bahnanfang durch die mangelnde Start-Pulsstabilität des Lasers zu erwarten ist.

Bei der Spiral-Strategie liegen die Zustellbahnen nicht wie bei der Zick-Zack-Strategie im Randbereich sondern innerhalb der Struktur vor. Die Abtragresultate zeigen (Bild 7-24), dass bei der Spiral-Strategie deutliche Markierungen im Bereich der Zustellbahnen auftreten. Diese sind auf einen höheren Abtrag zurückzuführen und vermindern die Oberflächenqualität. Daher wird im Folgenden die Spiral-Strategie nicht weiter verfolgt.

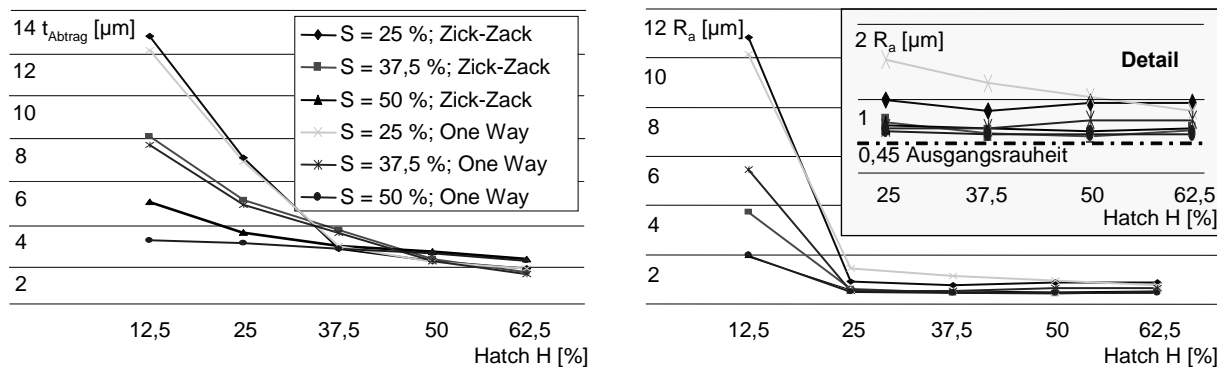


Spiral-Strategie
S = 50 %; H = 50 %

$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{Ref} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche $R_a = 0,45 \text{ µm}$; gemittelte Ergebnisse; $v_{Jump} = v_f$

Bild 7-24: Oberflächenfehler durch die Nutzung der Spiral-Strategie
Surface error through the use of the spiral strategy

Bild 7-25 zeigt die Auswertung der Abtragversuche mit Zick-Zack- und One-Way-Strategie, wobei die Jumpgeschwindigkeit v_{Jump} gleich der Vorschubgeschwindigkeit v_f ist.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{Ref} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$; gemittelte Ergebnisse; $v_{Jump} = v_f$

Bild 7-25: Abtragtiefe t_{Abtrag} und Rauheit R_a bei variiertem Pulsabstand S, Flächenverfahrenzyklus und Hatch H

Ablation depth t_{Abtrag} and roughness R_a with varied pulse distance S, plane machining strategy and hatch H

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei der Abtragtiefe t_{Abtrag} keine großen Unterschiede bei der Verwendung der verschiedenen Flächenverfahrenzyklen vorliegen. Weiterhin beträgt bei allen Parameterkombinationen der Schmelzaufwurf am Rand der Struktur $h_{Schmelz}$ im Mittel etwa 25 % der Schichttiefe s. Bei der One-Way-Strategie sind, wie erwartet, im Start-Bereich der NC-Bahn stets ein erhöhter Schmelzaufwurf von $h_{Schmelz} \approx 0,75 t_{Abtrag}$ und ein erhöhter Abtrag festzustellen. Bei der Zick-Zack-Strategie treten im Zustellbereich nur erhöhte Schmelzaufwürfe im Falle eines niedrigen Hatches von $H = 12,5 \%$ auf, so dass dieser Parameter möglichst vermieden werden sollte. In Bild 7-26 sind entsprechende messtechnisch aufbereitete Quaderabträge dargestellt (Wyko NT 1100). Zur besseren Verdeutlichung der Effekte beste-

hen die Strukturen aus drei übereinander liegenden Abtragschichten mit konstanten Parametern. Die Zick-Zack-Strategie weist geringere Rauheitswerte und somit eine bessere Abtraggenauigkeit als die One-Way-Strategie auf. Dies ist mit einer kontinuierlicheren Energie- bzw. Wärmeeinbringung bei der Zick-Zack-Strategie zu erklären. Daher wird die One-Way-Strategie nicht weiter betrachtet.

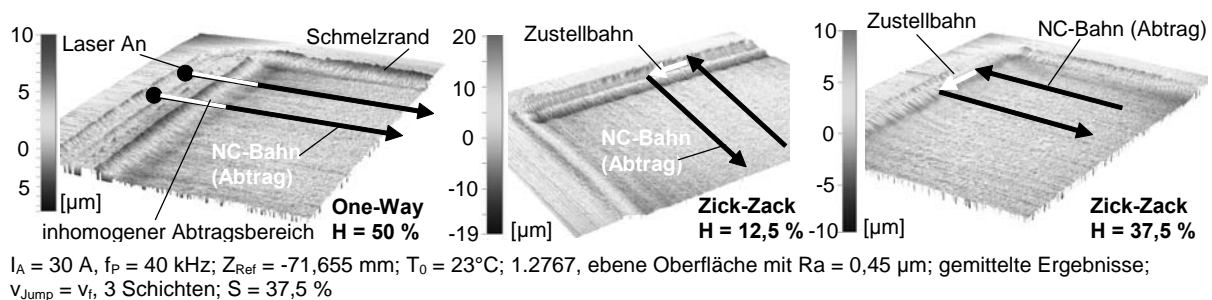


Bild 7-26: Abtragqualität in Abhängigkeit vom Flächenverfahrenzyklus

Ablation quality depending of the plane machining strategy

Bild 7-27 (links) zeigt die REM-Aufnahme des Abtraggrunds bei einem Pulsabstand $S = 25 \%$ und einem Hatch $H = 12,5 \%$. Durch die hohe Pulsüberlagerung liegt ein tiefer Abtrag, aber auch eine deutlich zerfurchte Oberfläche vor. Für die Zick-Zack-Strategie und einen Hatch zwischen 25% und $62,5 \%$ liegen für alle Pulsabstandswerte die Oberflächengüten deutlich unter $R_a = 1 \mu\text{m}$. Daraus lässt sich eine hohe Abtraggenauigkeit für den nachfolgenden mehrschichtigen Abtrag ableiten. Die beste Oberflächengüte mit $R_a = 0,56 \mu\text{m}$ wird durch die Parameter $S = 37,5 \%$ und $H = 50 \%$ erzeugt (Bild 7-27, rechts). Durch den Laserabtrag wird die Oberflächenrauheit der Ausgangsoberfläche dabei nur um 24% gesteigert.

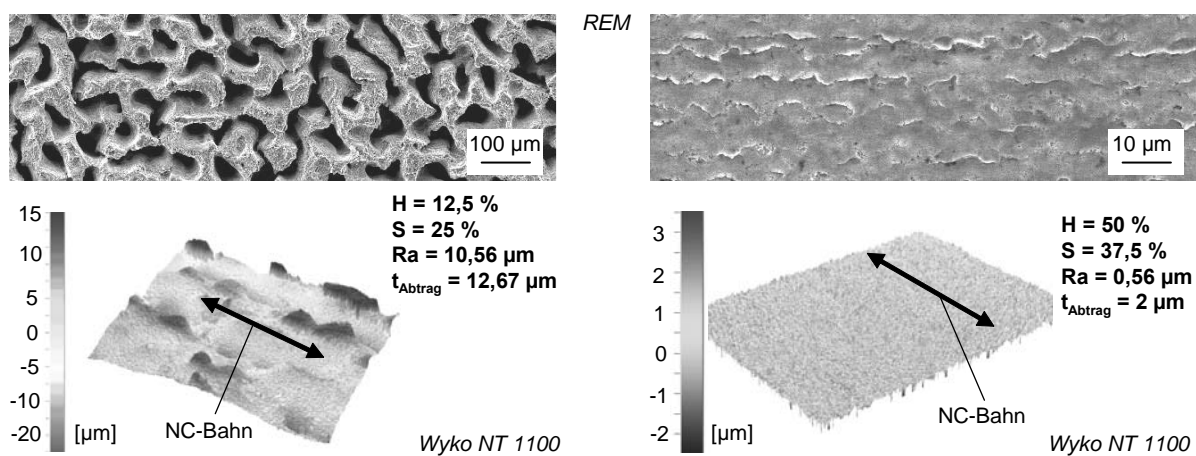


Bild 7-27: Oberflächenrauheit R_a durch variierte Laserparameter

Surface roughness R_a through varied laser parameters

Um die einzelnen untersuchten Parameterkombinationen besser bewerten und vergleichen zu können, ist in Bild 7-28 der Volumenabtrag pro Zeit dargestellt. Dabei muss die Schichttiefe s berücksichtigt werden, weil diese auf die Strukturabbildung in z -Richtung einen erheblichen Einfluss hat.

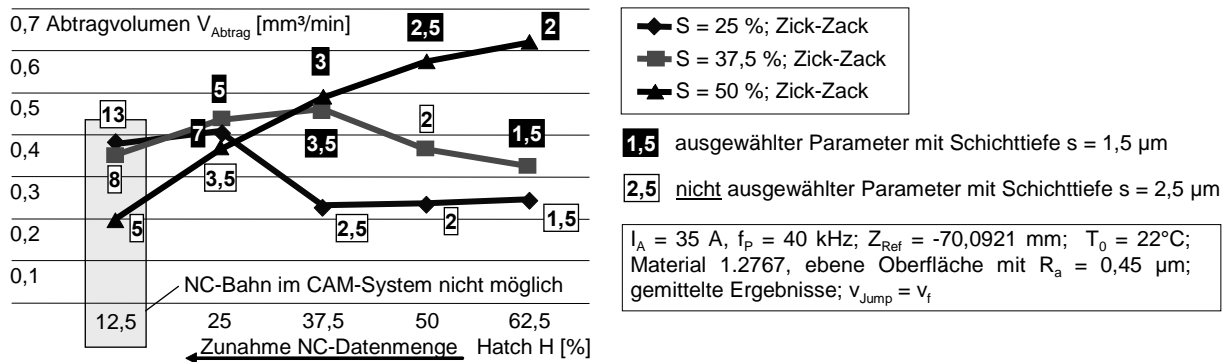


Bild 7-28: Erzielbare Abtragvolumen und definierte Schichttiefen s
Attainable ablation volumes and defined layer depths s

Es können somit nachfolgende Parameterkombinationen für feste Schichttiefen s definiert werden, wobei jeweils eine maximale Abtragrate, eine minimale Oberflächenrauheit ($R_a \leq 1$) und geringe NC-Datenmengen angestrebt werden (Tabelle 7-8). Grundsätzlich nimmt die NC-Datenmenge mit höherem Hatch H ab. Die Parameterkombinationen und die sich daraus ergebenden greifbaren Kenngrößen werden in die Technologiedatenbank aufgenommen. Im Folgenden wird ausschließlich die Zick-Zack-Strategie eingesetzt.

Schichtparameter	Schichttiefe s [μm]	Abtragvolumenrate V_{Abtrag} [mm ³ /min]	Rauheit im Abtraggrund R_a [μm]	Pulsabstand S [%]	Hatch H [%]
P1	1,5	0,323	0,62	37,5	62,5
P2	2	0,616	0,67	50	62,5
P3	2,5	0,572	0,61	50	50
P4	3	0,5	0,64	50	37,5
P5	3,5	0,46	0,58	37,5	37,5
P6	5	0,432	0,74	37,5	25
P7	7	0,41	1,02	25	25

$I_A = 30$ A, $f_p = 40$ kHz; $Z_{\text{Ref}} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45$ μm; gemittelte Ergebnisse; $V_{\text{Jump}} = V_f$

Tabelle 7-8: Parameterkombinationen für optimierten Schichtabtrag mit Zick-Zack-Strategie
Parameter sets for optimal layer ablation with zig-zac strategy

Stapelstrategie

Nachdem Bearbeitungsparameter für homogene Einzelschichtabträge mit reproduzierbaren Schichttiefen definiert wurden, muss eine geeignete Stapelstrategie zur Erzielung größerer Abtragtiefen gefunden werden. Dabei sollen möglichst eine konstante, minimale Oberflächenrauheit im Abtraggrund, steile Flanken und eine konstante Schichttiefe vorliegen. Bild 7-29 zeigt die hier möglichen Stapelstrategien in z' -Richtung. Im Gegensatz zur Stapelstrategie 2 weist Strategie 1 einen alternierenden Wechsel des Bahnorientierungswinkels um jeweils 90° bei jeder Schicht auf. Bei der Strategie 3 beträgt der alternierende Winkel dagegen 45° . Durch den Bahnorientierungswinkel soll eine Abtragvorzugsrichtung bzw. ein zeiliger oder welliger Abtrag vermieden werden. Der Wechsel des Bahnorientierungswinkels erhöht jedoch den Berechnungsaufwand im CAM-System. Bei der Herstellung von mehrschichtigen Abträgen erfolgt bei jeder Schicht eine z' -Zustellung um die gewählte Schichttiefe s .

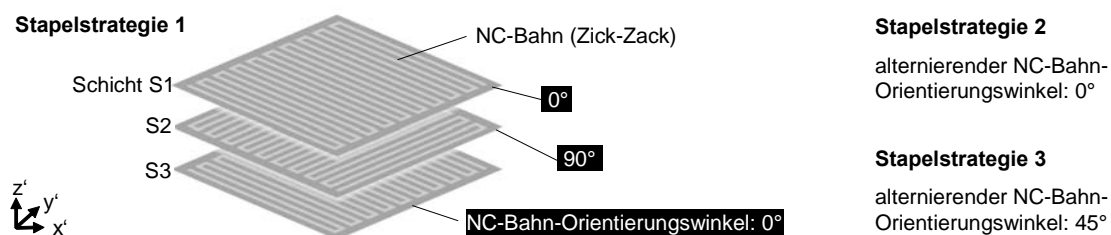
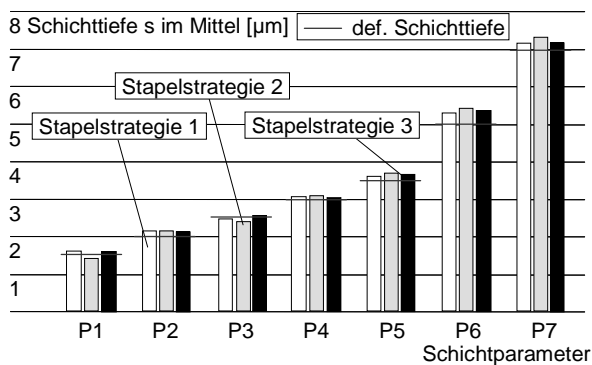


Bild 7-29: Stapelstrategien in z' -Richtung für multiplikativen Schichtabtrag
Stack strategies in z' -direction for multiplicative layer ablation

Bild 7-30 zeigt die gemessene, über alle Schichtwiederholungen gemittelte Schichttiefe s für die verschiedenen Schichtparameter entsprechend den jeweiligen Stapelstrategien. Je nach definierter Schichttiefe liegen bis zu 100 Schichtwiederholungen vor (P1). Über alle Schichtparameter gemittelt weist Stapelstrategie 1 eine Abweichung der Schichttiefen von nur +3,24 % gegenüber den zuvor definierten Schichttiefen auf. Strategie 3 besitzt eine nahezu vergleichbare Abweichung von +3,37 %, Strategie 2 weist dagegen eine deutlich vergrößerte Abweichung von +5,29 % auf. In diesem Zusammenhang zeigt Bild 7-31 die Abtragtiefen für die einzelnen Schichtparameter und Schichtwiederholungen bei der Verwendung der Stapelstrategie 1. Dabei wird der nahezu lineare Verlauf der Abtragtiefe über die Schichtanzahl deutlich, so dass bei allen Schichtparametern von einer konstanten Schichtmultiplikation ausgegangen werden kann. Der übermäßige Abtrag kann durch eine entsprechende Reduzierung der Schichtanzahl nahezu kompensiert werden. Die Abtragergebnisse unterstreichen den optimierten Sublimationsabtrag durch die gewählten Prozessparameter.



$I_A = 30$ A, $f_P = 40$ kHz; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ μm; gemittelte Ergebnisse; $v_{Jump} = v_f$

Bild 7-30: Schichttiefe s im Mittel je nach Schichtparameter P_x

Average layer depth s depending on the layer parameter P_x

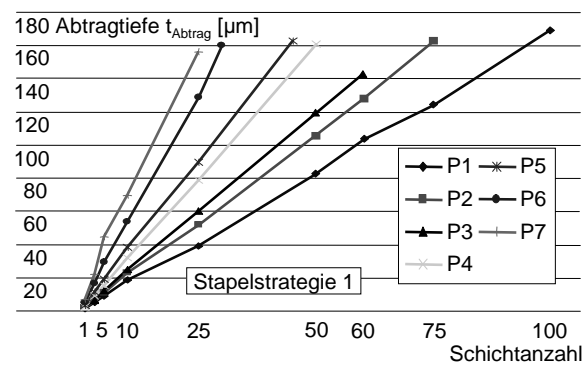
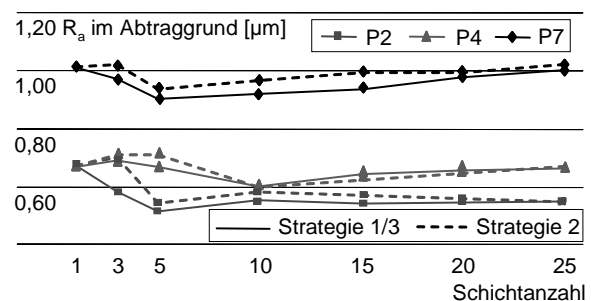
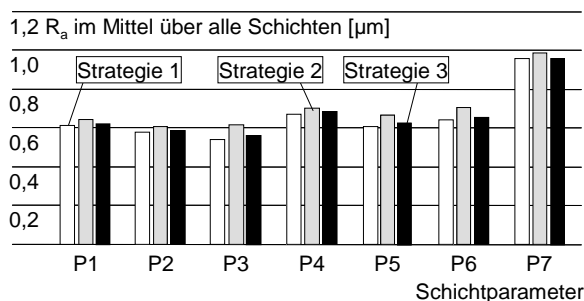


Bild 7-31: Abtragtiefe t_{Abtrag} bei variiertem Schichtanzahl

Ablation depth t_{Abtrag} with varied number of layers

Im Mittel über alle Schichten ist die Rauheit R_a nahezu unverändert im Vergleich zu den zuvor definierten Einzelschicht-Rauheiten (Bild 7-32, links). Dieses bedeutet, dass im untersuchten Tiefenbereich kaum eine Verschlechterung der Oberflächenrauheit durch eine Schichtstapelung auftritt und die Abtraggenauigkeit über die Schichttiefe s konstant bleibt. Stapelstrategie 2 zeichnet sich, wie erwartet, durch leicht vergrößerte Rauheiten aus. Die Stapelstrategien 1 und 3 weisen geringere Rauheitswerte auf. In Bild 7-32 (rechts) wird anhand dreier Schichtparameter exemplarisch der Verlauf der Rauheit R_a im Abtraggrund je nach Schichtanzahl und Stapelstrategie verdeutlicht. Auftretende Unterschiede sind auf Messschwankungen zurückzuführen. Aufgrund der einfacheren NC-Datengenerierung wird jedoch die Strategie 1 bevorzugt.

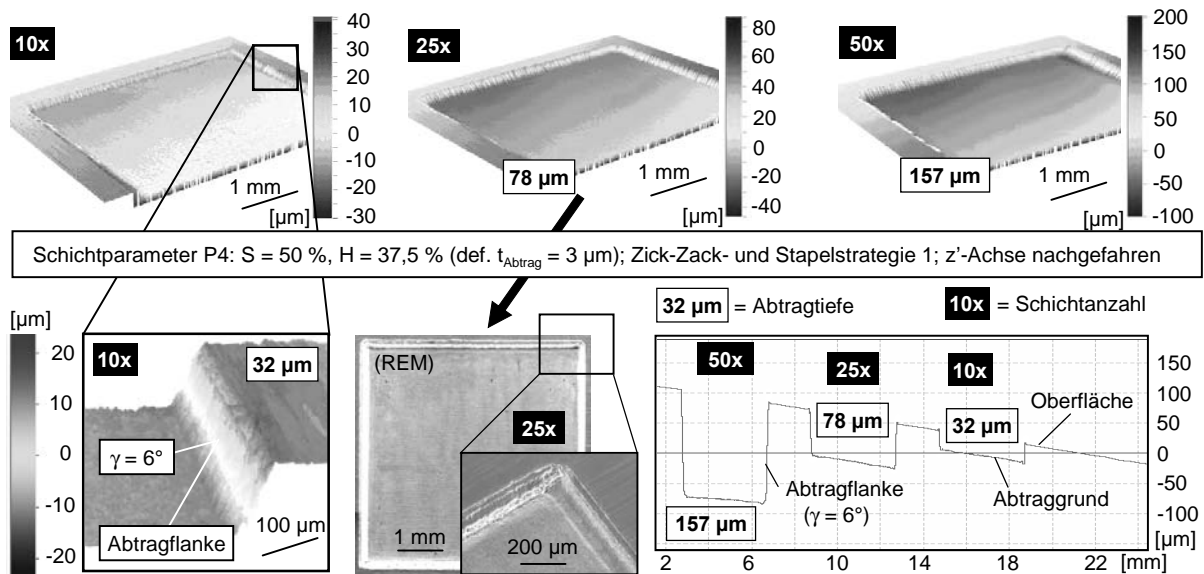


$I_A = 30$ A, $f_P = 40$ kHz; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ μm; gemittelte Ergebnisse; $v_{Jump} = v_f$

Bild 7-32: Rauheit R_a im Abtraggrund bei variiertem Schichtparameter P_x (links) sowie bei unterschiedlichen Schichtanzahlen und Stapelstrategien (rechts)

Roughness R_a of ablation ground with varied layer parameter P_x (left), varied number of layers and stack strategies (right)

Bild 7-33 zeigt die messtechnische Auswertung von einigen Quaderstrukturen, welche jeweils mit dem Schichtparameter 4 und einer Schichtanzahl von 10, 25 und 50 erzeugt wurden.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \text{ }\mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse; $v_{\text{Jump}} = v_f$

Bild 7-33: Vermessene Quaderstrukturen und Visualisierung des Flankenwinkels γ
Measured cubic structures and visualisation of the sidewall angle γ

Die Ergebnisse bestätigen die zuvor erarbeiteten Zusammenhänge und verdeutlichen die gleichmäßige Ausbildung des Strukturrands bei der Verwendung der Stapelstrategie 1. Bei zunehmender Schichtanzahl ist kein Schmelzrand mehr an der Bauteiloberfläche feststellbar. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich bei jeder neuen Schicht die Schmelze nur an der Abtragflanke im Abtraggrund und nicht auf der Oberfläche neben der Struktur ausbildet. Die Schmelze wird durch die nachfolgende Schicht zum Teil wieder vollständig entfernt. Aufgrund des vorliegenden Laserstrahlwinkels (hier ca. 4°) weitet sich die Struktur systembedingt mit zunehmender Schichtanzahl in Richtung der Bauteiloberfläche aus. Die sukzessive Ausweitung der Struktur begünstigt die Vermeidung von Schmelzrändern und erzeugt eine nicht senkrechte Abtragflanke, die beim nachfolgenden Spritzgießprozess als Entformungsschräge fungiert. Bei allen Abträgen beträgt der Flankenwinkel γ ca. 6° , der somit mit den zuvor spezifizierten Entformungsschrägen korreliert (vgl. Kapitel 2.2.2). Die systembedingte Strukturausweitung erfordert aber bei einer exakten Abbildung von Flankenwinkeln, insbesondere bei senkrechten Wänden, eine Anpassung der NC-Daten. So kann die Auswirkung des Strahlwinkels durch eine entsprechende Verkleinerung der Schichtabmessung kompensiert werden. Dies kann im CAM-System durch die Verwendung eines Fräswerkzeugs mit konischer Schneide und einer Plunge-Frässtrategie umgesetzt werden. Da im Normalfall jedoch stets Entformungsschrägen gefordert werden, können diese durch die zuvor beschriebene Besonderheit des Laserabtragprozesses sehr einfach umgesetzt werden.

Zu fertigender Winkelgrenzwert

Zur Übertragung der Parameter auf Regeloberflächen wird im Folgenden der Quaderabtrag an gewölbten Oberflächen näher untersucht. Mit dem zuvor bestimmten Winkelgrenzwert $\Delta\tilde{\eta}_{\text{Grenz}}$ kann nach Formel 7-13 und Formel 7-14 der innerhalb eines Segments minimal bearbeitbare Krümmungsradius $r_{\text{min,theo}}$ einer gewölbten Fläche theoretisch bestimmt werden. Dabei wird stets das maximale Scannerbearbeitungsvolumen V_s berücksichtigt. Bild 7-34 (Anhang A5) verdeutlicht die entsprechenden trigonometrischen Eingriffsverhältnisse im Segment. Der berechnete Krümmungsradius $r_{\text{min,theo}}$ beträgt 26,63 mm.

$$r_{\text{min,theo}} \geq \frac{l_s}{2 \cdot \sin(\Delta\tilde{\eta}_{\text{Grenz}})} = 26,63 \text{ mm} \quad \text{mit } \Delta\tilde{\eta}_{\text{Grenz}} = 28^\circ \quad \text{Formel 7-13}$$

$l_s \leq 25 \text{ mm}$

$$r_{\min, \text{theo}} \geq \frac{h_s - t_{\text{Abtrag, max}}}{1 - \cos(\Delta \tilde{\eta}_{\text{Grenz}})} = 18,8 \text{ mm}$$

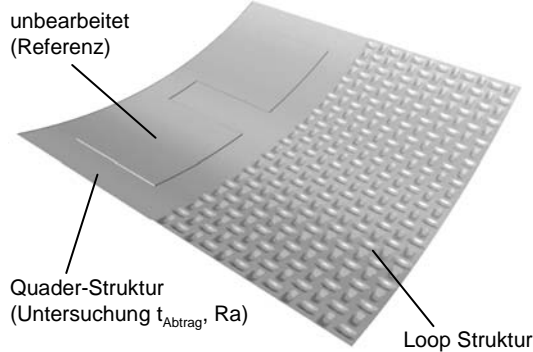
$$h_s \leq 2,4 \text{ mm}$$

$$t_{\text{Abtrag, max}} = 0,2 \text{ mm}$$

Formel 7-14

Der zuvor bestimmte Krümmungsradius $r_{\min, \text{theo}}$ muss nun anhand von Abtragversuchen bestätigt werden. Dazu werden konkav gewölbte Oberflächen ($\Delta \tilde{\eta} > 0^\circ$; Krümmungsradius: $20 \text{ mm} \leq r \leq 100 \text{ mm}$) bei maximaler Ausnutzung des Scannerbearbeitungsvolumens V_s strukturiert. Der real umsetzbare Krümmungsradius $r_{\min, \text{real}}$ wird durch eine Auswertung der Abträge hinsichtlich der erzielten Abtragtiefe und Oberflächenrauheit R_a bestimmt (Bild 7-35).

Teststruktur mit Krümmungsradius $r = 30 \text{ mm}$



Abmessung: $30 \times 30 \times 0,1 \text{ mm}^3$

$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ \text{C}$; Material 1.2767, gewölbte Oberflächen gefräst mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, Schichtparameter P3; z' -Level-Constant-Machining; $v_{\text{Jump}} = v_f$; Pumpstrom-Override

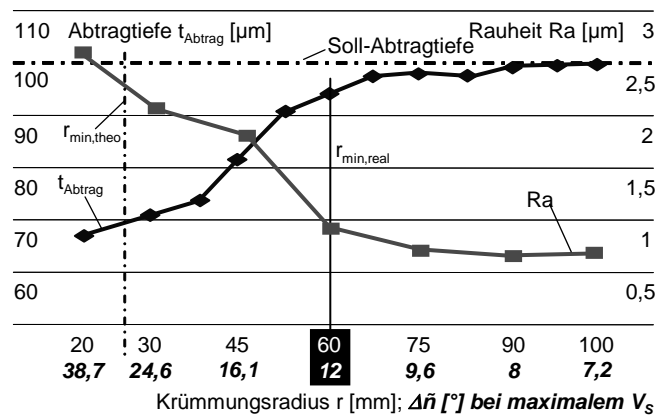


Bild 7-35: Bestimmung des realen Krümmungsradius $r_{\min, \text{real}}$ anhand von Abtragversuchen

Determination of the actual radius of curvature $r_{\min, \text{real}}$ through ablation tests

Bei Krümmungsradien r kleiner als 60 mm bzw. Winkeln $\Delta \tilde{\eta}$ kleiner als 12° ist eine deutliche Reduzierung der Abtragtiefe und eine starke Erhöhung der Rauheit zu beobachten. Dies ist auf einen inhomogenen Abtragprozess zurückzuführen. Aufgrund des verwendeten Schichtverlaufs (z' -Level-Constant-Machining) verringert sich bei zunehmendem Krümmungsradius der Bearbeitungsanteil des Lasers pro Schicht, so dass die Anzahl der zu vermeidenden Anfangs- und Endzustände des Laserabtrags zunimmt. Weiterhin wird der Abtraggrund nicht durch eine einzelne homogene Schicht sondern durch die Randbereiche der Schichten erzeugt. Die am Randbereich entstehenden Schmelzrückstände bestimmen somit die Rauheit R_a im Abtraggrund. Inwieweit die Schichtaufteilung Constant-Offset-to-Contour-Machining eine Prozessverbesserung hervorruft, muss gesondert untersucht werden (Kapitel 7-4). Nach Bild 7-35 kann $r_{\min, \text{real}}$ mit 60 mm festgelegt werden, so dass $\Delta \tilde{\eta}_{\text{Grenz}}$ für die Segmentierungsvorschrift von 28° auf 12° angepasst wird.

Bei der Herstellung von senkrechten Flanken in geneigten Bauteiloberflächen liegt aufgrund der Eingriffsverhältnisse des Laserstrahls ein nicht fertigbarer und zugleich nicht entformbarer Hinterschnitt vor. Die Problematik des Hinterschnitts muss bereits bei der Erstellung der Designstrukturen berücksichtigt werden. Um eine sichere Fertigung zu ermöglichen, müssen die Flankenwinkel der Strukturen γ mindestens so groß wie der entsprechende Winkel $\Delta \tilde{\eta}$ sein.

Zwischenfazit aus den Untersuchungen zum dreidimensionalen Schichtabtrag:

- Definierte Schichtparameter-Kombinationen (P_x) aus Pulsabstand S und Hatch H erzielen in Verbindung mit der Zick-Zack-Strategie geringste Oberflächenrauheiten R_a , größte Schichttiefen s , geringste Schmelzränder h_{Schmelz} sowie höchste Abtragraten V_{Abtrag} .
- Verwendung der Stapelstrategie 1 (Bahnorientierung um 90° alternierend), weil geringste Rauheiten R_a sowie Schmelzränder h_{Schmelz} vorliegen.
- Prozessbedingte Strukturaufweitung ($\gamma = 6^\circ$) dient als Entformungsschräge.
- Bei Freiformoberflächen können je nach Strukturform nicht fertigmache Hinterschnitte auftreten, so dass beim Strukturdesign stets die Bedingung $\gamma \geq \Delta \tilde{\eta}$ berücksichtigt werden muss.

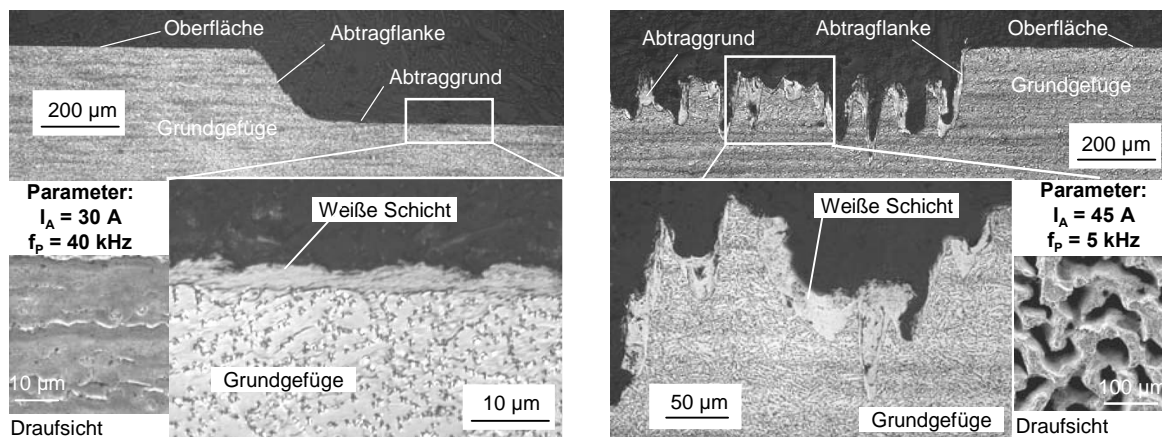
- Schichtverlauf Constant-Offset-to-Contour-Machining kann zu Prozessverbesserung bei nicht-ebenen Oberflächen führen.
- Für die Segmentierungsvorschrift beträgt der Winkelgrenzwert $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}} = 12^\circ$.
- Der innerhalb eines Segments (konkav oder konvex gekrümmt) minimal bearbeitbare Krümmungsradius $r_{\text{min,real}}$ einer Fläche beträgt 60 mm (V_S maximal).

7.3.4 Metallurgische Betrachtung der abgetragenen Oberflächenrandzone

Metallurgical investigation of the ablated edge zone of the surface

Die Standzeit von Spritzgießwerkzeugen wird u. a. durch die metallurgischen Eigenschaften der Oberflächenrandzone bestimmt. Eine Begutachtung des hier vorliegenden Laserabtrags hinsichtlich der Ausbildung der Randzone (WEZ) wird anhand metallographisch präparierter Abträge durchgeführt. Eine Präparation beinhaltet die Arbeitsschritte Trennen, Einbetten, Schleifen, Polieren und Gefügeätzen. Es sollen Aussagen über eventuelle Gefügeveränderungen in der oberflächennahen Abtragzone (z. B. Aufhärtung) erarbeitet werden.

Bild 7-36 zeigt Auflichtmikroskop-Aufnahmen quergeschliffener und geätzter Quaderabträge, wobei der prozesstechnologische Unterschied nur in der Wahl der genutzten Laserstrahlintensität besteht. Beim Quaderabtrag in Bild 7-36 (links) wurde mit dem Hauptbearbeitungsparameter ($I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$) gearbeitet, in Bild 7-36 (rechts) wurde, um den Einfluss der Laserstrahlintensität auf die Ausbildung von Gefügeveränderungen besser deutlich zu machen, mit einer Intensität über der Plasmaabschirmschwelle ($I_{\text{Abs}} > I_{\text{Schwell,V-A}}$) bzw. mit dem Referenzparameter ($I_A = 45 \text{ A}$, $f_P = 5 \text{ kHz}$) gefertigt.

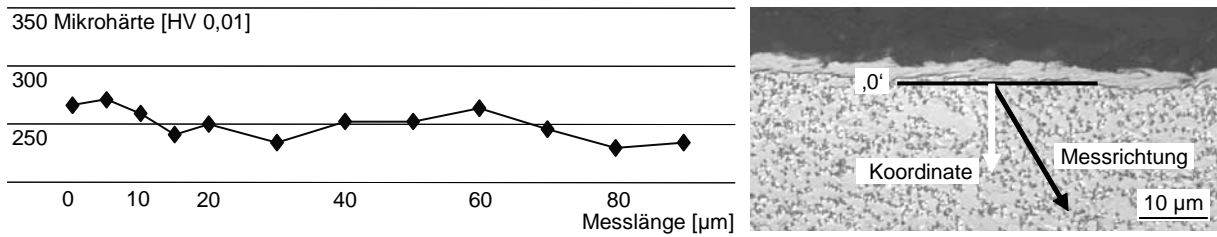


$Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; z' -Achse durch VarioScan nachgeführt; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, Schichtparameter P4; Schichtanzahl 50; $v_{\text{Jump}} = v_f$

Bild 7-36: Metallurgisch aufbereiteter Querschnitte von Quaderabträgen

Metallurgical cross sections of ablated cubic structures

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Abtrag durch den Hauptbearbeitungsparameter eine deutlich verbesserte Oberflächenrauheit und somit eine größere Formgenauigkeit als der Abtrag durch den Referenzparameter aufweist. Beim Hauptbearbeitungsparameter sind keine Risse oder andere Oberflächenbeeinflussungen zu erkennen. Beide Abträge weisen jedoch nicht den typischen Schichtverlauf in der oberflächennahen Randzone auf (vgl. Bild 2-20). Eine so genannte Weiße Oberflächenschicht ist bei beiden Abträgen vorhanden, aber eine thermisch bedingte Veränderung des Grundgefüges (Umwandlungszone (WEZ) mit veränderter Kristallstruktur) unterhalb der Weißen Schicht ist anhand der Gefügeausbildung nicht festzustellen. Dieses deckt sich mit der berechneten Ausdehnung der WEZ von $26,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}$. Es ist davon auszugehen, dass die in Bild 2-20 dargestellte Randzone durch eine deutlich längere Puls-Energieeinwirkzeit entstanden ist. In Bild 7-37 ist zur Absicherung dieser Beobachtung ein Mikrohärteverlauf (HV 0,01) dargestellt.



$I_A = 30 \text{ A}$; $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; z' -Achse durch VarioScan nachgeführt; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$; Stapelstrategie 1, Schichtanzahl 50; Schichtparameter P4; $V_{\text{Jump}} = V_f$

Bild 7-37: Mikrohärteverlauf (HV 0,01) in der Randzone eines Quaderabtrags

Microhardness gradient (HV 0.01) in the edge zone of an ablated cubic structure

Bei der durchgeführten Mikrohärtemessung nach Vickers wurde der Startpunkt der Messreihe (5 µm minimaler Messpunktabstand) zwischen Weißer Schicht und Grundgefüge gesetzt (vgl. Bild 7-37, rechts). Über die gesamte Messlänge liegt eine nahezu konstante Härte des Gefüges vor. Die fehlende Ausbreitung der Umwandlungszone ist auf die sehr kurze Energieeinbringung durch ns-Pulse zurückzuführen. Mittels einer zusätzlichen Martens-Härtemessung (HM 10 mN) konnte eine durchschnittliche Härte der Weißen Schicht von HM 6160 (bzw. 800 HV 0,1) bestimmt werden. Gemäß Literatur ist die beobachtete Weiße Schicht eine durch Temperaturwechselwirkungen entstandene Zone, die kristallin aus Martensit und Zementit aufgebaut ist und einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist. Es handelt sich dabei um aufgeschmolzenes und nach kurzer Zeit wieder erstarrtes Grundmaterial. Diese Zone entsteht auch beim Erodieren [nach Böhler AG], [SANCO6]. Im Gegensatz zu der beim Erodieren auftretenden Weißen Schicht (Dicken bis zu 0,2 mm) ist die hier auftretende Schicht deutlich dünner, weist keine Risse auf und liegt gleichmäßig und homogen im Abtraggrund vor.

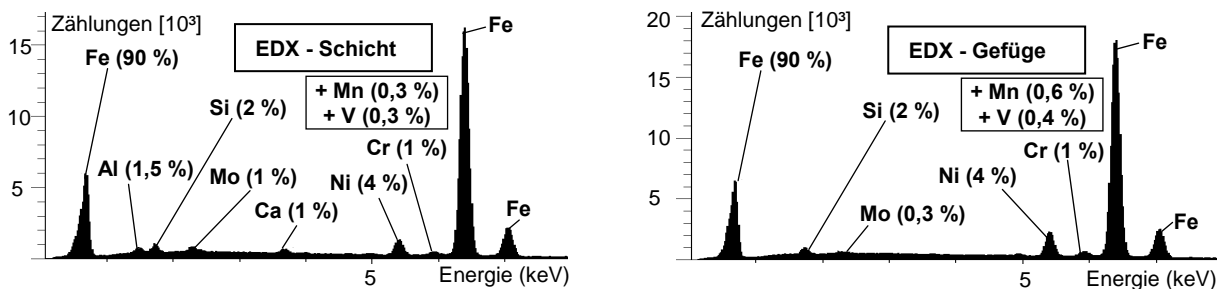
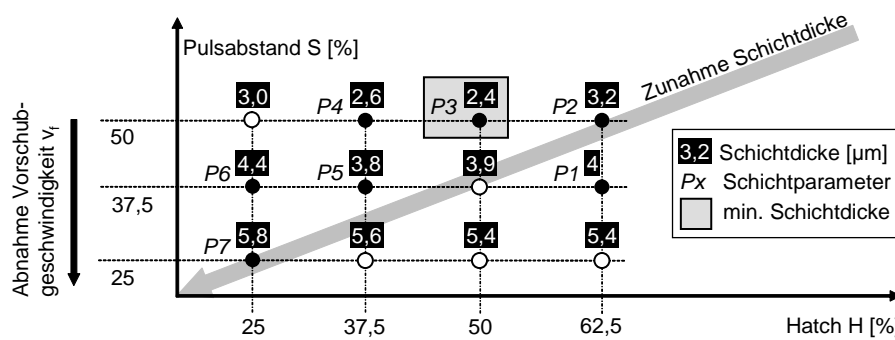


Bild 7-38: EDX-Analyse der Weißen Schicht (links) und des Grundgefüges – 1.2767 (rechts)

EDX-analysis of the white layer (left) and of the main texture – 1.2767 (right)

Bild 7-38 (links) zeigt eine EDX-Analyse der Weißen Schicht, wobei die Elemente Aluminium und Calcium aus dem Einbettmittel stammen. Im Vergleich zur EDX-Analyse des Grundgefüges (Bild 7-38, rechts) bzw. zur Richtanalyse des Werkstoffs (Tabelle 7-1, Anhang A10) liegen keine nennenswerten Unterschiede in der Massenverteilung der chemischen Elemente vor, so dass, wie erwartet, von einer werkstoffgleichen Schicht ausgegangen werden kann. Eine deutliche Zunahme des Sauerstoffanteils, wie es bei der Bearbeitung mit fs- und ps-Lasern beobachtet wurde [WEIK06, S. 74], kann hier nicht bestätigt werden. Daher handelt es sich hier nicht um ein Oxid. Eine Bearbeitung unter unterschiedlichen Schutzgasatmosphären (Ar, He) ergab zudem keine Veränderungen hinsichtlich der Ausprägung der Weißen Schicht.

Die Ausbildung der Weißen Oberflächenschicht wird nicht durch die Anzahl der verwendeten Abtragschichten beeinflusst, was durch Versuche nachgewiesen werden konnte. Da bei den Einzelpulsabträgen auch eine Weiße Schicht im Abtraggrund zu beobachten ist, kann davon ausgegangen werden, dass eine solche Schicht bei jeder Abtragschicht erzeugt und von der darauf folgenden wieder entfernt wird. Aufgrund der kurzen Pulslängen und Pulswiederholraten ist eine nähere Untersuchung des Entstehungsprozesses z. B. mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera hier nicht möglich.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; Arbeitsabstand $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; ebene Oberfläche; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767 ($R_a = 0,45 \text{ µm}$), $v_{\text{Jump}} = v_f$

Bild 7-39: Abhängigkeit der Dicke der Weißen Schicht vom Pulsabstand S und vom Hatch H

Thickness of the white layer depending on the pulse distance S and the hatch H

Bild 7-39 gibt eine Übersicht über die maximale Dicke der Weißen Oberflächenschicht bei den in Kapitel 7.3.3 definierten Schichtparametern P_x in Kombination mit dem Hauptbearbeitungsparameter. Bei den Versuchen wurde jeweils die entsprechende, aufgerundete ganzzahlige Schichtanzahl zur Erzielung einer Abtragtiefe von 50 µm verwendet. Dabei wird ersichtlich, dass die Dicke der Weißen Schicht sich mit zunehmendem Pulsabstand S/Vorschubgeschwindigkeit v_f und mit zunehmendem Hatch H vermindert.

Da die Weiße Schicht weder geätzt, nitriert noch beschichtet werden kann, wird üblicherweise die beim Erodieren erzeugte Weiße Schicht von der Spritzgießwerkzeugoberfläche mechanisch, z. B. durch Mikrostrahlen, entfernt. Da jedoch Strahlverfahren die Oberflächenrauheit und die Strukturform verändern sowie unstrukturierte Bauteilbereiche beschädigen, wird bei den in Kapitel 8 durchgeführten Abformungen die Weiße Schicht nicht entfernt.

Zwischenfazit aus den metallurgischen Betrachtungen des Abtrags (Material: 1.2767):

- Eine Umwandlungszone, Risse oder andere Oberflächenbeeinflussungen sind in der oberflächennahen Randzone des Grundgefüges nicht feststellbar.
- Auf dem Abtraggrund bildet sich stets eine homogene Oberflächenschicht mit konstanter Dicke aus. Diese wird in Analogie zum Erodieren als Weiße Schicht bezeichnet und weist einen kristallinen Aufbau aus Martensit und Zementit auf.
- Die minimalste Dicke der Weißen Schicht liegt beim Schichtparameter P3 mit $2,4 \text{ µm}$ vor.
- Mit zunehmendem Pulsabstand S bzw. Vorschubgeschwindigkeit v_f und mit zunehmendem Hatch H vermindert sich die Dicke der Weißen Schicht.

7.3.5 Definierte Laser-Tools in Prozess- und Technologiedatenbank

Defined laser tools in the process and technology data bank

Die erarbeiteten Bearbeitungsparameter werden in Form von Laser-Tools in der XML-basierten Prozess- und Technologiedatenbank abgelegt, so dass diese für die NC-Bahngenerierung im CAM-System oder die Segmentierung verfügbar sind. Neben den notwendigen, direkten Steuerungsparametern für das Lasermodul, wie Pumpstrom I_A , Pulsfrequenz f_P und Vorschubgeschwindigkeit v_f , enthalten die einzelnen Laser-Tools auch indirekte Parameter wie Abtragrate V_{Abtrag} , Rauheit R_a im Abtraggrund und Schichttiefe s . Bild 7-40 zeigt exemplarisch sowohl die direkten als auch die indirekten Parameter zweier Laser-Tools (T1 und T4) in der XML-Datenbank.

Parameter	Value
Laser-Tool T1	
direkte Parameter	
tool_nr	1
material	1.2767
frequency	40000.0
pumping_electricity	30.0
voltage	6.06
pulse_length	16,94
focus_diameter	19,4
dz_compensation	-0,1
jumpspeed	297
markspeed	297
pulse_overlap	37,5
hatch	62,5
layer_distance	12,5
layer_removal_depth	1,5
roughness	0,62
material_removal_rate	0,323
indirekte Parameter	
exttool	
exttool	
exttool	
exttool	
exttool	
exttool	
Laser-Tool T4	
direkte Parameter	
tool_nr	4
material	1.2767
frequency	40000.0
pumping_electricity	30.0
voltage	6.06
pulse_length	16,94
focus_diameter	19,4
dz_compensation	-0,1
jumpspeed	396
markspeed	396
pulse_overlap	50
hatch	37,5
layer_distance	7,5
layer_removal_depth	3
roughness	0,64
material_removal_rate	0,5
indirekte Parameter	
exttool	
exttool	
exttool	

Bild 7-40: Laser-Tools in der Prozess- und Technologiedatenbank

Laser tools in the process and technology data bank

7.4 Übertragung der Bearbeitungsparameter auf großflächige Oberflächen

Transmission of the process parameters onto wide surfaces

Die erarbeiteten Parameter und Strategien werden zur großflächigen Bearbeitung von ebenen und gewölbten Oberflächen genutzt. Dabei sollen deren Einfluss auf die Abbildungsgenauigkeit des Prozesses untersucht und gegebenenfalls Optimierungen vorgenommen werden. Ein weiterer Schwerpunkt des Kapitels ist die nahtlose Multiplikation unterschiedlicher Strukturklassen auf Oberflächen. Prozessbedingte Abtragrückstände werden bereits auf ein Minimum reduziert. Anhand einer Untersuchung der Oberfläche direkt nach der Laserbearbeitung sollen dennoch auftretende Abtragrückstände identifiziert werden. Es werden geeignete industriell einsetzbare Methodiken zu deren Entfernung erarbeitet und bewertet.

7.4.1 Komplexe 3D-Strukturen aus Einzelschichten: Abbildungsgenauigkeit

Complex 3D structures consisting of single layers: form accuracy

Unter Abbildungsgenauigkeit wird hier die Formabweichung zwischen Werkzeug- und CAD-Struktur verstanden. Diese lässt sich geometrisch beschreiben und zur analytischen Betrachtung messtechnisch erfassen und wird sowohl durch das CAM-System als auch durch das Lasermodul beeinflusst. Die wesentlichen Stellgrößen verdeutlicht Bild 7-41.

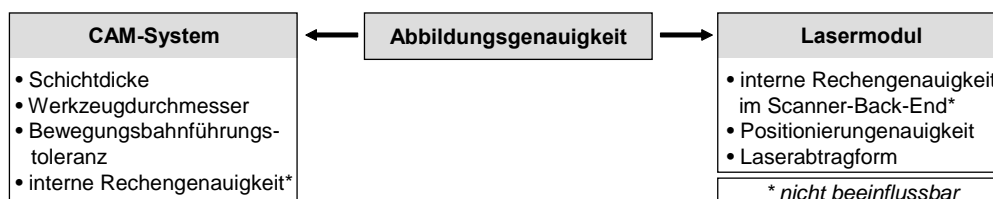


Bild 7-41: Einflüsse auf die Abbildungsgenauigkeit des Laserabtrags

Influences on the form accuracy of the laser ablation process

Im CAM-System wird die strukturierte Bauteiloberfläche gemäß der verwendeten Schichtverlaufsstrategie in einzelne, voneinander getrennte und mit einer definierten Dicke versehene Abtragschichten unterteilt – das so genannte Slicen (vgl. Kapitel 6.3.3). Durch diese datentechnische Aufbereitung erfolgt nur eine Annäherung an die reale Strukturform. Die geometrischen Formabweichungen werden dabei von der verwendeten Schichtdicke, dem Fokussdurchmesser, der Bewegungsbahnführungstoleranz und der internen Systemrechengenauigkeit bestimmt. Durch die fest definierte Schichtdicke bildet sich bei nicht senkrechten Flanken ein so genannter Treppenstufeneffekt aus, der zu einer Verkleinerung der Struktur (Untermaß) führt. Über die verwendete Schichtdicke besteht somit eine Einflussmöglichkeit auf die Ausbildung des Treppenstufeneffekts. Dieser Effekt wird anhand der regelmäßigen Teststruktur (Loop-Struktur der Klasse II) in Bild 7-42 theoretisch verdeutlicht.

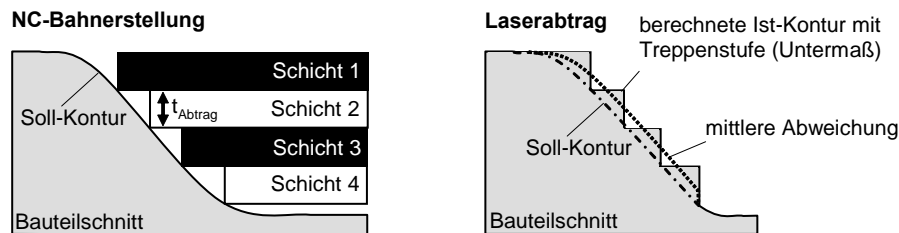
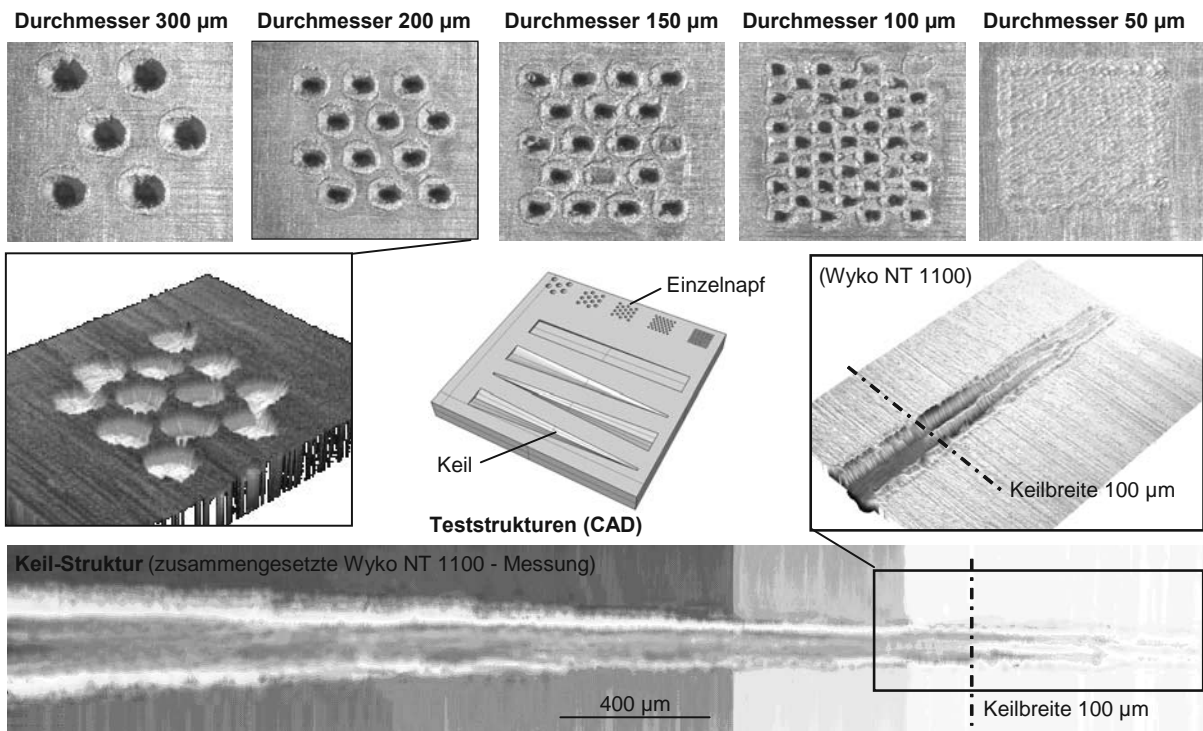


Bild 7-42: Strukturabbildung durch einzelne Schichten – Treppenstufeneffekt

Structure mapping with single layers – step effect

Die Bewegungsbahnführungstoleranz (vgl. Bild 7-41) gibt die maximal zulässige Abweichung bei der Berechnung der NC-Bewegungsbahn in Bezug zur Sollkontur an. Geringe Toleranzen erhöhen die Abbildungsgenauigkeit, führen aber auch zu deutlich höheren Rechenaufwänden im CAM-System. Bei den hier verwendeten Strukturfeldabmessungen ist eine Toleranz von $5\ \mu\text{m}$ mit einem noch vertretbaren Rechenaufwand umsetzbar. Die interne Rechengenauigkeit des CAM-Systems ist nicht beeinflussbar. Für die Schichtaufteilung wurde ein mittlerer Berechnungsfehler von $0,001\ \mu\text{m}$ pro Schicht bestimmt. Mit kleinerem Werkzeugdurchmesser nimmt die Formgenauigkeit im Allgemeinen zu, er bewirkt jedoch auch einen höheren Rechenaufwand. Hier wird mit einem Werkzeugdurchmesser von $19,4\ \mu\text{m}$ (d_f des Hauptbearbeitungsparameters) gearbeitet. Insbesondere konkave Strukturdetails, deren Abmessungen kleiner als $20\ \mu\text{m}$ sind, können daher nicht mehr vollständig durch NC-Bahnen abgebildet werden. Anhand von Untersuchungen mit speziellen Teststrukturen muss die minimal umsetzbare NC-Bahnlänge bestimmt werden, wodurch Rückschlüsse auf die reale Strukturauflösung des Prozesses gezogen werden können. Falls diese bei der vorgelagerten Strukturentwicklung berücksichtigt werden, sind hohe Abbildungsgenauigkeiten zu erwarten.

Im CAM-System wurden Bearbeitungsbahnen zur Herstellung von Einzelnapfchen mit unterschiedlichen Durchmessern ($20, 40, 100, 150$ und $200\ \mu\text{m}$) und von sich verjüngenden Keilen erzeugt. Anhand der Keile kann die minimale NC-Bahnlänge in der x' - y' -Ebene sehr genau bestimmt werden, da eine nahezu stufenlose Verkleinerung erfolgt. Bild 7-43 verdeutlicht, dass ab einer NC-Bahnlänge von $100\ \mu\text{m}$ keine homogene Strukturabbildung mehr vorliegt. Diese Limitierung wird durch die Abbildungsqualität der Einzelnapfchen verstärkt. Es wird eine maximale Strukturauflösung der Prozesskette von $100\ \mu\text{m}$ abgeleitet.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$; Stapelstrategie 1; $V_{\text{Jump}} = v_f$; Schichtparameter P4

Bild 7-43: Umsetzbare Strukturauflösung bei verschiedenen Strukturformen

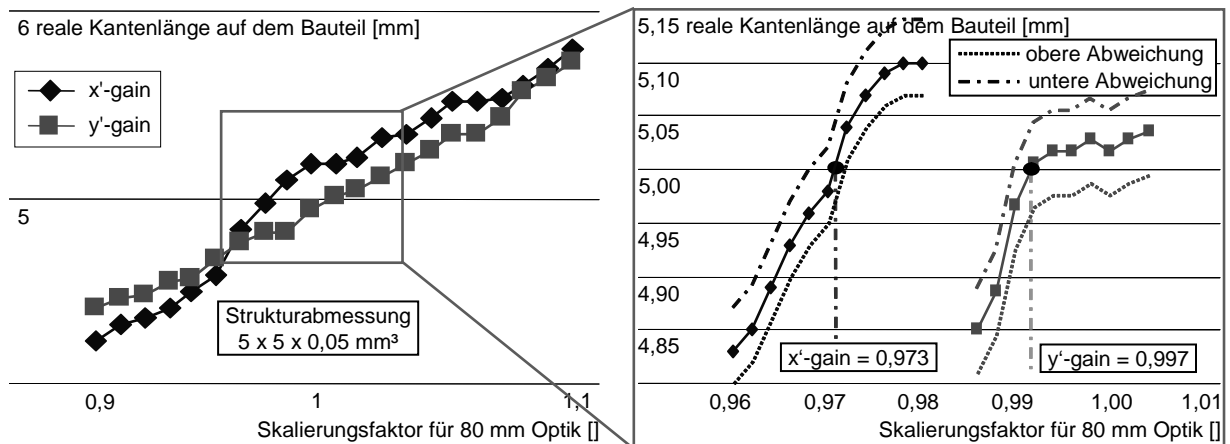
Realisable structure resolution of different structure forms

Hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit sind beim Lasermodul im Wesentlichen das Scanner-Back-End, der 3-Achs-Scanner und der Laserabtrag als solches zu betrachten.

Im Scanner-Back-End erfolgt die Übertragung von ISO-NC- in RTC3-Wegbefehle, so dass die interne Rechengenauigkeit des Scanner-Back-Ends letztendlich die Genauigkeit der Bahnführung bestimmt. Weiterhin werden Kompensationsberechnungen für eine x' -Achsen-Rotation (vgl. Formel 6-4) und eine Drehung des Scannerkoordinatensystems um die z' -Achse durchgeführt. Das Scanner-Back-End weist eine doppelte 32-bit-Rechengenauigkeit auf, so dass keine prozessrelevanten Ungenauigkeiten auftreten. Der 3-Achs-Scanner, bestehend aus HurryScan 25 und VarioScan 40, weist vor allem statische und dynamische Achsungenauigkeiten sowie durch Temperaturveränderungen hervorgerufene, dynamisch bedingte Positionierungenauigkeiten auf (Bild 5-2, Anhang A1). Hinsichtlich der statischen Achsfehler wird die Achs-Orthogonalität im Scanner-Back-End durch eine x' -Achsen-Verzerrung auf ein Minimum reduziert. Dynamische Achsfehler können dagegen nicht unterbunden werden. Temperaturbedingte Abweichungen können nur durch eine konstante Systemkühlung auf ein Minimum reduziert werden. Es kann somit kein fest definierter, aus statischer und dynamischer Positionierungenauigkeit kumulierter, allgemeiner Abbildungsfehler bestimmt werden. Aus der Positionierungenauigkeit und der dynamischen Wiederholungenauigkeit lässt sich jedoch näherungsweise ein maximaler theoretischer Positionierfehler von ca. 100 µm jeweils für die x' - und die y' - Achse bei maximaler Scannerspiegelauslenkung im Segmentfeld bestimmen. In Kapitel 5.2.1 wurde durch eine Anpassung der gain-Faktoren, welche eine Skalierung der einzelnen Achswerte bewirken, die systembedingte Verzeichnung kalibriert. Dabei wurde jedoch noch nicht die Scanner-Back-End-Umgebung genutzt. Im CAM-System wird die Form des Laserstrahlabtrags bzw. des Laserstrahls durch einen Kugelkopffräser beschrieben, so dass gemäß der realen Form des Laserabtrags (Paraboloid) eine Abweichung vorliegt. Diese muss insbesondere am Bahnanfang und -ende berücksichtigt werden, da dort im Gegensatz zur Fräsbearbeitung ein veränderter Abtrag vorliegt und somit Formungenauigkeiten auftreten können.

Aus der vorherigen Betrachtung lassen sich zwei Ansatzpunkte zur Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit bzw. zur Kompensation der systembedingten Fehler im CAM-System und Lasermodul erarbeiten. Aufgrund der schichtbasierten Bearbeitung ist dabei eine getrennte Betrachtung der Abbildungsgenauigkeit in der x' - y' -Ebene und entlang der z' -Achse erforderlich (Superposition):

- Durch eine Optimierung der gain-Faktoren können komplexe Formabweichungen, hervorgerufen durch Rechenfehler im CAM-System und im Scanner-Back-End sowie durch statische und dynamische Positioniergenauigkeiten, auf ein Minimum reduziert werden. Anhand spezieller Teststrukturen werden die gain-Faktoren solange verändert, bis die Formabweichungen in der x' - y' -Ebene minimiert sind. Die Teststrukturen weisen senkrechte Flanken auf (Abtragquader mit $5 \times 5 \times 0,05 \text{ mm}^3$), um mögliche Überlagerungen des Treppenstufeneffekts auszuschließen. Da es sich hier zum Teil um dynamische Einflussgrößen handelt, müssen die gain-Faktoren über mehrere Versuche gemittelt werden. Bild 7-44 zeigt die gemessene Kantenlänge bei variierten x' - und y' -gain-Faktoren. Bei einem x' -gain-Faktor von 0,973 ist eine minimierte Strukturskalierung von +0,24 % festzustellen, diese Größenordnung ($12 \text{ } \mu\text{m}$) liegt in der Messunsicherheit der Messmittel. Bei dem optimierten y' -gain-Faktor (0,997) beträgt die Strukturskalierung nur noch +0,2 %. Durch die Verwendung dieser gain-Faktoren können die zuvor beschriebenen Einflussfaktoren auf die Abbildungsgenauigkeit in der x' - y' -Ebene kompensiert werden. Positionierabweichungen entlang der z' -Achse (VarioScan) wurden bereits in Kapitel 5.2.1 durch einen entsprechenden gain-Faktor, der durch den Einsatz einer geeigneten Messtechnik bestimmt wurde, auf ein Minimum reduziert. Auftretende Rechenfehler im CAM und im Scanner-Back-End hinsichtlich der z' -Achse können daher direkt mit dem bestehenden gain-Faktor der z' -Achse verrechnet werden. Der dimensionslose z' -gain-Wert wird von 0,999 auf 1,001 angepasst.

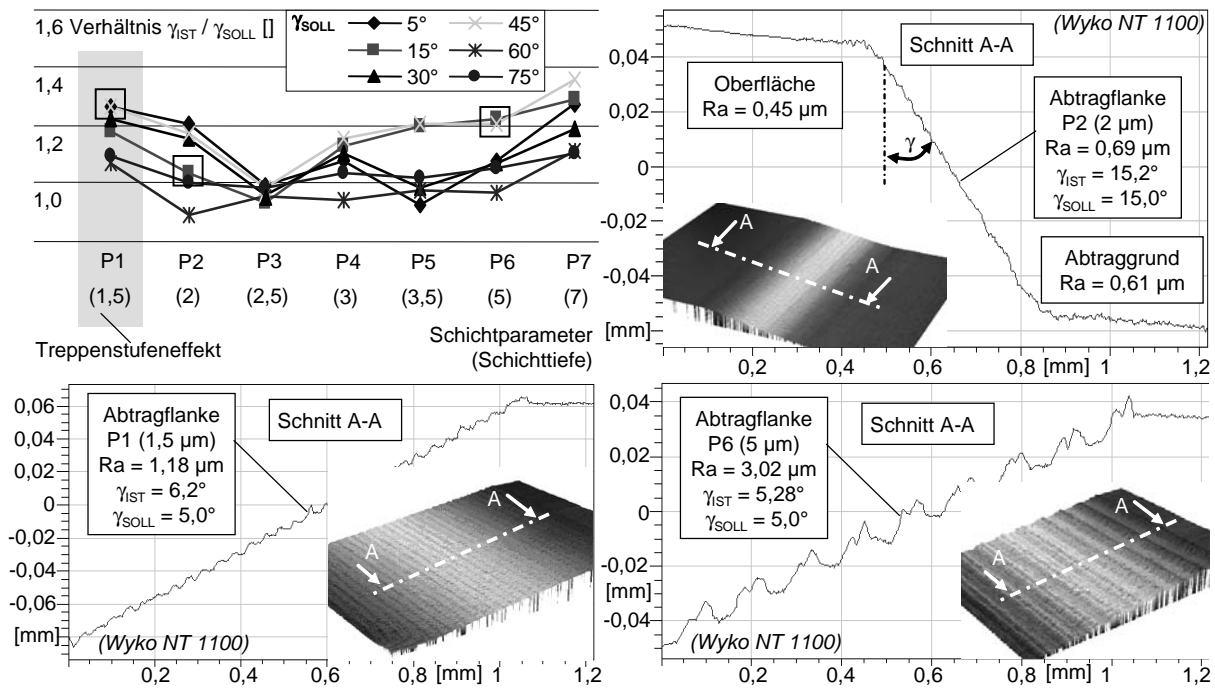


$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ } \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, gemittelte Ergebnisse aus 5 Versuchen; $v_{\text{Jump}} = v_f$; Schichtparameter P4

Bild 7-44: Einfluss der x' - y' -gain-Faktoren auf die Abbildungsgenauigkeit in der x' - y' -Ebene
Influence of the x' - y' -gain values on the form accuracy in the x' - y' -plane

- Die Abbildungsgenauigkeit entlang der z' -Achse wird im Wesentlichen durch die Ausprägung des Treppenstufeneffekts bestimmt. Daher kann über die verwendete Schichtdicke eine direkte Beeinflussung erfolgen.

Im Folgenden wird der Einfluss der Schichtdicke auf die Ausbildung des Treppenstufeneffekts untersucht. Dabei werden Strukturen mit variierten Flankenwinkeln genutzt, wobei jeweils die für die Schichtparameter P_x entsprechende, aufgerundete ganzzahlige Schichtanzahl für die Erzielung einer Abtragtiefe von $100 \text{ } \mu\text{m}$ verwendet werden. Es wird stets mit den zuvor bestimmten x' - y' -gain-Faktoren gearbeitet, so dass die mittlere Geometrieabweichung bei den Abträgen minimiert ist und sich entsprechend der Winkelabweichung verhält.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_P = 40 \text{ kHz}$; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, gemittelte Ergebnisse aus 5 Versuchen; $v_{\text{Jump}} = v_f$

Bild 7-45: Abhängigkeit zwischen verwendeter Schichtdicke (Schichtparameter P_x) und variiertem Abtragflankenwinkel γ ; Ausbildung des Treppenstufeneffekts

Dependency between the used layer thickness (layer parameter P_x) and the varied sidewall angle γ ; formation of the step effect

Strukturflanken mit einem Winkel von $\gamma = 5^\circ$ weisen stets eine deutliche Ausbildung von Treppenstufen auf, welche sich jedoch bei der Verwendung von geringeren Schichtdicken verkleinern. So ist die Rauheit R_a auf der Flanke beim Schichtparameter P1 mit $1,18 \mu\text{m}$ (Bild 7-45, unten links) deutlich reduziert gegenüber dem Schichtparameter P6 mit $3,02 \mu\text{m}$ (Bild 7-45, unten rechts). Bei vergrößerten Flankenwinkeln sind keine Treppenstufen mehr feststellbar, dies ist vor allem auf den höheren Überdeckungsgrad der einzelnen Schichten zurückzuführen (Bild 7-45, oben rechts). Hinsichtlich der untersuchten Flankenwinkel γ weist der Schichtparameter P3 (Schichtdicke $2,5 \mu\text{m}$) die geringsten Abweichungen zum Soll-Winkel auf, im Mittel beträgt diese -4% . Eine Erhöhung sowie eine Verringerung der Schichtdicke führt zu größeren Winkelabweichungen, so dass der Schichtparameter P3 das Optimum darstellt.

Bei nicht-ebenen Oberflächen kann der Schichtverlauf gemäß Kapitel 6.3.3 sowohl als z' -Level-constant- als auch als Constant-Offset-to-Contour-Machining ausgeführt werden. Bei einer Fräsbearbeitung können mit dem Constant-Offset-to-Contour-Machining meist bessere Oberflächengüten erzielt werden. Dies ist auf die fehlende Ausbildung des Treppenstufeneffekts zurückzuführen. Aufgrund der im Folgenden beschriebenen Problematiken kann diese Strategie jedoch hier nicht angewendet werden. Die NC-Bahngenerierung für das Constant-Offset-to-Contour-Machining basiert stets auf einer schichtweisen Multiplikation der Endkontur. Dabei erfolgt keine Verwendung eines Stockmodells, wie es beim z' -Level-Constant-Machining üblich ist. Deshalb werden auch NC-Bahnen in Bereichen ohne nötigen Materialabtrag generiert, so genannte Luftschnitte. Beim Fräsen führt ein Luftschnitt aufgrund des systembedingten Aufmaßes zu keinerlei Abtrag bzw. Beeinflussungen der Oberflächenqualität. Im Gegensatz dazu liegt stets eine Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Oberfläche vor, auch wenn der Laser sich nicht im Fokus befindet, sondern defokussiert über die Oberfläche geführt wird. Dies hat zur Folge, dass auch bei Luftschnitten stets ein unerwünschter Materialabtrag erfolgt. Über aufwändige Berechnungsalgorithmen können im NC-Profilierer grundsätzlich die nicht erwünschten Luftschnittanteile über eine z' -Koordinaten-Begrenzung unterbunden werden. Da jedoch keine Weginformationen zur Verbindung der neuen NC-Befehle vorliegen, ist das Constant-Offset-to-Contour-Machining bei der Laserbearbeitung nicht umsetzbar. Eine

manuelle Aufbereitung der NC-Daten widerspricht der hier verfolgten Datendurchgängigkeit. Es müssen demnach Neuentwicklungen im Bereich der Bewegungsbahnführung im CAM-System erfolgen, wobei eine Kombination aus den Berechnungsalgorithmen der beiden betrachteten Schichtverläufe nötig ist.

Bei der Schichtaufteilung Constant-Offset-to-Contour-Machining erfolgt eine simultane 3D-Bewegung. Die gewählte Vorschubgeschwindigkeit v_f liegt daher entlang der Kontur vor und setzt sich somit als Vektorsumme aus der Scanner- und der Positioniergeschwindigkeit des VarioScans zusammen. Dies bedeutet, dass alle drei optischen Achsen vergleichbare maximale Beschleunigungs- und Verfahrgeschwindigkeiten aufweisen müssen. Unter bestimmten geometrischen Umständen muss sogar die z' -Achse schneller als die beiden Scannerachsen (x' , y') sein. In Verbindung mit der telezentrischen F-Theta-Optik weist der VarioScan eine maximale Positioniergeschwindigkeit von 80 mm/s und einen Schleppverzug von bis zu 1 ms auf. Dies schränkt die bearbeitbaren Geometrieformen erheblich ein. Aus der jeweiligen Geschwindigkeitsvektorbeziehung lässt sich somit für alle erarbeiteten Schichtparameter P_x ein maximal herstellbarer, theoretischer Geometriewinkel beim Constant-Offset-to-Contour-Machining berechnen, dieser beträgt $11,7^\circ$ für die Schichtparameter P2, P3, P4, $15,6^\circ$ für P1, P5, P6 und $23,8^\circ$ für P7. Bei einer Positioniergeschwindigkeit von 400 mm/s (vgl. P3) führt der Schleppverzug von 1 ms dazu, dass in den ersten 400 μm der Bahnführung keine genaue Bewegungsführung in z' -Richtung vorliegt. Insbesondere kleine Strukturen sind durch kurze NC-Bahnen gekennzeichnet, so dass dort hohe Abtragungsgenauigkeiten zu erwarten sind.

Zwischenfazit aus den Versuchen zur Abbildungsgenauigkeit:

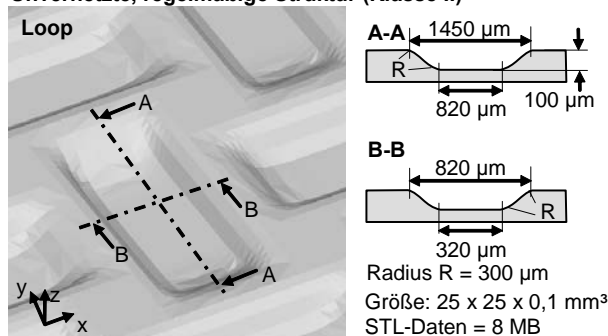
- Die maximale Strukturauflösung der Prozesskette beträgt 100 μm .
- Die maximale Abbildungsgenauigkeit beträgt bei x' -gain = 0,9728, bei y' -gain = 0,997 und bei z' -gain = 1,001, wobei die Formabweichung kleiner als + 0,22 % ist.
- Beim Schichtparameter P3 liegen die geringste Flankenwinkelabweichung entlang der z' -Achse mit -4 %, die zweithöchste Abtragrate und geringe Oberflächenrauheiten im Abtraggrund vor, so dass der Schichtparameter P3 das Parameteroptimum darstellt.
- Constant-to-Contour-Machining kann aufgrund fehlender CAM-Strategien und unzureichender Leistungsfähigkeit des VarioScans nicht eingesetzt werden.

7.4.2 Strukturkachelung auf ebenen und gewölbten Oberflächen

Tiling of structure on plane and curved surfaces

Zur Strukturmultiplikation werden im Wesentlichen eine unvernetzte, regelmäßige Struktur der Klasse II (Bild 7-46, links) sowie eine vernetzte, unregelmäßige Leder-Struktur der Klasse III (Bild 7-46, rechts) verwendet. Die Form der Strukturen deckt sich mit den bestehenden Anforderungen der Designer hinsichtlich Gestalt und Abmessung. Die Loop-Struktur ermöglicht aufgrund ihrer genau spezifizierten Abmessung eine messtechnische Überprüfung der Abtragergebnisse und somit eine gesicherte Prozesskontrolle, was bei unregelmäßigen Strukturen kaum möglich ist. Die Leder-Strukturen eignen sich dagegen besonders für die Erarbeitung der Multiplikation, da jegliche Bearbeitungsfehler direkt als Nahtstellen sichtbar werden.

Unvernetzte, regelmäßige Struktur (Klasse II)



Vernetzte, unregelmäßige Struktur (Klasse III)

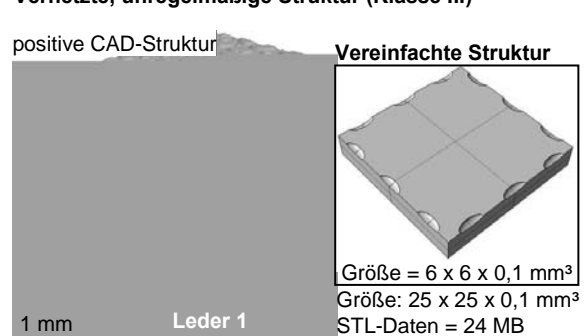
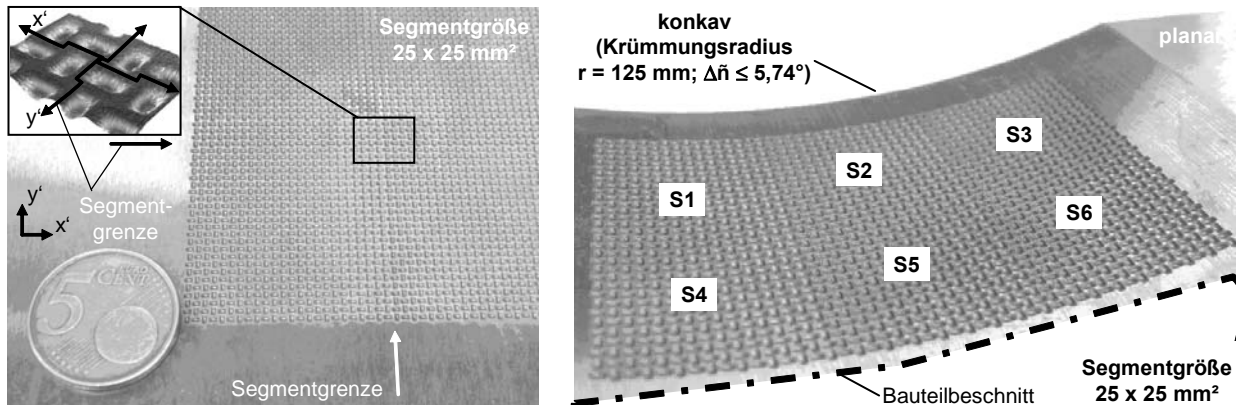


Bild 7-46: Teststrukturen im STL-Format

Test structures in STL data format

Die in Bild 7-46 (links) dargestellte Loop-Struktur kann bereits mit den erarbeiteten Parametern und ohne speziellen Kachelalgorithmus großflächig auf Oberflächen übertragen werden. Dabei wird jedes einzelne Segment in einem abgeschlossenen Bearbeitungsdurchgang hergestellt (vgl. Bild 7-49, Strategie II). Sowohl bei ebener (Bild 7-47) als auch bei gewölbter Oberfläche (Bild 7-48) sind keine sichtbaren Nahtstellen zu beobachten bzw. messtechnisch zu erfassen, da die Strukturtrennung in unbearbeitete Bereiche gelegt werden kann. Bei der ebenen und der gewölbten Oberfläche konnte eine Segmentgröße von $25 \times 25 \text{ mm}^2$ im CAM-System verarbeitet werden. Die gewölbte Oberfläche weist einen Krümmungsradius von $r = 125 \text{ mm}$ auf, so dass am Rand des Scannerfelds $\Delta\tilde{n} = 5,74^\circ$ (Maximum) vorliegt.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; 4 quadratische Segmente

Bild 7-47: Strukturkachelung auf ebener Oberfläche (Loop-Struktur)

Tiling of structures on a plane surface (loop structure)

Bild 7-48: Strukturkachelung auf konkaver Oberfläche (Loop-Struktur)

Tiling of structures on a concave surface (loop structure)

Die Strukturkachelung von vernetzten Strukturen erfordert hingegen die Entwicklung spezieller Kachelalgorithmen sowie gegebenenfalls die Modifizierung der zuvor bestimmten Bearbeitungs- oder Systemparameter. Bei den im Folgenden durchgeführten Untersuchungen steht das Teilziel der Nahtlosigkeit im Vordergrund.

In Bild 7-49 sind zwei Kachelalgorithmen für den 3D-Segment-Prozess schematisch dargestellt. Dabei sind geradlinige Trennkanten gegenüber nichtlinearen, freigeformten Trennkanten zu bevorzugen, weil dann der Berechnungsaufwand im CAD/CAM-System deutlich reduziert ist.

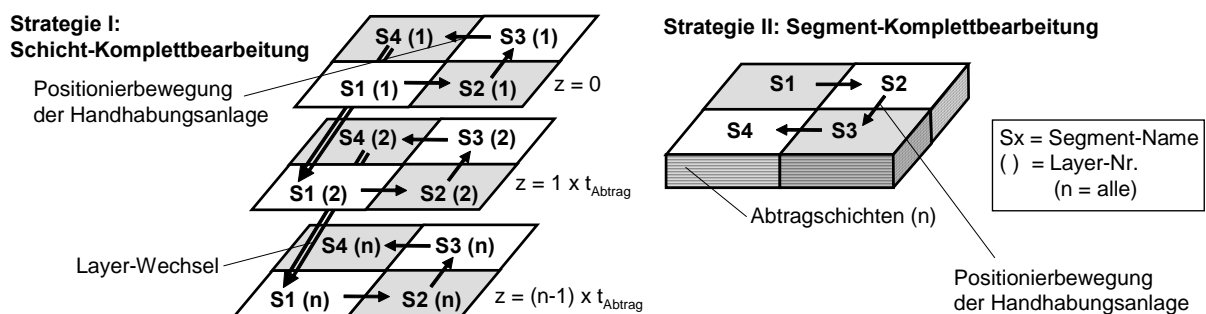


Bild 7-49: Kachelungsstrategien mit vieleckiger Segmentform für Strukturklassen I und III

Strategies for tiling with polygon segment form for structure class I and III

Bei der Kachelungsstrategie I erfolgt eine sequenzielle Abarbeitung von flächig zusammenhängenden Segmentschichten. Das bedeutet, dass in einem Bearbeitungszyklus die gesamte Oberfläche mit einem z'-konstanten Schichtverbund abgetragen wird. Dadurch soll eine Minimierung der Schmelzaufwürfe an den Nahtstellen der einzelnen Segmente erzielt werden. Die Anzahl der einzelnen Zyklen entspricht dabei der Schichtanzahl. Im Gegensatz dazu erfolgt

bei der Kachelungsstrategie II eine sukzessive, vollständige Bearbeitung aller Schichten im Segment. Die Segmentanzahl bestimmt dabei die Positionierbewegungen der Handhabungsanlage, wodurch die Strategie II im Vergleich zur Strategie I deutlich geringere Nebenzeiten aufweist.

Zu Anfang werden die Kachelungstests mit der vereinfachten Leder-Teststruktur (vgl. Bild 7-46; rechts) durchgeführt, weil die Bearbeitungszeiten minimal sind. Die Struktur weist an ihren Rändern durchgetrennte konkave, elliptische Strukturen auf, an denen auftretende Kachelungsfehler analysiert werden können. Bild 7-50 zeigt die mittels Wyko NT 1100 vermessenen Strukturen aus dem Kachelungsbereich und zum Vergleich die detaillierten Abmessungen der vereinfachten Teststruktur. Es wurde ausschließlich die Kachelungsstrategie I genutzt.

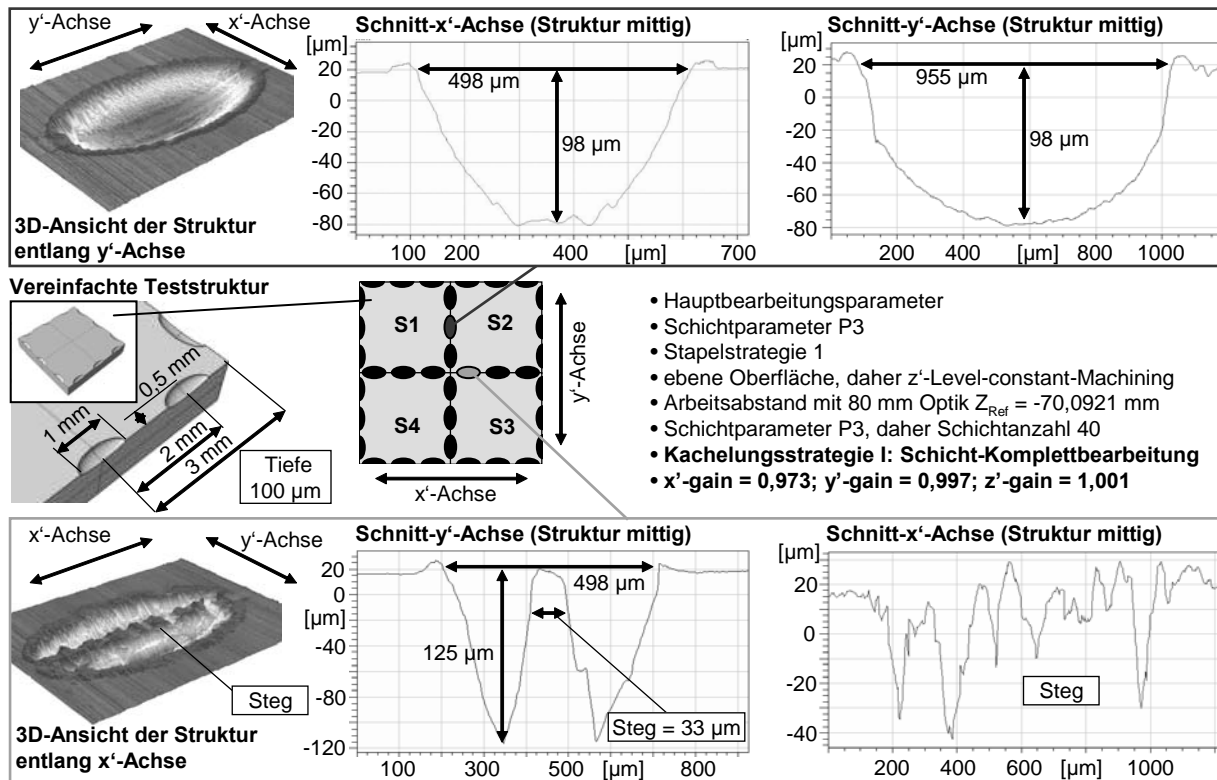
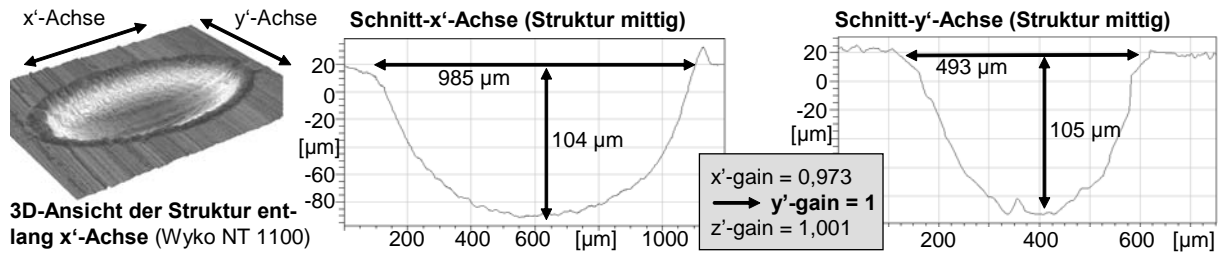


Bild 7-50: Kachelung der vereinfachten Teststruktur mittels Kachelungsstrategie I (Wyko NT 1100)

Tiling of the simplified test structure with tiling strategy I (Wyko NT 1100)

Die Strukturschnitte in Bild 7-50 zeigen, dass die Strukturen entlang der y' -Achse nur eine sehr geringe Formabweichung zur Soll-Kontur aufweisen. Die Strukturen entlang der x' -Achse zeichnen sich jedoch durch eine hohe Formabweichung in Form eines unabgetragenen Stegs in der Mitte der Struktur aus. Die Stege besitzen im Mittel eine Breite von 30 μm und reichen bis zur Oberfläche. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass aufgrund einer fehlerhaften Achsskalierung der y' -Achse eine Positionierabweichung vorliegt. Dieses wird zudem durch den Strukturformfehler von -45 μm entlang der y' -Achse (Schnitt y' -Achse) bestätigt.

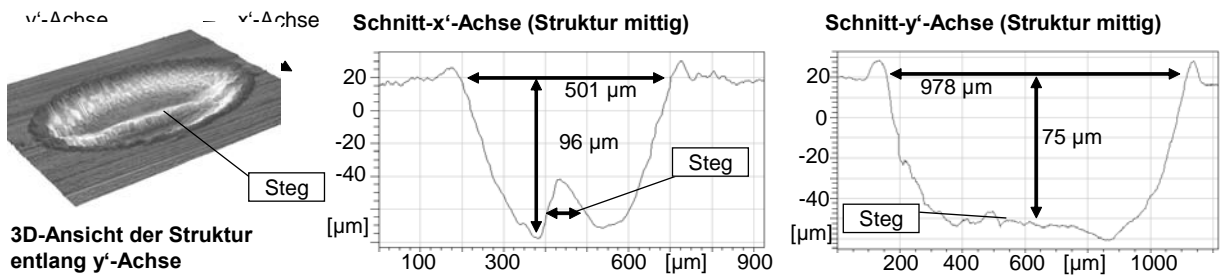
Die Kompensation einer fehlerhaften Achsskalierung kann durch eine Anpassung der gain-Faktoren erfolgen (vgl. Kapitel 7.4.1). Entsprechend den Ergebnissen aus Bild 7-50 wird nur der y' -gain-Faktor verändert. Durch dessen Vergrößerung von 0,997 auf 1 bildet sich kein Steg mehr aus und die Formabweichung wird auf ein Minimum reduziert. Bild 7-51 zeigt die Struktur aus dem Kachelungsbereich entlang der x' -Achse. Die gemessene Formabweichung ist in der x' - y' -Ebene kleiner als 1,5 % und in z' -Richtung kleiner als 2 %. Die Notwendigkeit zur erneuten Kalibrierung eines bereits zuvor optimierten gain-Faktors ist dadurch zu erklären, dass aufgrund von Temperaturdrifts im Scanner größere Positionierabweichungen auftreten.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ µm; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie I

Bild 7-51: Optimierte Kachelung bei Kachelungsstrategie I durch Anpassung der gain-Faktoren
Optimised tiling with strategy I through adjusted gain values

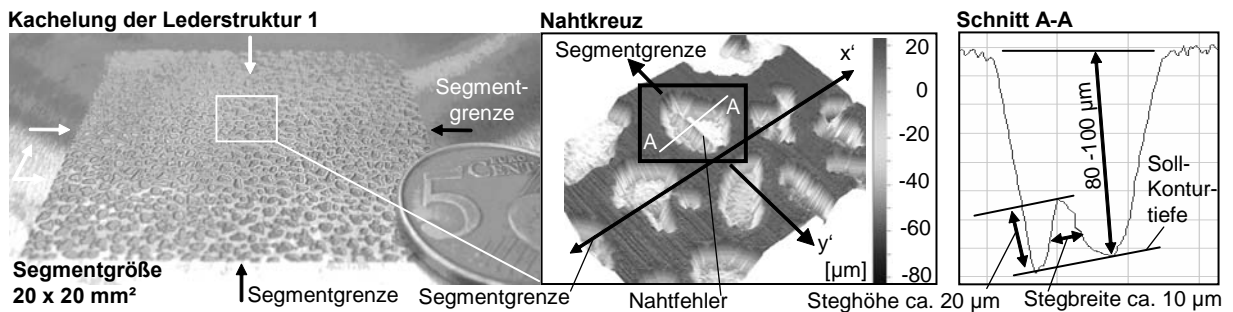
Wie bereits erörtert, weist Kachelungsstrategie I durch ihre zahlreichen Positionierbewegungen (hier 160) einen hohen Nebenzeitanteil gegenüber Strategie II (hier vier) auf. Bild 7-52 zeigt exemplarisch eine elliptische Abtragstruktur entlang der y'-Achse mit genutzter Kachelungsstrategie II. Die Struktur weist entlang der x'-Achse einen Steg längs der Nahtstelle auf. Die Höhe des Stegs beträgt etwa 35 µm. Die Ausbildung des Stegs ist auf den Schmelzrand des vorherigen Segments zurückzuführen, welcher in Form eines zusätzlichen Abtragaufmaßes vorliegt. Die Stege können nicht durch eine Veränderung der gain-Faktoren vermieden werden. Daher kann die Strategie II nicht bei den Strukturklassen I und II eingesetzt werden.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ µm; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie II

Bild 7-52: Kachelung der vereinfachten Teststruktur mittels Kachelungsstrategie II
Tiling of the simplified test structure with tiling strategy II

Mit der erarbeiteten Kachelungsstrategie I wird die komplexe Leder-Teststruktur 1 (vgl. Bild 7-46; rechts) in eine ebene Oberfläche (Bild 7-53, links) eingebracht. Dabei werden jeweils vier Segmente hergestellt, so dass die Qualität der Kachelung untersucht werden kann.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45$ µm; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; 4 quadratische Segmente

Bild 7-53: Kachelung von Leder 1 auf ebener Oberfläche durch Kachelungsstrategie I
Tiling of leather 1 structure on plane surface with strategy I

In der Kachelungszone sind einige wenige Strukturfehler entlang der x'-Achse festzustellen, die sich als Stege im Abtraggrund mit einer Breite von ca. 10 µm und einer Höhe von ca.

20 µm beschreiben lassen (Bild 7-53, Mitte und rechts). Die Kachelungsfehler treten nicht regelmäßig auf, so dass deren Entstehung mit dynamischen, unvorhersehbaren Positionierfehlern im Scannersystem zu erklären ist. Da jedoch die Kachelungsfehler bei erhöhtem Aufkommen eine sichtbare, nicht tolerierbare Trennlinie bilden können, muss im Hinblick auf andere vernetzte, unregelmäßige Strukturen eine Optimierung der Kachelungsstrategie I erfolgen. Dazu werden Segmente mit nichtlinearen, freigeformten Trennkanten erzeugt, die dann jeweils zu einer größeren Fläche verzahnt werden. Die Erzeugung und Aufbereitung dieser Segmente ist sehr aufwändig und erfordert viel Erfahrung im Bereich der Designstrukturerstellung. Geeignete Automatismen stehen nicht zur Verfügung.

Bild 7-54 (links) zeigt anhand der Lederstruktur 2 die Ausführung von nichtlinearen, freigeformten Segmenttrennkanten und deren Multiplikation. Die durch NC-Daten beschriebene Struktur mit freigeformten Segmentkanten weist eine maximale Ausdehnung von 25 x 25 mm² auf. Der relevante Kachelungsbereich befindet sich dabei im Zentrum und besitzt nur eine Abmessung von 20 x 20 mm², so dass durch eine Verzahnung (Zustellung jeweils 20 mm in der X- und Y-Achse) eine unregelmäßige Kachelung in der Ebene erfolgt. Es können bei optischer Überprüfung keine einzelnen Kachelungsfehler bzw. keine ausgebildete Trennlinie in der Oberflächenstruktur gefunden werden (Bild 7-54, rechts), somit liegt eine nahtlose Kachelung vor.

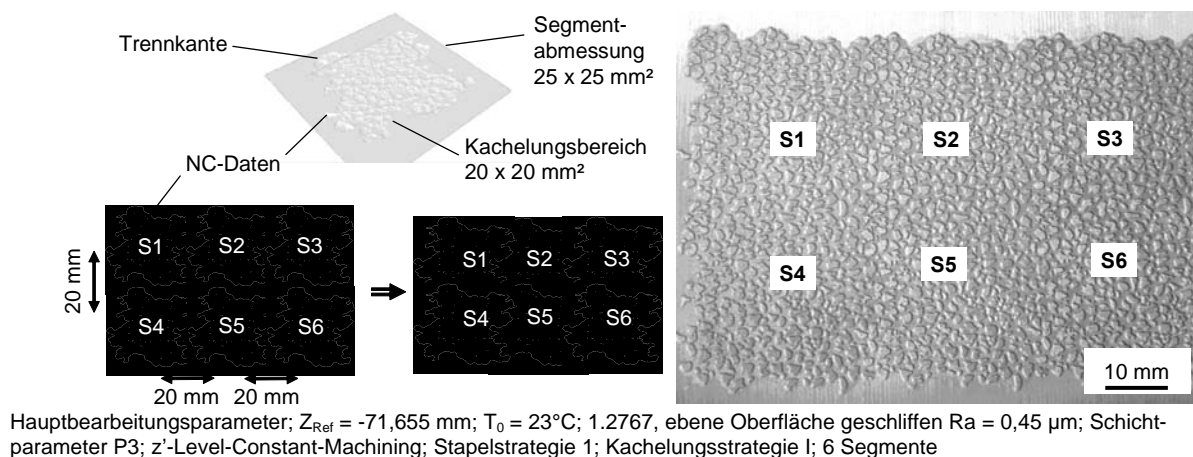
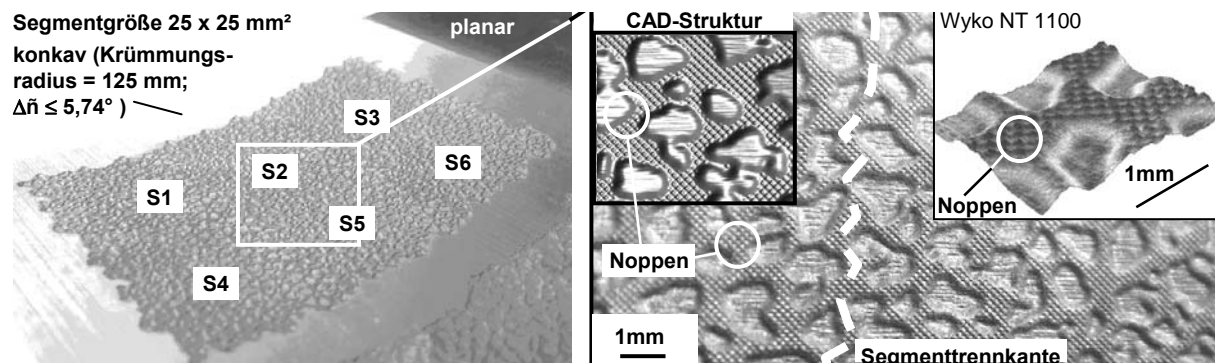


Bild 7-54: Optimierung der Kachelung durch nichtlineare, freigeformte Segmenttrennkanten
Optimisation of tiling through non-linear, free-formed segment borders

Nachdem die großflächige Kachelung von vernetzten, unregelmäßigen Strukturen auf ebenen Oberflächen gezeigt wurde, muss noch eine Übertragung auf gewölbte Oberflächen erfolgen. Dazu werden jeweils sechs Segmente der Lederstruktur 1 mit der Kachelungsstrategie I und mit nichtlinearen Segmenttrennkanten in eine konkave Oberfläche (Bild 7-55, Krümmungsradius $r = 125$ mm) eingebracht. Aufgrund der vorliegenden Oberflächenwölbung, der Verwendung des z'-Level-Constant-Machinings und des Schichtparameters P3 werden bei jedem Segment 288 Einzelschichten im CAM-System erzeugt, obwohl die Struktur nur eine Tiefe von 100 µm aufweist. Dadurch erhöht sich der Berechnungsaufwand für ein Segment-Toolpath um etwa 25 %. Da das Abtragsvolumen gegenüber dem einer ebenen Oberflächenbearbeitung konstant bleibt, sind die Bearbeitungshauptzeiten unverändert. Es bestehen lediglich höhere Nebenzeiten aufgrund der zusätzlichen Positionierbewegungen. Das in Bild 7-55 dargestellte Messergebnis der hergestellten Struktur Leder 1 (Wyko NT 1100) verdeutlicht die hohe Abbildungsgenauigkeit der Prozesskette auch bei der Bearbeitung von gewölbten Oberflächen. Strukturfeatures wie die Noppen sind gleichmäßig und fein ausgebildet, auch sind keine Schmelzablagerungen zu erkennen.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, Oberfläche gefräst mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie I

Bild 7-55: Großflächige Kachelung von Strukturklasse III (Leder 1) auf konkaver Oberfläche mit variierten Segmenttrennkantenform; Vermessung mit Wyko NT 1100

Large-area tiling of structure class III (leather 1) on concave surfaces with varied segment borders; measured with Wyko NT 1100

Zwischenfazit aus den Versuchen zur großflächigen Strukturkachelung:

- *Strukturklassen II und IV können mit der Kachelungsstrategie II (Segment-Komplettbearbeitung) prozesssicher und reproduzierbar sowohl auf ebene als auch auf gewölbte Oberflächen multipliziert werden. Es liegt eine hohe Strukturqualität vor.*
- *Die Multiplikation der Strukturklassen I und III erfordert eine Anpassung des y' -gain-Faktors von 0,997 auf 1 und die ausschließliche Nutzung der Kachelungsstrategie I (Schicht-Komplettbearbeitung). Auf ebenen und gewölbten Oberflächen liegen nahezu nahtfreie bzw. mit sporadisch verteilten Strukturfehlern (Stegen) versehene Übergangsbereiche vor. Durch die Nutzung von nichtlinearen, freigeformten Segmenträndern können die Strukturfehler nicht mehr auf der Oberfläche lokalisiert werden.*
- *Formabweichung in der x' - y' -Ebene ist kleiner als 1,5 % und in z' -Richtung kleiner als 5 %.*

7.4.3 Entfernung von Abtragrückständen

Removal of ablation residua

Prozessbedingte Abtragrückstände, wie Schmelzablagerungen am Strukturrand oder die Weiße Schicht im Abtraggrund, werden durch die eingesetzten Prozessparameter bereits auf ein Minimum reduziert. Nach der Laserbearbeitung weist die Abtragstelle einen rostfarbenen Belag auf, der als kondensierter und in der Luftatmosphäre oxidiertes Niederschlag der Ablationsprodukte identifiziert werden kann (Bild 7-56, links). Die Ausprägung des Belags, vornehmlich Eisen(III)-Oxid, kann durch Absaugen oder durch eine inerte Schutzgasatmosphäre minimiert werden. Die beiden vorgestellten Möglichkeiten erfordern jedoch insbesondere bei großflächigen Bauteilen einen hohen apparativen Aufwand.

In der Literatur werden zur Entfernung von Schmelzrückständen und des zuvor beschriebenen Belags verschiedene Methodiken beschrieben. Am häufigsten werden dabei die Prozessfolgen Bürsten, Ultraschallbad und Pulver-/Kugel-Strahlen oder Bürsten, Ultraschallbad und Ätzen mit Flußsäure (HF) eingesetzt [LORE06], [ENGL06], wobei jedoch deutlich größere Schmelzrückstände und Beläge als die hier vorliegenden entfernt werden müssen. Die beschriebene Prozessfolge kann insbesondere bei großflächigen, komplexen Spritzgießwerkzeugen nicht angewendet werden, weil durch Bürsten und Strahlen nichtstrukturierte oder polierte Oberflächenbereiche beschädigt werden. Weiterhin sind Ultraschallbadanlagen für großvolumige Bauteile nicht verfügbar. Das Ätzmittel Flußsäure stellt eine hohe Gesundheitsgefährdung dar und erfordert daher kostenintensive Sicherheits- und Handhabungsmaßnahmen. Von einer Verwendung wird daher Abstand genommen.

Zur Entfernung des Belags wird hier ein Reinigungsschritt mit verdünnter Salzsäure (37,5 %) in Kombination mit einer weichen Bürste eingesetzt. Nach Benetzung der laserbearbeiteten

Oberfläche erfolgt ein sofortiger Farbumschlag hin zur metallisch blanken Farbe (Bild 7-56, rechts). Die ablaufende Reaktion kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:



Eine Einwirkzeit der Säure von etwa zwei bis drei Sekunden erzielt bereits konstante Reinigungsergebnisse. Durch leichte Bürstbewegungen kann die Reinigung in Kavitäten beschleunigt werden. Nach der vollständigen Reinigung wird die Oberfläche zunächst mit Wasser und dann mit Ethanol abgespült. Nach einer beschleunigten Trocknung durch einen warmen Luftstrom kann die Oberfläche mit Sprühöl oder anderen Hilfsstoffen gegen Oxidation konserviert werden. Eine negative metallurgische Beeinflussung der Oberfläche durch die verwendete Säure kann nicht festgestellt werden.

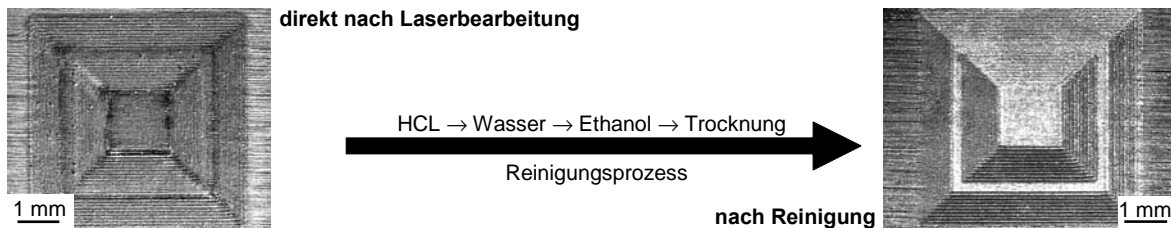


Bild 7-56: Oberfläche direkt nach der Laserbearbeitung und nach Reinigungsprozess
Surface directly after laser machining and after cleaning process

Nach dem Reinigungsprozess liegt weiterhin die Weiße Schicht auf der Oberfläche vor. Im Rahmen der EDM-Bearbeitung wird ein negativer Einfluss dieser Schicht auf die Standzeit von Urform- und Umformwerkzeugen beschrieben, wobei die dort beobachteten Schichtdicken deutlich größer sind. Je nach Entladungsenergie kann beim EDM-Prozess die Dicke bis zu 0,2 mm betragen. Eine Nitrierung oder Beschichtung (PVD oder CVD) zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften ist nicht möglich, so dass die Schicht im Allgemeinen durch zusätzliche Fertigungsprozesse entfernt wird. Dabei wird vor allem das Mikrostrahlen, das Polieren oder das Elektropolieren (EP) eingesetzt [KLOC07, S. 167], [LASE07]. Da die hier vorliegende Schichtdicke (P3 entspricht 2,4 μm) sehr gering ist, ist ein vergleichbarer negativer Einfluss der Schicht auf den Abformprozess nicht zu erwarten. Innerhalb der Pilotanwendung (Kapitel 8) wird die Weiße Schicht nicht entfernt.

7.5 Fazit

Conclusion

Aus den theoretischen Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren wird deutlich, dass die verschiedenen Phasen der Sublimation jeweils durch unterschiedliche Parameter bzw. Phänomene beeinflusst werden. Die nutzbaren Intensitäten I_{Abs} bei senkrechtem Strahlaustritt betragen zwischen $4 \cdot 10^8$ und $1,4 \cdot 10^{11}$ W/cm^2 . Die Variation des Strahlauftreffwinkels $\Delta \tilde{n}$ führt zu einer erheblichen Reduzierung von I_{Abs} . Für die ablaufenden Prozesse in der Aufschmelz-, in der Schmelzaustriebs- und in der Verdampfungsphase ist das Verhältnis aus I_{Abs} zu den pulslängenabhängigen Schwellintensitäten für Schmelzen ($5,8 \cdot 10^6 \leq I_{\text{Schwell,S}} \leq 9,5 \cdot 10^6$ W/cm^2) und Verdampfen ($4,27 \cdot 10^9 \leq I_{\text{Schwell,V}} \leq 5,0 \cdot 10^9$ W/cm^2) entscheidend. Da einige Parameter sowohl unterhalb als auch oberhalb von $I_{\text{Schwell,V}}$ angesiedelt sind, muss mit einem Misch-Abtrag (Schmelzen und Sublimation) innerhalb der Versuche gerechnet werden. Es kann ein modellhafter Zusammenhang zwischen der Abtragqualität/-quantität und der Strahlintensität aufgestellt werden (Bild 7-4), der zur Definition des optimalen Prozessfensters dient. Die untere Grenze des Parameteroptimums wird durch die Verdampfungsschwellintensität $I_{\text{Schwell,V}}$ und die obere Grenze durch die Plasmaabschirmschwellintensität $I_{\text{Schwell,V-A}}$ definiert.

Der Betriebsparameter mit $f_p = 40$ kHz und $I_A = 30$ A wird als Hauptbearbeitungsparameter definiert. Dieser weist die höchste Abtragleistung bei geringsten Schmelzablagerungen auf, da er im optimalen Intensitätsbereich arbeitet. Das Parameteroptimum befindet sich somit in ei-

nem Intensitätsbereich zwischen $4 \cdot 10^8$ und $5,6 \cdot 10^9$ W/cm³, wobei die genutzte Pulslänge τ_P zu berücksichtigen ist.

Grundsätzlich erhöht eine Helium-Atmosphäre den Pulsabtrag, diese wird aber aufgrund des hohen apparativen Aufwands nicht eingesetzt. Eine Prozessverbesserung im Vakuum konnte nicht nachgewiesen werden. Im Pulsabstandregime S zwischen 25 % und 50 % liegen die homogensten Abtraggräben vor. Zur Herstellung mehrschichtiger Abträge wurden spezielle Schichtparameter-Kombinationen (Px) definiert, welche in Verbindung mit der Zick-Zack-Strategie und der Stapelstrategie 1 (Bahnorientierung 90° alternierend) geringste Oberflächenrauheiten Ra ($> 0,5 \mu\text{m}$), nahezu keine Schmelzränder h_{Schmelz} , höchste Abtragraten V_{Abtrag} sowie reproduzierbare und konstante Schichtdicken im Prozess ermöglichen. Bei maximal genutzter Segmentgröße können innerhalb des Segments Flächen mit einem Krümmungsradius $r_{\text{min,real}}$ von bis zu 60 mm prozesssicher bearbeitet werden. Daraus ergibt sich für die Segmentierung ein Winkelgrenzwert $\Delta \tilde{n}_{\text{Grenz}}$ kleiner als 12°.

Eine Umwandlungszone (WEZ) oder andere Oberflächenbeeinflussungen sind in der Randzone des Grundgefüges nicht feststellbar. Auf dem Abtraggrund bildet sich stets eine homogene Oberflächenschicht – Weiße Schicht – mit konstanter Dicke aus (2,4 - 5,8 μm). Mit zunehmendem Pulsabstand S bzw. Vorschubgeschwindigkeit v_f sowie mit zunehmendem Hatch H kann die Dicke vermindert werden. Auf der Oberfläche niedergeschlagene Abtragrückstände – vornehmlich Eisen(III)-Oxid – werden hier durch einen speziellen Reinigungsprozess (Basis: HCL-Lösung) schonend entfernt.

Alle erarbeiteten Bearbeitungsparameter sind als spezielle Laser-Tools in der XML-basierten Prozess- und Technologiedatenbank abgelegt und stehen somit allen Systemapplikationen zur Verfügung. Durch eine Anpassung der gain-Faktoren können die negativen Einflüsse der Anlagentechnik und des CAM-Systems auf die Abbildungsgenauigkeit sowie die Ausbildung von Kachelungsfehlern auf ein Minimum reduziert werden. Der Schichtparameter P3 (Schichttiefe $s = 2,5 \mu\text{m}$; Abtragvolumenrate $V_{\text{Abtrag}} = 0,572 \text{ mm}^3/\text{min}$ und Rauheit Ra im Abtraggrund $0,61 \mu\text{m}$) stellt das Parameteroptimum dar, weil dieser die geringste Ausbildung des Treppeneffekts aufweist. Bei komplexen 3D-Strukturen ist die gemessene Formabweichung in der x'-y'-Ebene kleiner als 1,5 % und in z'-Richtung kleiner als 5 %. Die maximale Strukturlösung bzw. die minimale Abbildungslänge von NC-Bahnen der Prozesskette beträgt 100 μm .

Unvernetzte Strukturen können mit der Kachelungsstrategie II (Segment-Komplettbearbeitung) ohne Nahtstellen auf ebene und gewölbte Oberflächen übertragen werden. Die Multiplikation von vernetzten Strukturen (Klasse III) auf ebene und gewölbte Oberflächen erfordert jedoch den Einsatz der Kachelungsstrategie I (Schicht-Komplettbearbeitung). Diese weist aufgrund der zusätzlichen Positionierbewegungen eine höhere Bearbeitungszeit auf. Die bei dieser Struktur sporadisch auftretenden Kachelungsfehler können durch die Nutzung von nichtlinearen, freigeformten Segmenträndern nicht mehr visuell lokalisiert werden. Das Constant-to-Contour-Machining kann aufgrund fehlender CAM-Strategien und unzureichender Leistungsfähigkeit des VarioScans nicht eingesetzt werden, so dass hier ausschließlich das z'-Level-Constant-Machining genutzt wird.

8 Pilotanwendungen

Test applications

Anhand von Pilotanwendungen wird die entwickelte Prozesskette, beginnend beim Strukturdesign über die Fertigung bis hin zur Abformung, auf ihre technologische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit untersucht. Daraus werden Stärken aber auch bestehende Schwächen ersichtlich und gegebenenfalls Entwicklungspotenziale für weiterführende Arbeiten abgeleitet. Anhand von weiteren Anwendungen soll die Einsatzmöglichkeit der Prozesskette für übergreifende Branchen aus dem Bereich der Oberflächenstrukturierung dargestellt werden.

8.1 Pilotbauteil 1: Musterplatte mit Strukturklasse III

Test application 1: reference panel with structure class III

Musterplatten dienen Designern als erste Strukturbegutachtung und den Oberflächenveredlern als vertriebstechnischer Demonstrator. Bei der Musterplattenherstellung steht besonders eine schnelle und abbildungsfehlerfreie Strukturumsetzung im Vordergrund. Pilotbauteil 1 ist eben und weist typische Abmessungen eines Musterplattenwerkzeugs auf. Die herzustellende Struktur besitzt eine Größe von $80 \times 60 \times 0,1 \text{ mm}^3$.

8.1.1 Anwendung der entwickelten Prozesskette

Use of the developed process chain

Es liegt eine natürliche Lederhaut als Strukturvorlage vor. Zur Digitalisierung wird diese auf eine Vakuumspannplatte aufgezogen, gereinigt und entstaubt, um eine möglichst hohe Datenqualität sicherstellen zu können. Mit dem konfokalen Mikroskop (Siscan MC64) wird ein $25 \times 25 \text{ mm}^2$ großer Flächenbereich gemessen. Die Messwerte werden im TIF-Format abgespeichert. Messausreißer und -löcher werden weitestgehend entfernt, indem ein Gaußfilter und ein Datastore (Toleranz 10 Pixel) angewendet werden. Da hier eine Bauteiloberfläche bearbeitet werden soll, die größer als die Strukturvorlage ist, muss die Vorlage kachelbar sein. Die Umsetzung der Kachelungsfähigkeit ist jedoch bei einer mittels Messtechnik erzeugten Lederstrukturvorlage sehr aufwändig, so dass hier eine digitale Strukturerstellung als Datenbasis genutzt wird. Die messtechnisch aufgenommene Lederstruktur dient dabei als Arbeitsgrundlage. Anhand der in Bild 6-6 dargestellten Methodik wird eine vergleichbare Lederstruktur mit einer Abmessung von $80 \times 60 \times 0,1 \text{ mm}^3$ digital erzeugt. Die Strukturrandbereiche laufen in der Tiefe stufenlos aus und ein Logo ist nahtlos eingefügt (Bild 8-1, links).

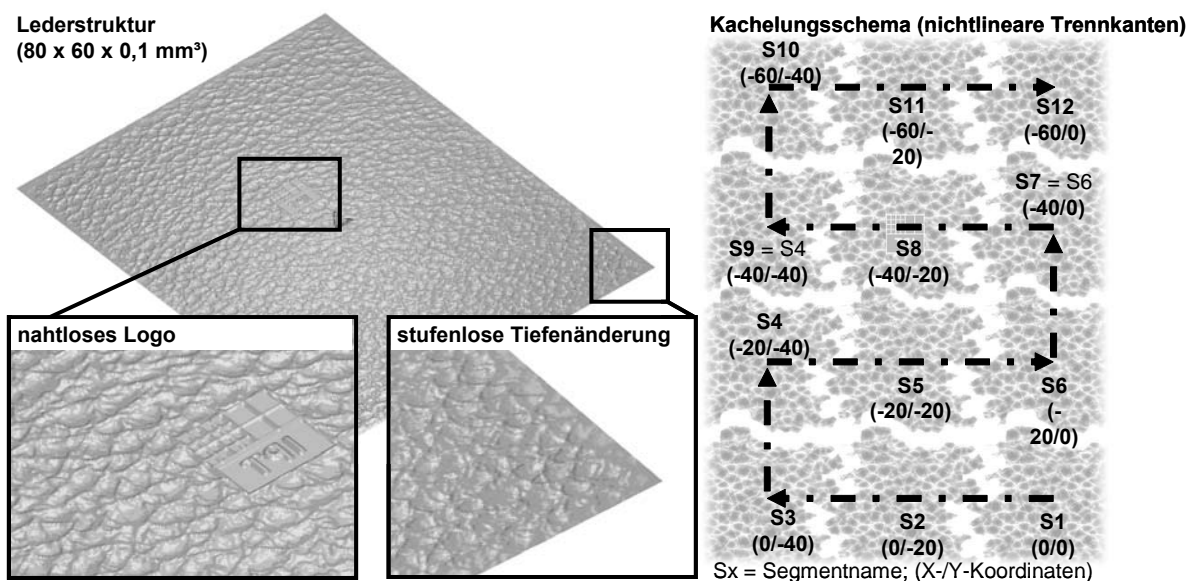
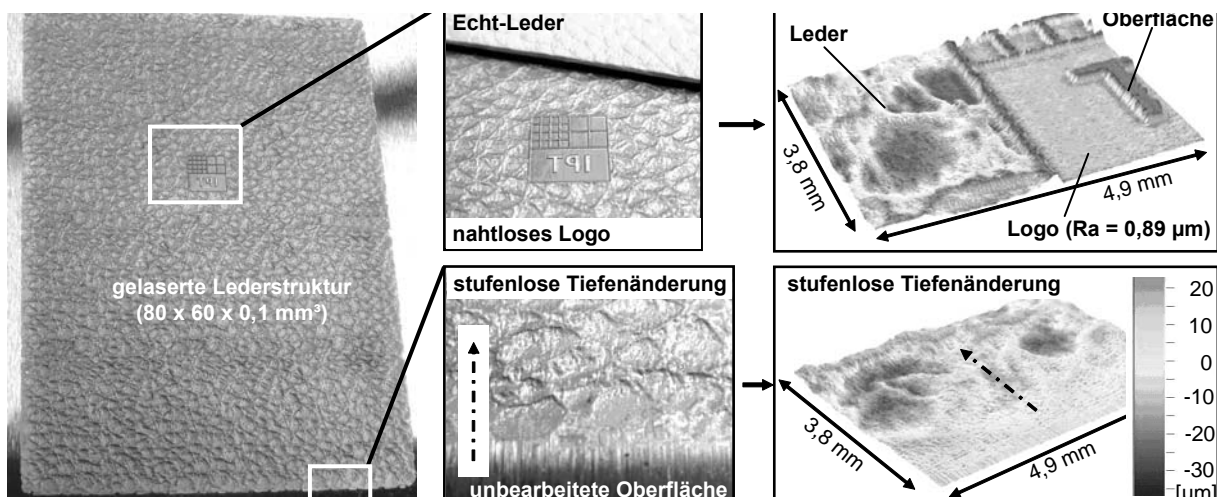


Bild 8-1: Durch CAD erstellte Leder-Struktur und Kachelungsschema

Leather structure designed in CAD and tiling procedure

Es liegt eine Strukturauflösung in der x' - y' -Ebene von $25\ \mu\text{m}$ und entlang der z' -Achse von $0,4\ \mu\text{m}$ vor. Daraus ergibt sich eine Datenmenge von $67,5\ \text{MByte}$. Diese pixelbasierte 2D-Bildvorlage weist keinerlei Messfehler auf. Die Segmentierung erfolgt manuell, wobei aufgrund der vorliegenden Strukturklasse (III) nichtlineare Trennkanten erzeugt werden. Die zwölf einzelnen Segmente weisen entsprechend der maximalen Scannerfeldgröße jeweils eine Abmessung von $25 \times 25\ \text{mm}^2$ auf (Bild 8-1, rechts). Der Verzahnungsgrad der Segmente beträgt $5\ \text{mm}$, so dass die Handhabungsanlage jeweils $20\ \text{mm}$ Weglänge zum nächsten Segmentmittelpunkt positionieren muss. Mit ArtCam Pro werden die einzelnen Segmente ins STL-Datenformat (Dreiecksgröße $2\ \mu\text{m}$) überführt und können somit ins CAM-System zur Erstellung der jeweiligen Segment-Toolpaths eingelesen werden. Die durchschnittliche Datenmenge der Segmente im STL-Format beträgt $24\ \text{MByte}$. Der Global-Toolpath wird manuell in einem Editor erzeugt, wobei die Kachelungsstrategie I (Schicht-Komplettbearbeitung) angewendet wird.

Im CAM-System werden die jeweiligen Segment-Toolpaths im z' -Level-Constant-Machining mit dem Schichtparameter P3 und der Stapelstrategie 1 erzeugt. Pro Segment liegen 39 Schichten vor. Mit Hilfe des PP werden die verschiedenen ISO-NC-Datensätze erzeugt, die jeweils eine maximale Datenmenge von $1\ \text{MByte}$ aufweisen. Bild 8-2 zeigt das großflächig strukturierte Musterplattenwerkzeug nach dem Reinigungsschritt und eine messtechnische Erfassung ausgewählter Strukturdetails. Die einzelnen Zeitaufwände innerhalb der Prozessschritte werden in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angegeben.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{\text{Ref}} = -71,655\ \text{mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45\ \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z' -Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie I

Bild 8-2: Pilotanwendung 1 und Vermessung von Strukturdetails (Wyko NT 1100)

Test application 1 and measuring of structure features (Wyko NT 1100)

Sowohl visuell als auch messtechnisch sind keinerlei Nahtstellen in der Struktur festzustellen. Die Abbildungsgenauigkeit kann aufgrund des unregelmäßigen Ledermusters nicht im Bereich der Lederstruktur bestimmt werden, da keine eindeutig vergleichbaren Strukturdetails lokalisiert werden können. Dies kann jedoch innerhalb des Logos erfolgen (Bild 8-3). Anhand eines Soll-/Ist-Vergleichs an einem Buchstaben im Logo kann eine Strukturvergrößerung in der x' - y' -Ebene und entlang der z' -Achse von jeweils $2,3\ \%$ festgestellt werden. Diese Abweichungen sind vor allem auf die zahlreichen Berechnungen im 3D-Segment-Prozess zurückzuführen.

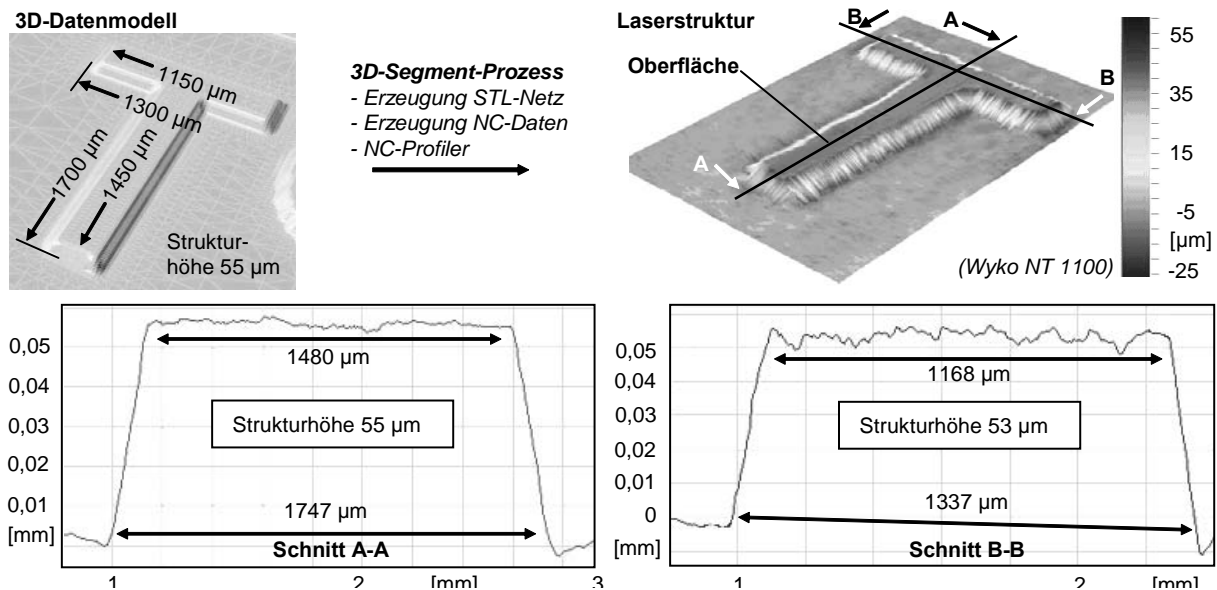


Bild 8-3: Bestimmung der Abbildungsgenauigkeit im Logo-Bereich

Determination of the form accuracy in the logo area

8.1.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Economic efficiency

Der industrielle Erfolg einer neuen Prozesskette setzt neben technologischen, umwelttechnischen und sozialen Verfahrensvorteilen vor allem eine wirtschaftliche Tragfähigkeit voraus. Daher wird im Folgenden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die entwickelte Prozesskette durchgeführt, indem die Herstellungskosten der Oberflächenstrukturierung ermittelt werden. Diese erfolgt ausführlich anhand der Pilotanwendung 1 – Lederstruktur, weil dort alle Schritte der Prozesskette durchlaufen werden. Eine Übertragung auf andere Pilotanwendungen ist somit möglich. Die während der Durchführung der Pilotanwendung ermittelten Durchlaufzeiten sind für eine Übertragung in ein industrielles Umfeld jedoch nur als grobe Anhaltswerte zu betrachten, da durch eine Optimierung von Verfahrensabläufen und der genutzten Systemapplikationen (z. B. leistungsstärkere Workstations und anwendungsspezialisierte Softwareapplikationen) erhebliche Zeiteinsparungen erzielt werden können.

Nachfolgende Annahmen und Definitionen finden bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Verwendung:

- Lineare Abschreibung von Investitionsgütern: Maschinen/Anlagen = 5 Jahre; PC/Software-Systeme = 3 Jahre.
- Der Investitionsaufwand der Laserstrahlstrukturieranlage spiegelt nicht den für eine vergleichbare Serienmaschine wider, dies ist vor allem auf den Prototypenaufbau und auf nicht genutztes Anlagenzubehör zurückzuführen. Der reale Investitionsaufwand wird daher um einen Faktor von 20 % reduziert, um eine repräsentative Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu ermöglichen. Der Investitionsaufwand K_{INV} beläuft sich somit auf 384.000 €.
- Der Zinssatz wird mit 5,5 % kalkuliert.
- Instandhaltungs- und Wartungskosten werden pauschal mit 3 % von K_{INV} angesetzt.
- Einschichtige Arbeitszeit = 1656 h/Jahr, d. h. 8 h/Tag und 17,25 Tage/Monat.
- Dreischichtige Nutzung der Strukturieranlage (automatisierter, mannloser Betrieb), alle anderen Anlagen weisen nur eine einschichtige Auslastung auf.
- Personalstundensätze in Abhängigkeit von der Qualifikation nach BMWi-Sätzen: Ingenieur (FH), Techniker/Meister = $Q_I = 40$ €/h; Facharbeiter = $Q_F = 33$ €/h.
- Raumbedarf 40 m² für Strukturieranlage, Messanlage (Siscan MC 64) und PC-Arbeitsplätze. Raumkosten pro Jahr 240 €/m² (voll der Strukturieranlage zugeteilt).

Tabelle 8-1 enthält die Einzelpositionen zur Berechnung des Maschinenstundensatzes der Strukturieranlage bei dreischichtiger Auslastung.

Einzelpositionen	Spezifizierung	Aufwand pro Jahr [€]	Aufwand pro Stunde [€]
Energiekosten	u. a. Strom und Druckluft	9.912	1,99
Instandhaltungskosten	pauschal 3 % von K_{INV}	11.520	2,31
Raumkosten	40 m ²	9.600	1,93
Abschreibung	linear	76.800	15,40
Zinsen	kalk. Zinssatz = 5,5 %	21.120	4,24
		Summe = 128.952	
Maschinenstundensatz [€/h]			Summe = 25,86

Tabelle 8-1: Maschinenstundensatz der Strukturieranlage im dreischichtigen Betrieb

Hourly machine rate of the structuring machine operating in three shifts

In der Tabelle 8-2 sind die jeweiligen Zeitbedarfe, Anlagenaufwände sowie Bedienerqualifikationen und -zeitanteile beim sequenziellen Durchlauf der Prozesskette (Pilotanwendung 1 – Lederstruktur) aufgeführt. Daraus ergibt sich eine Gesamtdurchlaufzeit von 1.130 min (bzw. 18,8 h) und ein Kostenanteil von 493 €, wobei es sich dabei um eine hochqualitative Einzelanfertigung eines Musterplattenwerkzeugs handelt. Es lassen sich Fertigungskosten von 0,11 €/mm²-Struktur und ein Zeitanteil von 0,235 min/mm²-Struktur bestimmen, falls die vollständige Entwicklung einer komplexen, unregelmäßigen Struktur erforderlich ist und alle Segmente eine unterschiedliche Gestalt aufweisen. Bei geringeren Anforderungen an die Prozesskette sind erheblich reduzierte Kennwerte zu erwarten.

Arbeitsschritt	Anlagenaufwand pro Stunde [€]	Zeitbedarf der Anlage [min]	Bediener		Kostenanteil [€]
			Qualifikation	Zeitanteil [%]	
Vorbereitung, Messung und Datenexport der Lederprobe	20,80	20	Q _F	100	17,93
Messdatenaufbereitung	1,63	20	Q _F	100	11,54
Strukturerstellung, Segmentierung und STL-Erzeugung	1,63	210	Q _I	100	145,71
NC-Datenerstellung (Global- und Segment-Toolpath)	4,87	360	Q _I	20	77,22
Laserstrahlstrukturieren	25,86	500	Q _F	5	229,25
Nachbearbeitung	1,20	20	Q _F	100	11,40
		Summe = 1.130			Summe = 493,05

Tabelle 8-2: Zeit- und Kostenanteil beim sequenziellen Durchlauf der Prozesskette

Time and cost contingent with a sequential run of the process chain

Mit der konventionellen Prozesskette Ätzen (vgl. Bild 2-12) beträgt nach Angaben der industriellen Anbieter die Herstellungszeit einer Musterplatte mit einer vergleichbaren Lederstruktur inklusive Strukturerstellung etwa fünf Tage bei einschichtigem Betrieb. Der Kostenaufwand wird dabei mit ca. 1.600 € angegeben [ÄTZ07]. Dabei ist außerdem zu beachten, dass aufgrund der nicht durchgängigen Datenkette und der begrenzten Strukturflexibilität erhebliche Einschränkungen bei der Strukturabbildung und beim umsetzbaren Strukturdesign vorliegen. Bei der betrachteten Pilotanwendung 1 – Lederstruktur werden mit der hier entwickelten Prozesskette somit ein Zeitvorteil von 80 % und ein Kostenvorteil von 70 % gegenüber der konventionellen Ätzbearbeitung bei gleichzeitig höherer Flexibilität und Abbildungsqualität erzielt. Insbesondere bei hochkomplexen Bauteiloberflächen und aufwändigen Strukturdesigns führen diese Vorteile zu erheblichen Einsparpotenzialen innerhalb der Werkzeugfertigung.

Bei einer regelmäßigen Multiplikation (Kachelungsstrategie I) eines bereits vorhandenen STL-Segments der Strukturklassen II oder IV liegen erheblich kürzere Durchlaufzeiten und gesenk-

te Kosten vor, da die Strukturerstellung entfällt und nur ein Segment-Toolpath für die gesamte Bearbeitung erzeugt wird. Die NC-Datenerstellung eines Segments mit der Abmessung $20 \times 20 \times 0,1 \text{ mm}^3$ benötigt etwa 30 min. (Schichtparameter P3). Die Einrichtzeit der Strukturiermaschine und die Zeit für die Reinigung kann jeweils mit 20 Minuten festgelegt werden. Die Bearbeitungszeit eines Segments beträgt jeweils etwa 30 Minuten. Es lässt sich daher ein Kostenanteil von $0,04 \text{ €/mm}^2$ -Struktur und ein Zeitanteil von $0,092 \text{ min/mm}^2$ -Struktur festlegen.

8.2 Pilotbauteil 2: Musterplatte mit Strukturklasse I

Test application 2: reference panel with structure class I

Bei Pilotbauteil 2 handelt es sich ebenfalls um ein ebenes Musterplattenwerkzeug (1.2767). In dieses wird ein Strukturdesign der Strukturklasse I (synthetische Struktur) mit einer Abmessung von $80 \times 60 \times 0,1 \text{ mm}^3$ eingebracht. Die synthetische Struktur wird direkt im CAD-System als pixelbasierte 2D-Bildvorlage erstellt. Die Struktur weist mehrere Gestaltelemente auf, um die Strukturflexibilität der Prozesskette zu demonstrieren: stufenlose Strukturänderung im Randbereich (partielle Entformbarkeit), nahtloser Designwechsel innerhalb der Struktur (Morphing) und die Darstellung eines Logos. Das digitale Modell der Struktur zeigt Bild 8-4, wobei die gleiche Außenabmessung und Auflösung wie bei der zuvor betrachteten Lederstruktur vorliegt. Die Segmentierung erfolgt manuell. Aufgrund der vorliegenden Strukturklasse werden quadratische Segmente mit einer Abmessung von jeweils $20 \times 20 \text{ mm}^2$ erzeugt. Der Global-Toolpath wird manuell in einem Editor erstellt, wobei die Kachelungsstrategie II (Segment-Komplettbearbeitung) angewendet wird. Die Überführung der einzelnen Segmente ins STL-Datenformat (Dreiecksgröße $2 \text{ }\mu\text{m}$) erfolgt mit ArtCam Pro.

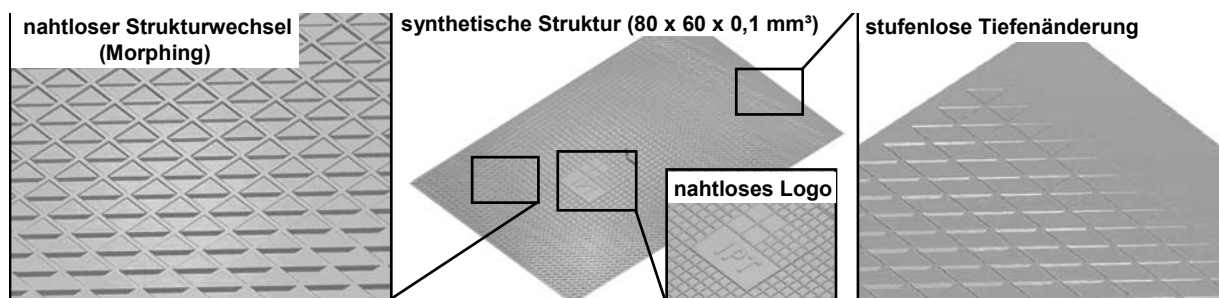


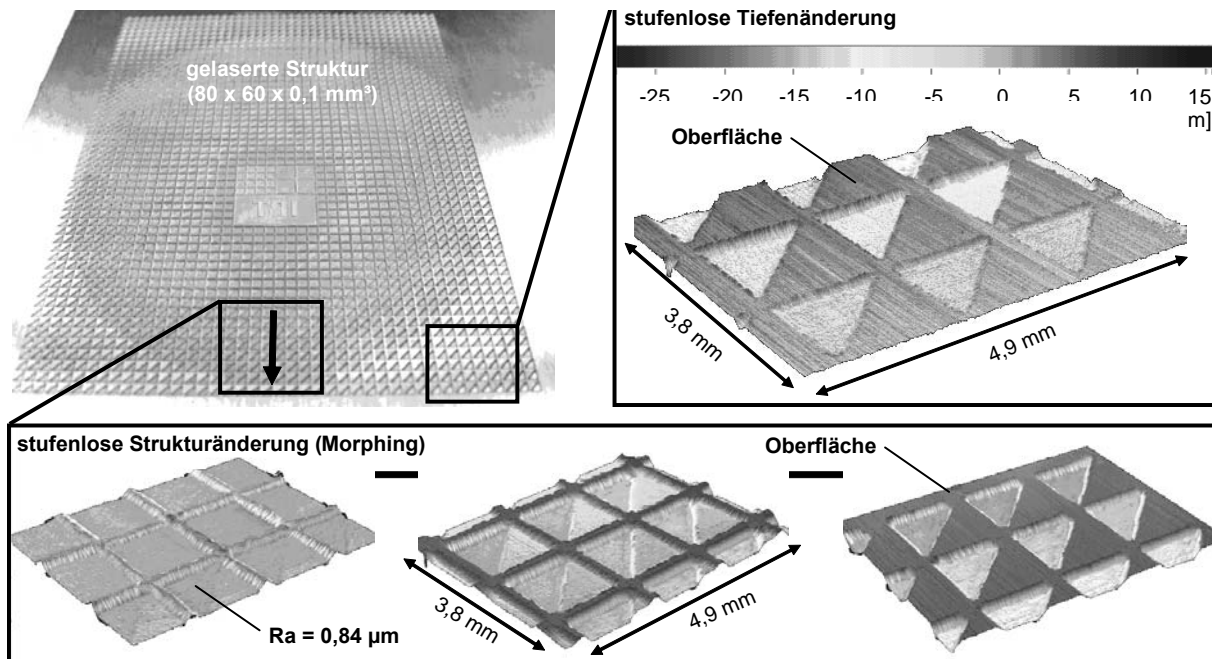
Bild 8-4: Im CAD erstellte synthetische Struktur mit Strukturfeatures

Synthetic structure with form features designed in CAD

Im CAM-System werden die jeweiligen Segment-Toolpaths im z' -Level-Constant-Machining mit dem Hauptbearbeitungsparameter, dem Schichtparameter P3 (Schichtdicke $2,5 \text{ }\mu\text{m}$) und der Stapelstrategie 1 erzeugt. Pro Segment liegen somit 39 Schichten vor, die in einem Toolpath zusammengefasst werden. Die Überführung in einzelne ISO-NC-Datensätze erfolgt im PP, wobei Datenmengen von bis zu 26 MByte auftreten. Da der NC-Profilier in der vorliegenden Entwicklungsstufe jedoch nur Datengrößen von bis zu 25 MByte sicher verarbeiten kann, müssen einige Segment-Toolpaths aufgeteilt werden. Bild 8-5 zeigt zum einen das großflächig strukturierte Musterplattenwerkzeug nach dem Reinigungsschritt und zum anderen eine messtechnische Erfassung ausgewählter Strukturdetails. Dabei wird ersichtlich, dass sowohl die Strukturänderung (Morphing) als auch der Strukturauslauf im Randbereich umgesetzt wurde.

Es sind keine Nahtstellen in der Struktur feststellbar. Anhand von Soll-/Ist-Vergleichen an verschiedenen Strukturdetails wird die Abbildungsgenauigkeit bestimmt (Wyko NT 1100). Im Mittel besteht eine Formabweichung von $+2,2 \%$ in der x' - y' -Ebene sowie entlang der z' -Achse. Die Rauheit R_a im Abtraggrund beträgt im Mittel $0,84 \text{ }\mu\text{m}$.

Die Durchlaufzeit der Prozesskette bei der Pilotanwendung 2 ist gegenüber der Pilotanwendung 1 um 1,5 h verringert, da aufgrund der Designstruktur ein geringeres Abtragsvolumen vorliegt. Die Kosten im Prozessschritt Strukturierung reduzieren sich daher entsprechend.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ μm}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie I

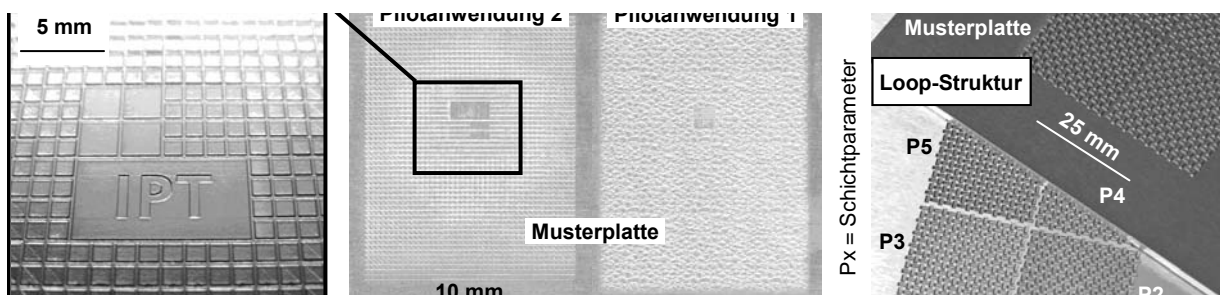
Bild 8-5: Vermessung von Strukturdetails (Wyko NT 1100)

Measuring of form features (Wyko NT 1100)

8.3 Abformung von Teststrukturen

Moulding of test structures

Die Leistungsfähigkeit des 3D-Segment-Prozesses zur großflächigen Herstellung abformbarer Strukturen in Werkzeugen wurde bereits innerhalb der Pilotbauteilbearbeitung gezeigt. Im Folgenden soll anhand von Abformungen der Pilotanwendungen und der Loop-Struktur (vgl. Bild 7-46) die Abformungsqualität von laserstrahlstrukturierten Oberflächen bestimmt werden. Bei der Loop-Struktur wurde der Schichtparameter P_x variiert, um die Ausbildung des Treppeneffekts untersuchen zu können. Bild 8-6 zeigt die abgeformten Kunststoffplatten.

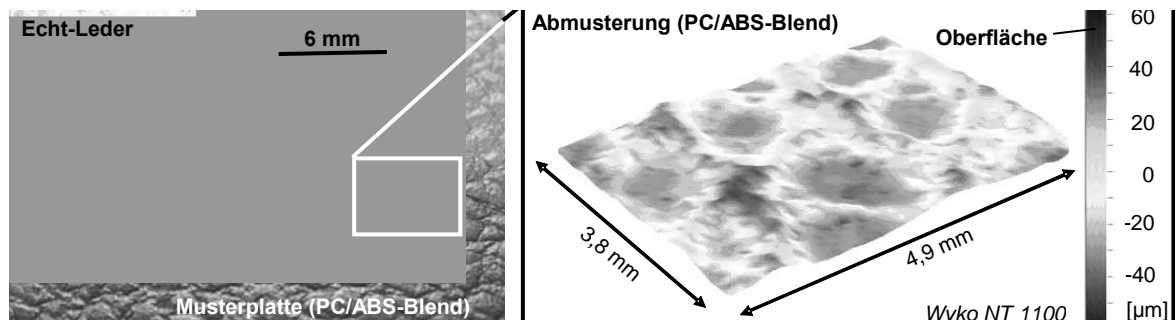


Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche $R_a = 0,45 \text{ μm}$; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie I; Einspritzzeit = 2 s; Werkzeugtemp. = $63,5^\circ\text{C}$; Massentemperatur = 240°C

Bild 8-6: Abformung der Pilotanwendungen 1/2 sowie der Loop-Struktur in PC/ABS-Blend

Moulding of test applications 1/2 and loop structure into PC/ABS-Blend

Aufgrund des unregelmäßigen Strukturcharakters der Pilotanwendung 1 (Leder 2) und der damit fehlenden Referenzmarken kann kein gesicherter Soll-/Ist-Vergleich zur Überprüfung der Abformgenauigkeit durchgeführt werden. Die Begutachtung erfolgt daher rein visuell (Bild 8-7). Bei einer Einspritzzeit von 2 s sind keinerlei Strukturfehler, wie Lufthaken oder Entformungsbeschädigungen, zu erkennen. Weiterhin sind keine Segmentnahtstellen feststellbar. Die Ausprägung in Form und Glanz entspricht der von konventionell hergestellten Strukturen.

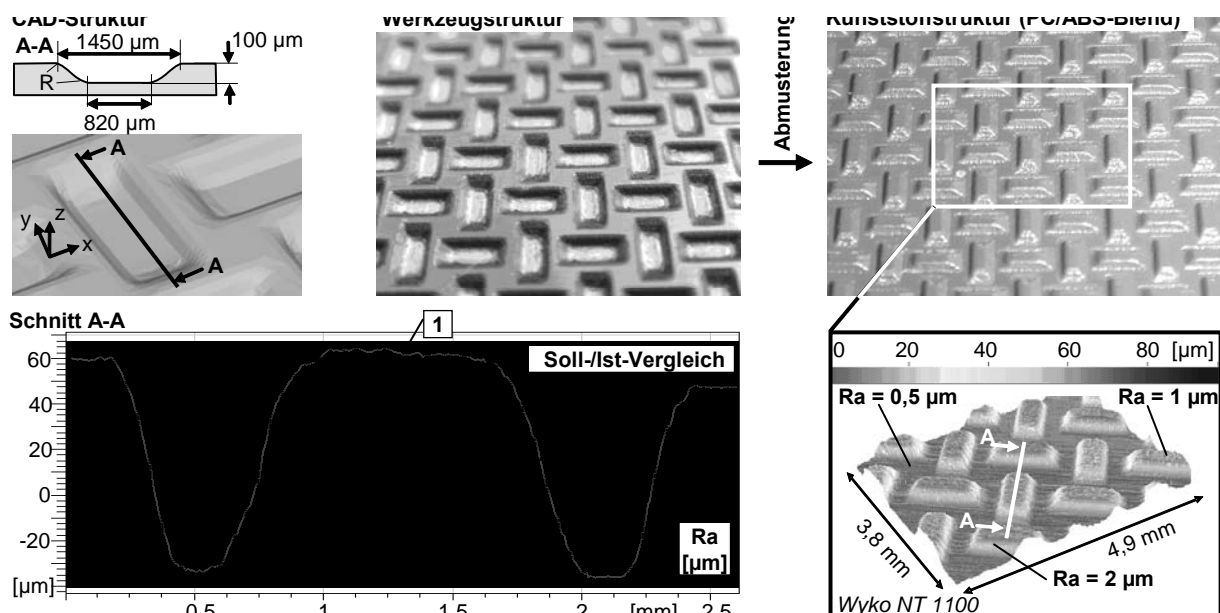


Werkzeugtemperatur = 63,5 °C; Massentemperatur = 240 °C, Einspritzzeit = 2 s

Bild 8-7: Abformung der Pilotanwendung 1 (Leder 2) in PC/ABS-Blend

Moulding of test application 1 (leather 2) into PC/ABS-Blend

Bei Strukturen mit einem regelmäßigen Formcharakter (Pilotanwendung 2 und Loop-Struktur) können grundsätzlich Soll-/Ist-Vergleiche zur Überprüfung der Abformgenauigkeit durchgeführt werden. Dabei ist neben der Strukturabbildung die Oberflächenrauheit Ra von großem Interesse (Glanzgrad). Mit den verfügbaren Messmitteln (Wyko NT 1100, SiScan MC64) liegt jedoch bei der Pilotanwendung 2 eine unzureichende Messdatenqualität vor, welche durch die steilen Flankenwinkel begründet ist. Diese Problematik ist bei der Loop-Struktur nicht gegeben, so dass dort ein gesicherter Soll-/Ist-Datenvergleich erfolgen kann (Bild 8-8).



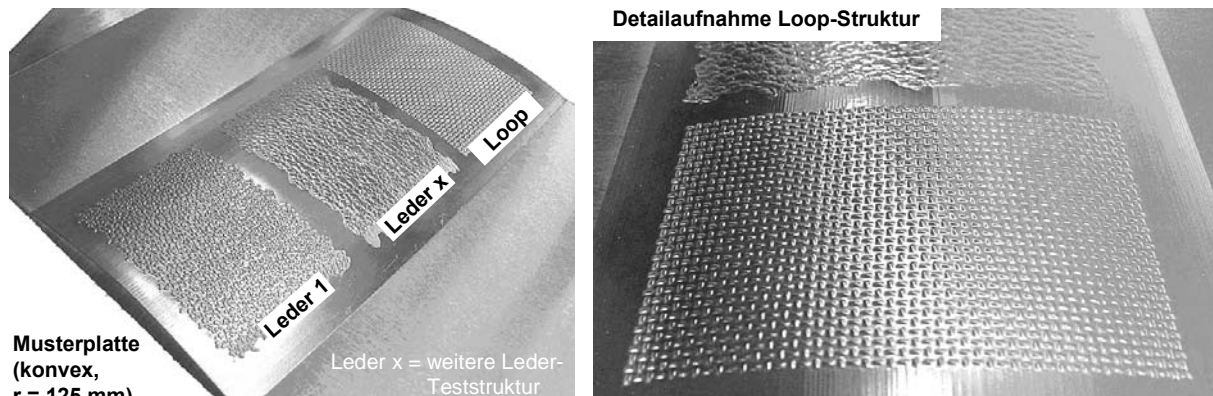
Werkzeugtemperatur = 63,5 °C; Massentemperatur = 240 °C, Einspritzzeit = 2 s

Bild 8-8: Abformung der Loop-Struktur in PC/ABS-Blend und Soll-/Ist-Vergleich

Moulding of the loop structure into PC/ABS-Blend and variance comparison

Die bei der Kunststoffstruktur gemessenen Oberflächenrauheiten Ra decken sich mit denen im Werkzeug. Es sind keinerlei Strukturbeschädigungen durch die Entformung zu erkennen. Im Flankenbereich sind keine Auswirkungen des gewählten Schichtparameters auf die Ausbildung des Treppenstufeneffekts erkennbar. Die Kunststoffstruktur weist gegenüber der Werkzeugstruktur eine geringfügig verkleinerte Form auf. Diese Abweichung kann dabei mit kleiner als 1 % angegeben werden und ist auf die Schwindung des Kunststoffes zurückzuführen. Aus dem Vergleich von Kunststoffstruktur mit CAD-Struktur lässt sich somit die tatsächliche Formgenauigkeit für den 3D-Segment-Prozess bestimmen, diese kann mit einer Strukturvergrößerung von 1 % im Mittel angegeben werden. Die Schwindung des Kunststoffes kompensiert dabei zum Teil die Strukturvergrößerung durch den 3D-Segment-Prozess.

Bild 8-9 zeigt eine Kunststoffoberfläche, die von dem in Kapitel 7.4.2 strukturierten konkaven Bauteil abgemustert wurde. Bei einer visuellen Begutachtung dieser Oberfläche können zum einen keine Kachelungsfehler und zum anderen ein einheitlicher Glanzgrad festgestellt werden. Insbesondere ein homogener Glanzgrad deutet auf eine hohe Präzision und Reproduzierbarkeit bei der Herstellung der Strukturen hin. Die Prozesskette ist also für eine großflächige, nahtlose und gleichmäßige Strukturierung von gewölbten Oberflächen geeignet.



Werkzeugtemperatur = 63,5 °C; Massentemperatur = 240 °C, Einspritzzeit = 2 s

Bild 8-9: Abformung einer konkaven, strukturierten Oberfläche (PC/ABS-Blend)

Moulding of a concave, structured surface (PC/ABS-Blend)

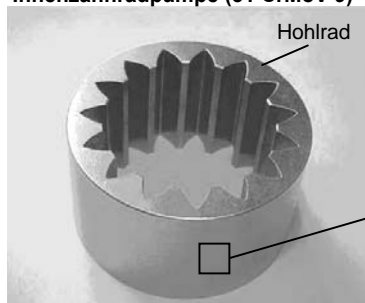
8.4 Übertragung der Prozesskette auf andere Anwendungen

Transfer of the process chain onto other applications

8.4.1 Tribologisch wirksame Strukturen: Innenzahnradpumpe

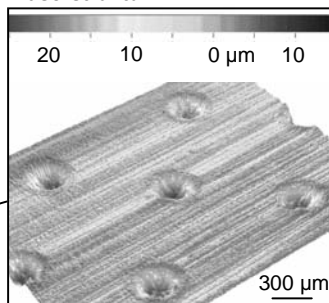
Tribologically effective structures: internal cog-wheel pump

Innenzahnradpumpe (31 CrMoV 9)



Außen-Durchmesser 58 mm; Höhe 33 mm

Laserstruktur



Wyko NT 1100

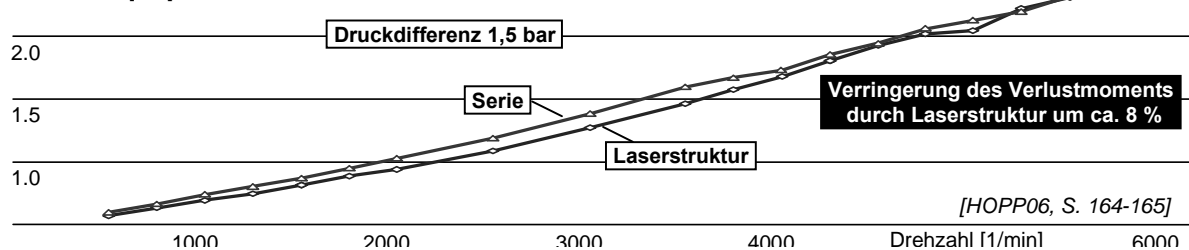
Strukturierung

- Mantelfläche des Hohlrads
- Einzelstrukturdurchmesser: 300 µm
- Einzelstrukturtiefe: 20 µm
- Strukturabstand: 600 µm
- Laserparameter: $I_A = 40$ A; $f_p = 40$ kHz
- nacharbeitsfrei

Fertigungsprozess

- Design-Erstellung = 15 min
- Programmieraufwand NC-Daten = 30 min
- Einrichtaufwand = 10 min
- Bearbeitungsaufwand = 30 min
- **gesamter Zeitaufwand = 85 min**

2.5 Moment [Nm]



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{Ref} = -71,655$ mm; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; gewölbte Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,38$ µm; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie II

Bild 8-10: Pilotanwendung – Innenzahnradpumpe und Tribometerversuch

Test application – internal cog-wheel pump and tribological test

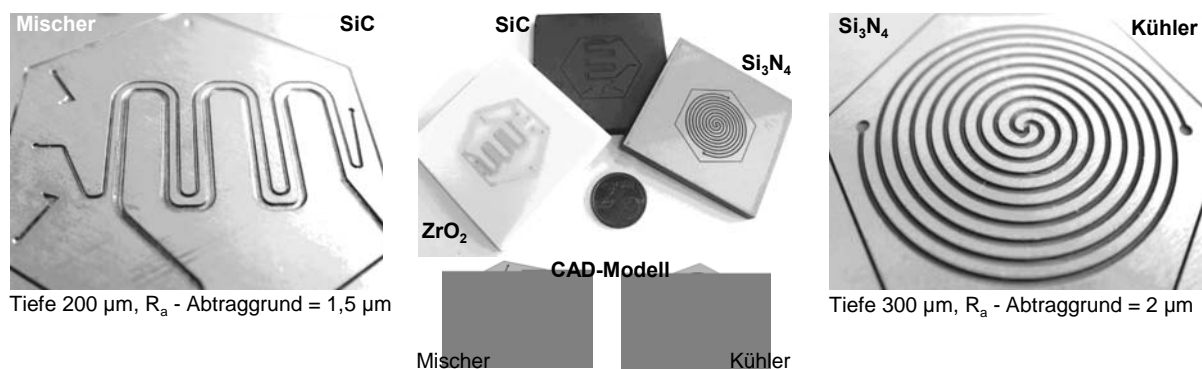
Das in Bild 8-10 dargestellte Hohlrad einer Innenzahnradpumpe dient zur Förderung von Getriebeöl in einer automobilen Anwendung und ist in einem Radialgleitlager gelagert. Durch Mikroschmieraschen sollen Reibverluste im Schmierpalt verringert werden. Am IFAS der RWTH Aachen wurde dafür eine spezielle Mikrostruktur ausgelegt, welche durch den hier erarbeiteten 3D-Segment-Prozess in die Mantelfläche des Hohlrads eingebracht wurde. Es handelt sich dabei um kreisförmige Strukturen mit einem Durchmesser von 300 μm und einer Tiefe von 20 μm . Die Einzelstrukturen sind in einem Abstand von 600 μm angelegt und in einem Fünfer-Würfelmuster angeordnet. Der gesamte Durchlauf der Prozesskette, beginnend bei der Design-Erstellung bis hin zur Fertigung betrug insgesamt 85 min, was einen Kostenanteil von ca. 50 € hervorruft. Obwohl die Bearbeitungsparameter nicht speziell auf den veränderten Werkstoff (31 CrMoV 9) angepasst wurden, weist das Abtragergebnis eine hohe Qualität auf. Anhand eines Prüfstandlaufs konnte festgestellt werden, dass durch den Einsatz der Laserstruktur eine Verringerung des Verlustmoments von ca. 8 % gegenüber der Serienpumpe (geschliffen) vorliegt (Bild 8-10). Darüber hinaus stellt sich innerhalb der Messkurve kein Mischreibungsbereich ein. Diese Pilotanwendung zeigt die Potenziale der Prozesskette zur Herstellung tribologisch wirksamer Mikrostrukturen in hydraulischen Anwendungen, insbesondere wenn Prototypen oder Kleinserien angefertigt werden sollen.

8.4.2 Mikroreaktionstechnik: Keramisches Funktionsmodul

Micro-reaction technology: ceramic function module

Aufgrund der hohen chemischen Medienbeständigkeit werden in der Mikroreaktionstechnik überwiegend Keramiken eingesetzt. Dabei werden u. a. standardisierte mikrofluidische Bauteile in Form von Modulen verwendet. Mikroreaktionstechnik in Baukastenform stellt jedoch nur so lange einen Vorteil dar, wie sie für den Anwender einen Gewinn an Funktionalität, Handhabung und Einsatzvielfalt mit sich bringt. Dabei ist die schnelle Verfügbarkeit von Modulen mit unterschiedlichen Designs entscheidend [LÖBB04]. Die derzeitige Herstellung von Modulen ist jedoch durch den konventionellen Fertigungsprozess wie z. B. Pressen \rightarrow Grünling mechanisch bearbeiten (Oberflächenstruktur) \rightarrow Sintern \rightarrow mechanische Nachbearbeitung (Schleifen) insbesondere bei kleinen Stückzahlen und häufig wechselnden Oberflächendesigns sehr zeit- und kostenintensiv [MORI05].

Mit der hier entwickelten Prozesskette kann der Fertigungsprozess für keramische Module um ein Vielfaches beschleunigt werden. Ausgangsbasis ist dabei ein handelsübliches keramisches Halbzeug in Form einer Platte, in der mit dem 3D-Segment-Prozess anwendungsbezogene Oberflächenstrukturen nacharbeitungsfrei eingebracht werden können. Im Rahmen einer exemplarischen Testbearbeitung wurden zwei unterschiedliche Designs (Kühler und Mischer) in drei verschiedene Keramiken (Si_3N_4 , ZrO_2 (gelb), SiC) eingebracht (Bild 8-11). Neben der Erweiterung des Anwendungsfeldes wird damit die Leistungsfähigkeit des Laserstrahlstrukturierens für die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen, hier Keramik, gezeigt.



Hauptbearbeitungsparameter; $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; ebene Oberfläche poliert; Schichtparameter P3; z¹-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1;

Bild 8-11: Durch Prozesskette hergestellte keramische Module

Ceramic modules produced with process chain

Es wurden keine speziellen Untersuchungen zur Parameteroptimierung der verwendeten Prozessparameter durchgeführt. Bei allen Proben wurden der Hauptbearbeitungsparameter, der Schichtparameter P3 und die Stapelstrategie 1 genutzt, lediglich die Schichtanzahl wurde gemäß der materialspezifischen Absorption variiert. Durch eine gesonderte Parameteroptimierung, insbesondere hinsichtlich der Laserstrahlintensität und der Wellenlänge, sind erhebliche Prozessoptimierungen zu erwarten. Tabelle 8-3 zeigt die erzielten Abtragergebnisse.

Material	Schichttiefe s [µm]	Rauheit Ra im Abtraggrund [µm]	Absorption ($\lambda = 1064$ nm)	Bemerkung
ZrO ₂ (gelb)	10	1,4	0,15	kein homogener Abtrag, zum Teil lokale bräunliche Verfärbung und Strukturausbrüche
Si ₃ N ₄	100	2	0,9	homogener und gleichmäßiger Abtrag
SiC	10	1,5	0,8	homogener und gleichmäßiger Abtrag

Hauptbearbeitungsparameter; Z_{Ref} = -71,655 mm; T = 23°C; ebene Oberfläche poliert; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie II; Absorptionsmessung durch 2-Strahl-Spektralphotometer (Fläche 1 cm²)

Tabelle 8-3: Erzielte Abtragergebnisse für keramische Bauteile

Achieved ablation results of ceramic parts

Die erzielten Rauheiten Ra im Abtraggrund sind für die Anwendung vertretbar, sollten jedoch für einen realen, industriellen Einsatz minimiert werden. Vor allem bei der Bearbeitung von ZrO₂ (gelb) kann durch die Nutzung einer Wellenlänge von $\lambda = 256$ nm (Frequenzvervierfachung) die Absorption bis auf 0,4 gesteigert werden, so dass eine homogenere Energieeinkopplung erzielt werden kann. Falls eine derartig kurze Wellenlänge nicht verfügbar ist, kann durch Einfärbung der Keramik z. B. mit Graphit die Absorption auf etwa 0,9 gesteigert werden. Der Durchlauf der Prozesskette (Design-Erstellung, NC-Datengenerierung und Fertigung) benötigte für alle sechs Bauteile insgesamt 90 min (Kostenanteil je Bauteil ca. 10 €). Diese Pilotanwendung zeigt die hohe Leistungsfähigkeit der Prozesskette im Hinblick auf eine Verkürzung der Durchlaufzeiten und die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen, wodurch das Anwendungsspektrum erheblich erweitert wird.

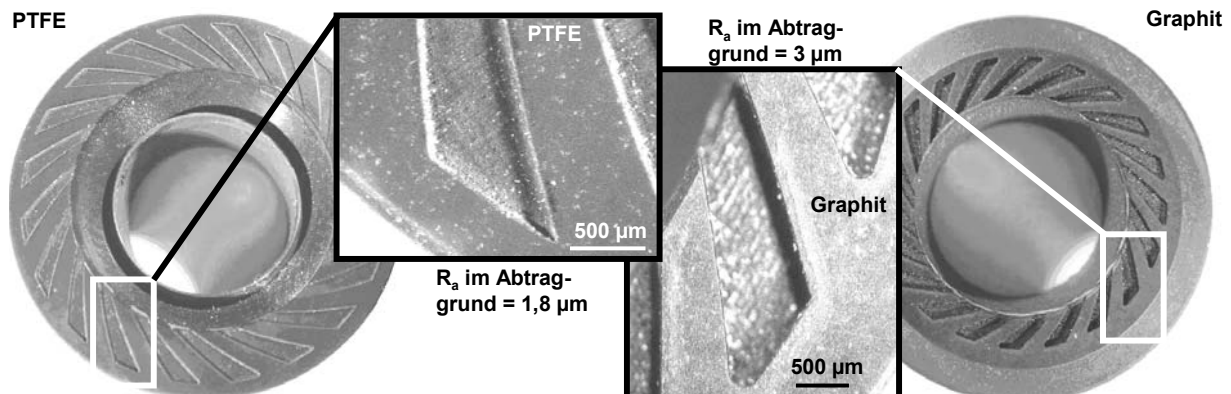
8.4.3 Aerostatisch wirksame Strukturen: Gleitringdichtung

Aerostatically effective structures: bearing ring seal

Bei aerostatischen Gleitringdichtungen werden der Verschleiß und die Verlustleistung maßgeblich durch die auftretende Reibung in der Anlaufphase (keine Trennung der Oberflächen) bestimmt. Durch ein spezielles Oberflächendesign kann schon bei niedrigsten Geschwindigkeiten eine frühzeitige Trennung der Gleitringdichtungspaarung erfolgen, so dass die Verluste und der Verschleiß minimiert werden können. Eine vom Anwender vorgegebene Oberflächenstruktur im STL-Format – Turboladergeometrie – wurde dazu mit Hilfe des 3D-Segment-Prozesses jeweils in ein Graphit- und in ein PTFE-Bauteil eingebracht. Aufgrund der geringen Abmessungen der Bauteile ist eine Kachelung der Strukturen nicht notwendig. Die Strukturen weisen unterschiedliche Tiefen (PTFE = 50 µm, Graphit = 100 µm) und Strukturdetails auf. Da es sich hier um Materialien aus einer anderen Werkstoffklasse handelt, müssen jeweils angepasste Bearbeitungsparameter gefunden werden.

- Graphit weist im Vergleich zu Stahl eine weitaus höhere Absorption auf ($\lambda = 1064$ nm, $A > 0,9$), so dass größere Abtragsvolumina pro Laserpuls zu erwarten sind. In Vorversuchen wurde ein homogener Abtrag mit einer Schichttiefe von 10 µm bei einem Pumpstrom von $I_A = 25$ A, einer Pulsfolgefrequenz von $f_P = 40$ kHz sowie mit Schichtparameter P4 und Stapelstrategie 1 erarbeitet. Der Segment-Toolpath weist somit 10 Schichten auf.
- PTFE (Teflon) weist im Vergleich zu Stahl zwar eine wesentlich geringere Absorption ($\lambda = 1064$ nm, $A \approx 0,15$) auf, aber durch die deutlich geringere Schmelztemperatur von ca. 327 °C besteht beim Laserstrahlstrukturieren grundsätzlich die Gefahr der Materialzerstörung durch chemisch bedingte Zersetzung oder durch Brand [HUBE03]. Die Ablationsprodukte sind zudem hochgradig gesundheitsschädlich (z. B. CoF₂), so dass mit einer Absau-

gung (Aktivkohlefilter) gearbeitet werden muss. In Vorversuchen wurde ein homogener Abtrag mit einer Schichttiefe von $5\ \mu\text{m}$ bei einem Pumpstrom von $I_A = 20\ \text{A}$, einer Pulsfolgefrequenz von $f_P = 40\ \text{kHz}$ sowie mit Schichtparameter P5 und Stapelstrategie 1 erarbeitet. Mit diesen Parametern wurde der Segment-Toolpath mit 10 Schichten erzeugt.



Hauptbearbeitungsparameter; Arbeitsabstand $Z_{\text{Ref}} = -71,655\ \text{mm}$; $T = 23^\circ\text{C}$; Schichtparameter variiert; z' -Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie II

Bild 8-12: Pilotanwendung – Gleitringdichtung aus PTFE und Graphit

Test application – bearing ring seal made from PTFE and graphite

Bild 8-12 zeigt die mit der Prozesskette gefertigten oberflächenstrukturierten Bauteile aus PTFE (links) und Graphit (rechts). Die hohe Abtraggenauigkeit zeigt sich durch die Ausbildung von scharfen Kanten und durch die erzielten Rauheiten R_a im Abtraggrund. Die Durchlaufzeit der Prozesskette für die Bearbeitung der Bauteile betrug jeweils ca. 60 min (Kostenanteil jeweils ca. 42 €). Die beiden Pilotanwendungen zeigen insbesondere die Leistungsfähigkeit der Prozesskette im Hinblick auf die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Materialien, wodurch ebenfalls das Anwendungsspektrum erweitert wird.

8.5 Fazit

Conclusion

Anhand der durchgeführten Pilotanwendungen wurde die hohe technologische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der entwickelten Prozesskette für die großflächige und konturnahe Fertigung von Strukturen sowohl in ebenen als auch in gewölbten Oberflächen gezeigt. Nach der Herstellung der Strukturen liegt eine mittlere Formabweichung von $+2,2\ \%$ gegenüber dem CAD-Modell vor. Die Rauheit R_a im Abtraggrund beträgt dabei im Mittel $0,84\ \mu\text{m}$. Es liegen keine Nahtstellen oder Strukturfehler vor, so dass der Prozesskette eine hohe Reproduzierbarkeit und Robustheit zugesprochen werden kann. Die abgeformten Strukturen weisen gegenüber dem CAD-Modell sogar eine reduzierte Formabweichung von $+1\ \%$ auf, was auf die werkstoffspezifische Schwindung des Kunststoffes (hier PC/ABS) zurückzuführen ist. Je nach Strukturdatenbasis – Referenzoberfläche oder CAD-Datenmodell – liegt ein Kostenanteil von $0,04$ bis $0,11\ \text{€/mm}^2$ -Struktur und ein Zeitanteil von $0,092$ bis $0,325\ \text{min/mm}^2$ -Struktur vor. Bei der Pilotanwendung 1 führt dies zu einem Zeitvorteil von $80\ \%$ und einem Kostenvorteil von $70\ \%$ gegenüber der konventionellen Ätzbearbeitung bei gleichzeitig höherer Flexibilität und Abbildungsqualität.

Neben der Hauptanwendung – abformbare Designstrukturen in Spritzgießwerkzeugen – können mit der Prozesskette weitere Branchen bedient werden: Tribologie, Aerodynamik sowie Bio- und Medizintechnik. Dabei konnte die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen, wie Kunststoff, Graphit oder Keramik, und somit eine Erweiterung der Fertigungsmöglichkeiten gezeigt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde erfolgreich eine ganzheitliche, auf konturnahem 3D-Laserstrahlstrukturieren basierende Prozesskette zur flexiblen, großflächigen und abbildungsgenauen Herstellung von komplexen Strukturen in ebenen und gewölbten Oberflächen entwickelt und in Form eines funktionstüchtigen Maschinendemonstrators umgesetzt. Durch die realisierte durchgängige Datenkette liegt eine geringe Fehlerfortpflanzung vor. Eine hohe Anwenderfreundlichkeit wird durch eine zentrale Technologiedatenbank und durch unterstützende Softwareapplikationen sichergestellt. Anhand unterschiedlicher Pilotanwendungen aus den Bereichen Werkzeug- und Formenbau, Tribologie, Aerodynamik und Bio-/Medizintechnik konnte sowohl die technologische als auch die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Prozesskette aufgezeigt werden. Die Prozesskette ermöglicht es, schnell – eventuell über Nacht – ein reales Muster einer neu entwickelten Designstruktur für optische und haptische Beurteilungen zur Verfügung zu stellen. Durch ihre hohe Flexibilität ist die Umsetzung bisher nicht realisierbarer Designs und Oberflächenmerkmale möglich. Grundsätzlich ist die Prozesskette zur Bearbeitung großflächiger Bauteile wie z. B. automobiler Innenraumbauteile einsetzbar. Die hier erarbeiteten Erkenntnisse können auch auf andere Urformverfahren, wie z. B. Vakuumguss oder Slush-Moulding, übertragen werden, weil stets strukturierte Werkzeuge benötigt werden.

Als Maschinendemonstrator wurde eine bestehende 5-Achs-Fräsmaschine mit einem aus 3-Achs-Scanner und Laserstrahlquelle bestehenden Lasermodul modular erweitert. Durch ein spezielles Profibus-System und eine NC-Befehlsenerweiterung wurde eine steuerungstechnische Verknüpfung aller Systemkomponenten realisiert. Bei der Inbetriebnahme wurde eine Justage des Strahlengangs und eine Leistungs-Zeit-bezogene Untersuchung aller Betriebsparameter vorgenommen. Durch eine Anpassung der Kompensationstabellen konnte eine Halbierung der werkseitigen Positioniergenauigkeiten der translatorischen Handhabungsachsen erzielt und damit die Maschine optimal an die neuen Bedingungen angepasst werden.

Die Prozesskette nutzt als Kernstrategie den in dieser Arbeit entwickelten 3D-Segment-Prozess, der auf einer sequenziellen und synchronisierten Abarbeitung einzelner Segmentfelder basiert. Der 3D-Segment-Prozess ermöglicht es, die bestehenden technologischen Restriktionen bei der laserstrahlbasierten Oberflächenstrukturierung aufzuheben. Dazu zählen insbesondere die stark limitierte Datenmenge, die ausschließlich ebene Bearbeitung von Bauteilen mit kleinen Abmessungen sowie die mangelnde Umsetzung komplexer 3D-Strukturen.

Zur Strukturentwicklung wurden zwei Vorgehensweisen erarbeitet: Messtechnisch aufgenommene Referenzstrukturen und digitale Erstellung im CAD. Insbesondere das konfokale Mikroskop Siscan MC64 eignet sich aufgrund seiner hohen Datenqualität und Datenaufnahmegeschwindigkeit und des großen Messbereichs zur Datenakquisition. Es wurden geeignete Arbeitsfolgen zur Datenaufbereitung und -weiterverarbeitung entwickelt. Die direkte Strukturerstellung im CAD weist eine nahezu uneingeschränkte Strukturfreiheit auf, welche jedoch viel Erfahrung beim Anwender voraussetzt. Im Vergleich zu gemessenen Strukturen weisen CAD-Strukturen geringere Datenmengen und eine höhere Datenqualität auf. Außerdem ermöglicht CAD eine bauteilangepasste Strukturentwicklung und eine Berücksichtigung technologischer Randbedingungen seitens des Laserstrahlstrukturierens und des Abformungsverfahrens.

Für die Strukturmultiplikation wurde ein einheitlicher Algorithmus zur Erzeugung der Kachelfähigkeit von Struktursegmenten weiterentwickelt: die Quadranten-Austausch-Methode. Zur digitalen Strukturübertragung auf Oberflächen wird das nahezu verzerrungsfreie Displacement Mapping mittels u/v-Height-Map eingesetzt. Für die Segmentierung der strukturierten Oberfläche wurde eine allgemeingültige Vorschrift erarbeitet, welche die Randbedingungen sowohl des Lasermoduls als auch der Prozesstechnologie berücksichtigt. Für deren automatisierte Anwendung wurde ein Splitter-Modul-Konzept entwickelt. Die ISO-NC-Datengenerierung des Global- und des Segment-Toolpaths kann mit Hilfe von bestehenden CAM-Funktionalitäten durchgeführt werden. Das speziell entwickelte Scanner-Back-End überführt die Kommandos

des Segment-Toolpaths in für das Lasermodul verständliche Befehle, steuert zudem das Lasermodul und kommuniziert mit der CNC/SPS zur Sicherstellung des 3D-Segment-Prozesses.

Die wesentlichen Ergebnisse der prozesstechnologischen Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren sind zum einen die definierten, greifbaren Laserparametersätze in Form von Laser-Tools in der zentralen Prozess- und Technologiedatenbank zur Entlastung des Anwenders und zum anderen die Entwicklung umfassender Bearbeitungsstrategien zur nahtlosen, großflächigen und abbildungstreuen Bearbeitung ebener und gewölbter Oberflächen.

Innerhalb der theoretischen Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren konnte ein modellhafter Zusammenhang zwischen der Abtragqualität/-quantität und der Strahlintensität aufgestellt werden. Das optimale Prozessfenster – geringste Schmelzablagerungen und kleinste WEZ bei maximierter Abtragleistung – befindet sich oberhalb der Verdampfungs- und unterhalb der Plasmaabschirmschwellintensität. Anhand umfangreicher Versuche mit Einzelpulsen, Abtraggräben und Abtragquadern konnte dementsprechend ein optimaler Hauptbearbeitungsparameter ($f_p = 40 \text{ kHz}$, $I_A = 30 \text{ A}$, $I_{M,Laser} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$) definiert werden. Auf dieser Basis wurden zur Herstellung mehrschichtiger Abträge spezielle Schichtparameterkombinationen (Px) aus dem Pulsabstand S (25-50 %) und dem Hatch/Bahnabstand H (25-62,5 %) gebildet, welche in Verbindung mit der Zick-Zack-Strategie und der Stapelstrategie 1 (Bahnorientierung 90° alternierend) die geringsten Oberflächenrauheiten und Schmelzrandhöhen, die höchsten Abtragraten sowie konstante Schichtdicken erzielen. Der Schichtparameter P3 (Schichttiefe $s = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$; Abtragsvolumenrate $V_{Abtrag} = 0,572 \text{ mm}^3/\text{min}$ und Rauheit R_a im Abtraggrund $0,61 \text{ }\mu\text{m}$) stellt das Parameteroptimum dar, u. a. weil dieser die geringste Ausbildung des Treppenstufeneffekts aufweist. Eine oberflächennahe Aufhärtung des Grundgefüges ist nicht feststellbar, es liegt lediglich eine Weiße Schicht – Martensit/Zementit – mit einer Dicke zwischen $2,4\text{-}5,8 \text{ }\mu\text{m}$ vor (bei P3 minimal). Der auf der Oberfläche niedergeschlagene Abtragrückstand – Eisen(III)-Oxid – kann durch eine HCL-Lösung strukturschonend entfernt werden.

Die herstellbare maximale Strukturauflösung bzw. minimale Abbildungslänge von NC-Bahnen beträgt $100 \text{ }\mu\text{m}$. Innerhalb eines Segments können gewölbte Flächen mit einem Krümmungsradius $r_{min,real}$ von bis zu 60 mm reproduzierbar und mit hoher Qualität bearbeitet werden. Zur Segmentfeldkachelung wurden spezielle Strategien entwickelt, die Strategieauswahl erfolgt in Abhängigkeit von der vorliegenden Oberflächen- und Strukturform. Grundsätzlich liegt bei Verwendung der Kachelungsstrategie I – Schicht-Komplettbearbeitung – und von nichtlinearen, freigeformten Segmenträndern die geringste Anzahl und Ausprägung von Nahtfehlern vor, die zum größten Teil nicht mehr messtechnisch lokalisiert werden können. Die gelaserten Strukturen weisen eine mittlere Formabweichung von $2,2 \text{ }\%$ gegenüber dem CAD-Modell auf. Die in Kunststoff abgeformten Strukturen verfügen über eine hohe Qualität und zeichnen sich durch eine reduzierte, schwindungsbedingte Formabweichung von nur $1 \text{ }\%$ aus. Je nach Strukturdatenbasis – Referenzoberfläche oder CAD-Datenmodell – liegt ein Kostenanteil von $0,04$ bis $0,11 \text{ €/mm}^2$ -Struktur und ein Zeitanteil von $0,092$ bis $0,325 \text{ min/mm}^2$ -Struktur vor. Dies führt zu einem Zeitvorteil von bis zu $80 \text{ }\%$ und einem Kostenvorteil von bis zu $70 \text{ }\%$ gegenüber der konventionellen Ätzbearbeitung bei gleichzeitig höherer Flexibilität und Abbildungsqualität.

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit und der industriellen Akzeptanz sowie die Ausweitung des Anwendungsbereichs der hier entwickelten Prozesskette erfordern vielfältige Anschlussarbeiten in unterschiedlichen Teilbereichen. Dazu zählt die Neuentwicklung eines speziellen CAM-Systems, welche die Berechnungszeiten von NC-Bahnen deutlich reduziert und neue, spezialisierte Funktionalitäten (z. B. Constant-to-Contour-Machining) aufweist. Weiterhin wird eine softwareunterstützte Segmentierung mit Anbindung an ein CAM-System benötigt. Die Erschließung neuer Anwendungsfelder erfordert die Ausweitung der Technologiedatenbank hinsichtlich zusätzlicher Werkstoffe und anderer Laserstrahlquellen, wie den fs-/ps-Laser. Durch eine Optimierung von Verfahrensabläufen, eine Nutzung von Lasern mit höheren Puls wiederholraten und durch den Aufbau einer serientauglichen, hinsichtlich des 3D-Segment-Prozesses vollständig neu aufgebauten Maschine sind weitere Zeit- und Kosteneinsparungen möglich. Insbesondere in der Scannertechnologie bestehen große Entwicklungspotenziale.

9 Summary and Overview

A comprehensive manufacturing process with which to produce flexible, large surface and precise complex structures on flat and curved surfaces was successfully developed based on near net 3D laser structuring and implemented in the form of a fully functional demonstrational machine. The single data stream running through the entire process reduces error propagation. The system is very user friendly due to a central technology database and support software applications. Different pilot applications in the fields of tool and die making, tribology, aerodynamics and bio-/medical technology verified both the technological and economic performance of the process convincingly. With this manufacturing process, it is possible to quickly generate a real sample of a newly developed design structure for optical and haptical evaluation, possibly even over night. This highly flexible system can also produce design and surface characteristics that were previously impossible to generate. In general, the manufacturing process is designed to produce large surface components such as automobile control panel tools. The findings resulting from this work can also be applied to other forming techniques such as vacuum casting or slush molding, where structuring tools are always needed.

The demonstrational machine consists of an existing 5-axis milling machine and incorporates modules for a 3-axis scanner and a laser beam source. A special profibus system and an extended NC command unit link the controls for all the system components. On commissioning, the beam path was adjusted and power/time based investigations were carried out for all operating parameters. By modifying the compensation tables, it was possible to halve the factory-set positioning accuracy in the translative motion axes, which made the machine ideally suited to the new operations.

The strategy for the entire processing chain is based on the 3D segment process developed over the course of this work, which in turn is based on the innovative, sequential and synchronized treatment of the individual segment fields. The 3D segment process compensates for the existing technological restrictions in the field of laser-based surface structuring. These restrictions include the extremely limited amount of data, the ability to only machine small components in one plane and the inability to cope with complex 3D structures.

Two approaches were taken in terms of structural development: reference structures generated metrologically and digital generation via CAD. The confocal microscope Siscan MC64 is particularly suited to the first task because of the high level of data quality, the high data registration speed and the large measuring range during data acquisition. The appropriate order for data preparation and processing was also developed. The second approach – generating structures directly in CAD – allows for the creation of almost any possible structure, although the user requires a good deal of experience. In comparison to the measured structures, CAD structures generate less data of a higher quality. CAD can also be used to modify the structure to suit the component while taking the technological parameters (of laser beam structuring and matching processes) into account.

A uniform algorithm for tiling the structural segments – the quadrant exchange method – was developed in order to multiply the structures. Displacement mapping and u/v height map, which are virtually distortion-free, are used to digitally transfer the structures onto the surfaces. The structured surface is segmented using a universal rule that takes the boundary conditions of both the laser module and the process technology into account. A splitter module concept was developed to automate the application. The ISO-NC data for the global and the segment toolpaths can be generated with the aid of existing CAM functions. The specially developed scanner back-end converts the segment toolpath commands into commands which the laser module can understand and, at the same time, controls the laser module and communicates with the CNC/SPS in order to execute the 3D segment process.

The main results of the investigations into the laser structuring process technology are twofold: defined, concrete laser parameter sets saved as 'laser tools' within the central process and technology database make it easier to operate the system, and comprehensive processing strategies with which to generate seamless, large structures on flat and curved surfaces true to the original structure.

As part of the theoretical investigations into laser beam structuring, a model of the relationships between material removal quality/quantity and beam intensity was developed. The optimum process windows with the least melt deposits and smallest HIZ by the maximum rate of material removal, lies above the vaporation threshold intensity and below the plasma shielding threshold intensity. Extensive trials using single pulses, ablated grooves and ablated three dimensional structures were used to define the optimum processing parameters ($f_p = 40$ kHz, $I_A = 30$ A, $I_{M,Laser} = 4.3 \cdot 10^9$ W/cm²). This provided the basis for the definition of special layer parameter combinations (Px) consisting of pulse distance S (25 - 50 %) and hatch/path distance H (25 - 62.5 %). These were used to produce multi-layer cuts, which, when combined with the zigzag strategy and the stacking strategy 1 (alternating 90° path orientation), resulted in the lowest surface roughness and lowest melt deposits, the highest removal rates and a constant layer thickness. The doorstep effect is least evident when processing using layer parameter P3 (layer depth $s = 2.5$ µm; material removal rate $V_{Abtrag} = 0.572$ mm³/min and roughness Ra at the base 0.61 µm), making it the optimum parameter combination. There is no increase in primary structure hardness close to the surface; a white martensite/cementite layer between 2.4 and 5.8 µm thick is all that is evident (only minimal at P3). The ferric(III) oxide residue left on the surface can be removed using a HCL solution without damaging the structure.

The maximum structural resolution and minimal structuring length for NC paths is 100 µm. It is possible to reproducibly process high quality arched surfaces with a radius of curvature $r_{min,real}$ of up to 60 mm. Special segment field tiling strategies were developed; which strategy is required depends on the surface and structural shape in question. The least number and variety of seaming errors are generally achieved using tiling strategy I – complete layer processing – and using non linear, free-formed segment edges. Most of these seaming errors can not be localized metrologically. The lased structures deviate on average by 2.2 % from the shape of the CAD model. The plastic structures are high quality and only deviate by 1 % from the original (shrinkage). Costs can vary from 0.04 to 0.11 € per mm² structure, taking from between 0.092 and 0.325 min per mm² structure, depending on the basis on which the data is generated – either via a reference surface or a CAD data model. This is up to 80 % faster and up to 70 % cheaper than conventional etching, and is more flexible and accurate.

It will now be necessary to carry out related work in various fields in order to improve the performance and the acceptance of this manufacturing process in industry as well as to modify it for use on a wider range of applications. This work must cover the development of a special CAM system, which can significantly reduce the NC path calculation time as well as new, specialized functions (e.g. constant-to-contour machining). A software-assisted segmentation linked to the CAM system will also be needed in future. In order to open up the technology to new applications, the technology database must be expanded to include additional materials and other laser beam sources such as fs-/ps lasers. It will be possible to make the process faster and cheaper once various procedures have been optimized by introducing lasers with a higher pulse repeat count and by completely rebuilding the machine to make the 3D segmenting process suitable for mass production. There is also a great deal of development potential in the field of scanner technology.

10 Literatur

Literature

[AART04]	Aarts, M.; Grindel, J.: Fräsen an der Grenze der Mikrotechnik. In: WB Werkstatt + Betrieb. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 10/2004, S. 29-31
[ALLM95]	Von Allmen, M.; Blatter, A.: Laser-Beam Interactions with materials. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin. 1995
[ANGS03]	Angstberger, B.: Laserbeschriftung von Kunststoffen. Im: Tagungsband „1. Niedersächsisches Forum Kunststofftechnik - Kunststofftrends im Automobil“. Veranstalter: Wissens- und Innovationsnetzwerk Polymertechnik WIP, Wolfsburg. 17.-18.09.2003, S. 14
[ÄTZ07]	N. N.: Angaben der Unternehmen: J. & F. Krüth Form-Ätz-Technik, Solingen; Reichle CNC-Graviertechnik, Bissingen/Teck; Eschmann-Textures, Gummersbach und Neustadt; Standex International GmbH, Krefeld; Hohenloher Formstruktur, Pfedelbach. 2007
[AUTO04a]	N. N.: Emotion und Technik vereint. Zitat von Stefan Sielaff. In: Automobil Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 12/2004, S. 70-72
[AUTO04b]	N. N.: Oberflächen aus einem Guss. In: Automobil Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 03/2004 – Sonderausgabe Innenraum, S. 40
[AUTO04c]	N. N.: Emotion und Technik vereint. Zitat von Dr. Jan Dannenberg. In: Automobil Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 12/2004, S. 70-72
[AUTO04d]	Ninic, M.; Schroeder, J.: Interieurdesign – Im Spannungsfeld von Ergonomie und Technik. 8. Fachtagung: Fortschritte im Automobil-Innenraum, Ludwigsburg. Veranstalter: mic - management information center. 21.-22.09.2004
[AUTO04e]	N. N.: Hauptsache Wohlbefinden. Interview. In: Automobil-Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 10/2004, S. 70
[AUTO04f]	N. N.: 150 Kunststofftypen pro Auto. In: Automobil-Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 10/2005, S. 88
[AUTO04g]	N. N.: Zitat von Stefan Sielaff. In: Automobil Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 03/2004 – Sonderausgabe Innenraum, S. 3
[AUTO04h]	N. N.: Cockpits als Spiegel des Zeitgeistes. In: Automobil-Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 03/2004 – Sonderausgabe Innenraum, S. 18
[AUTO04i]	N. N.: Mehr Glanz im Cockpit. In: Automobil-Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 03/2004 – Sonderausgabe Innenraum, S. 49
[AUTO05a]	N. N.: Oberflächen wie gestreichelt. In: Automobil-Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 10/2005, S. 76
[AUTO05b]	N. N.; Anderseck, R.: Verspielt, aber mit Nutzwert. In: Automobil-Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 10/2005, S. 78
[AUTO05c]	N. N.: Gegerbtes Interieur boomt. In: Automobile Produktion, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 12/2004, S. 74
[BACH05]	Bachsteffel, J.; Rau, H.; Laux, J.: IMC-Slush Technologie im Interieur – Eine neue Werkstoffgeneration für hochwertige Oberflächen. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Mannheim. 09.-10.03.2005
[BASF06]	N. N.: Terblend® N. Firmenpublikation. BASF AG, Ludwigshafen. Internet: www.plasticsportal.com. 2006, S. 39
[BAYE05]	N. N.: Bayer Material Science: Folienhinterspritzen. Firmenpublikation. Bayer AG, Leverkusen. 2005
[BECH06]	Bechthold, P.: Ultrakurze Laserpulse – Erzeugung, aktuelle Anwendungen und Entwicklungstrends. In: Tagungsband „Seminar Ultrakurzpuls-Laser: Stand der Technik – aktuelle Entwicklungen – Anwendungen“. Veranstalter: BLZ, Erlangen. Nürnberg. 21.06.2006
[BERG00]	Bergmann, H. W.: Präzise Bearbeitung von Metalloberflächen. In: Präzisionsabtragen mit Lasern - Band 12. Herausgeber: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, VDI-Verlag. 2000
[BIRN03]	Birner, J.: Lighting und Rendering. Markt+Technik Verlag. 2001
[BLOC05]	Block, B.; Samm, K.; Siegel, F.: Werkzeuge erhalten durch Lasertechnik den letzten Schliff. In: phi - Produktionstechnik Hannover informiert. Herausgeber: LZH Hannover. 6. Jahrgang, Ausgabe 1, 2005
[BRAN05]	Brandes, A.: Prozessketten ganzheitlich planen - Kosten senken durch Auslegung technologisch-logistischer Schnittstellen. In: phi - Produktionstechnik Hannover informiert. Universität Hannover. Ausgabe 04/2005, S. 16-17
[BREC06]	Brecher, C.; Schmitt, R.; Lange, S.; Koerfer, F.; Niehaus, F.; Widemann, R.: Großflächige Mikrostrukturierung. In: wt Werkstatttechnik. Springer VDI Verlag. Ausgabe 96, Heft 5. 2006, S. 276-280
[BREI03]	Breitling, D.; Föhl, C.: Mikrobearbeitung am IFSW. In: Laser Magazin. Magazin Verlag Hightech Publications KG, Bad Nenndorf. Ausgabe 05/2003
[BÜTJ92]	Bütje, R.: Abtragen von Metallen mit Excimer-Lasern als Verfahren zur Mikrobearbeitung. Dissertation Universität Hannover. 1992
[CALL99]	Callies, G.: Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen. Dissertation Universität Stuttgart. 1999

[CHRY91]	Chryssolouris, G.: Laser Machining, Theory and Practice. Springer-Verlag, New York. 1991
[CSER05]	Cser, A.: Laserstrahlschmelzabtragen - Prozessanalyse und -modellierung. Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 2005
[DAHL04]	Dahlhaus, M.: Aluminium-Optik für die individuelle Oberflächengestaltung. In: Journal für Oberflächentechnik JOT, Vieweg Verlag, Wiesbaden. Ausgabe 09/2004, S. 66-69
[DAHL05]	Dahlhaus, M.: Variable Designs für die Auto-Innenausstattung. In: Journal für Oberflächentechnik JOT, Vieweg Verlag, Wiesbaden. Ausgabe 09/2005, S. X-XIV
[DANN04]	Dannenberg, J.: Wachstumsmarkt Automobil-Innenraum. In: Tagungsband „3. Fachtagung Fortschritte im Automobil-Innenraum“. Veranstalter: mic - management information center. Ludwigsburg. 21.-22.09.2004
[DAUS04]	Dausinger, F.: Präzisionsbohren mit kurzen und ultrakurzen Laserpulslen. In: Laser Technik Journal LTJ. Wiley Interscience GmbH, Weinheim. Ausgabe 04/05 Nr. 1. 2004
[DENK04]	Denkena, B.: Konstruktion, Gestaltung und Herstellung von Produkten II. Vorlesungsskript. Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen IFW, Universität Hannover. Stand 03/2004, S. 40-43
[DENK05]	Denkena, B.; Rudzio, H.; Liedtke, C.; Brandes, A.: Planung fertigungstechnischer Prozessketten. In: wt werkstatttechnik online. Springer VDI Verlag. Jahrgang 95, Heft 11/12. 2005, S. 866-871.
[DESI04]	N. N.: Design Council: Design in Britain 2004-2005. Firmenpublikation. London, UK. 2004, S. 12
[DESI05]	N. N.: Luxus - Fördert Spitzenleistungen und ist Innovationsmotor. In: design report. Konradin-Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen. Ausgabe 09/2005
[DIET05]	Dietert, A.: Matt ist beautiful - Glanzgrad-Reduzierung bei Kunststoffprodukten. In: Plastverarbeiter. 56. Jahrgang Nr. 1. 2005, S. 52-53
[DINV97]	N. N.: DIN V 32540: Laserstrahlabtragen - Thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl - Definitionen, Einflussgrößen, Durchführung. DIN-Taschenbuch 218. 01.07.1997
[DU04]	Du, K.: Präzisionsbearbeitung von Glas mit INNOSLAB-Lasern. In: Tagungsband „Laser-Summerschool 2004“, Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT. Dresden. 07.-09.06.2004
[EBEL03]	Ebel, B.: Der Automobil-Innenraum: Möglichkeiten zur Differenzierung im Wettbewerb. In: Tagungsband „Der Automobile-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroforum Deutschland GmbH, Düsseldorf. München. 09.12.2003
[EBER92]	Eberl, G.; Hildebrand, M.; Sutor, U.: Neue Entwicklungen beim Laserabtragen. In: Laser und Optoelektronik. AT Fachverlag, Stuttgart. Ausgabe 24. 1992, S. 44-49
[EBSE05]	Ebser, R.: Die programmierbare Hardware-Pipeline und ihre Verwendung für glaubhafte künstliche Charaktere. Fachhochschule Stuttgart - Hochschule der Medien. 2005, S. 33-35
[EICH04]	Eichler, H.: Erzeugung von strukturierten Bauteiloberflächen und deren Einfluss auf die Produkteigenschaften. In: Tagungsband „Fachtagung Kunststoffe im Automobilbau 2004“. Veranstalter: VDI e.V., Mannheim. Mannheim. 24.03.2004
[EIMA05]	Eimann, K.: Lasereinsatz im Formenbau - Praxisbericht. In: Tagungsband „aachener Laser Seminar Laser im Werkzeug- und Formenbau“. Veranstalter: Carl Hanser Verlag, München. Aachen. 16.11.2005
[ELRI07]	N. N.: Materialkatalog. Firmenpublikation. ElringKlinger AG, Dettingen. www.elringklinger-kunststoff.de, 2007
[ENEW99]	Enewoldsen, P.: In-mould decoration. In: Kunststoffe Plast Europe. Vol. 89 Nr. 9. 11/1999, S. 102-104
[ENGL06]	Engel, A.; Weißmantel, S.; Reiß, G.: 3D - Lasermikrostrukturierung mit Femtosekundenlaserstrahlung. In: Laser Magazin. Magazin Verlag Hightech Publications KG, Bad Nenndorf. Ausgabe 05/2006, S. 28
[ENK06]	Enk, T.: Siebdruckverfahren und deren Einsatzgebiete auf Kunststoffen. In: Tagungsband „Beschriften und Dekorieren von Kunststoffoberflächen“. Veranstalter: SKZ - ConSem GmbH, Würzburg. 04.-05.05.2006
[ERHA99]	Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag, München. 2. Auflage, 1999
[ERLH95]	Erlhoff, M.: Was ist Design. In: SPIEGEL spezial, Ausgabe 06/1995
[EULE06]	Eulenstein, T.: Erzeugung von Designoberflächen durch kombinierte Oberflächen- und Schichttechnologie. In: Tagungsband „Fachtagung Oberflächen von spritzgegossenen Kunststoffteilen“. Veranstalter: VDI Wissensforum IWB GmbH. Lüdenscheid. 18.-19.05.2006
[EVER98]	Eversheim, W.; Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft: Strategie und Technologie. Springer Verlag. 1998, S. 2
[FALL00]	Fallböhrer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation RWTH Aachen. 2000
[FAU99]	N. N.: Oxidspäne heben von selbst ab. In: Unikurier der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Ausgabe 02/1999, S. 74
[FISC00]	Fischer, S.: Fertigungssysteme zur spanenden Herstellung von Mikrostrukturen. Dissertation RWTH Aachen. 2000
[FLEI04]	Fleischer, J.; Schmidt, J.; Knoll, M.: Mikrobearbeitung durch Abtragen. In: wt Werkstatttechnik. Springer VDI Verlag. Ausgabe 94, Heft 11/12. 2004
[FLEI05a]	Fleischer, J.; Schmidt, J.: Mikroformeinsätze in gehärtetem Stahl. In: wt Werkstatttechnik. Springer VDI Verlag. Ausgabe 95, Heft 11/12. 2005, S. 887-891
[FLEI05b]	Fleischer, J.; Dieckmann, A.-M.: Entformungskraftuntersuchung beim Micro-PIM-Prozess. In: wt Werkstatttechnik. Springer VDI Verlag. Ausgabe 95, Heft 11/12. 2005, S. 892-897

-
- [FRAN05] Franck, A.; Knoblauch, M.; Sandoz, B.: Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid (PVC). PlasticsEurope Deutschland e. V., Frankfurt. 05/2005
-
- [FRAN98] Francke, G.: Leder - ein klassischer Interieurwerkstoff. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau - Zukunft durch neue Anwendungen“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf. Mannheim. 25.-26.03.1998, S. 337-349
-
- [GALV06] N. N.: Technologie - Die Slush- und Spray-Technologie Galvanoform. Firmenpublikation. Gesellschaft für Galvanoplastik mbH. www.galvanoform.de. 2006
-
- [GÄRT05] Gärtner, R.: Analyse der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile durch Spritzgießen. Dissertation der RWTH Aachen. 2005, S. 27-29
-
- [GEPL06] N. N.: Hinweise für die erfolgreiche Spritzgießverarbeitung - Praktisches Handbuch für Verarbeiter. Firmenpublikation. General Electric Plastics GmbH, Rüsselsheim. www.plastoplan.com. 2006, S. 39
-
- [GILL00] Gillner, A.: Präzisionsstrukturieren von Glas und dünnen Schichten mit Laserstrahlung. In: Präzisionsabtragen mit Lasern - Band 12. Herausgeber: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien. 2000, S. 9-11
-
- [GILL05] Gillner, A.: Laserabtrag zur Herstellung von Mikrowerkzeugen. In: Tagungsband „aachener Laser Seminar: Laser im Werkzeug- und Formenbau“. Veranstalter: Carl Hanser Verlag, München. Aachen. 16.11.2005
-
- [GILL06] Gillner, A.; Hartmann, C.: Kombinationsverfahren zur Herstellung keramischer und schwer zerspanbarer Mikrokomponenten durch Laserstrahlung. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik AKL'06“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 03.-05.05.2006
-
- [GOET05] Goetz, W.: In Mould Decoration (IMD) im Praxistest. In: Plastverarbeiter. Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. Ausgabe 56 Nr. 5. 2005, S. 38-40
-
- [GRÄF06] Gräfe, S.: Fotorealistische Visualisierung einer humanoiden Figur. Bachelorarbeit an der FH Erfurt im Fachbereich Angewandte Informatik. 2006
-
- [GREF00] Grefenstein, A.: Oberflächendekorationsprozesse beim Spritzgießen. In: Spritzgießen 2000+ – Strategien, Technologien und Visionen, Internationale VDI-Jahrestagung Kunststofftechnik, Düsseldorf. 2000, S. 95
-
- [GREF03] Grefenstein, A.; Kaymak, K.: Ohne Stahl und Lack. In: Kunststoffe. Ausgabe 11/2003, S. 98-101
-
- [GROS04] Grosse, P.: Laser Rapid Manufacturing für die Mobilfunktelefonproduktion. In: Tagungsband „Laserforum Nortec 2004“. Veranstalter: Hamburg Messe und Congress GmbH. Hamburg. 23.01.2004
-
- [GÜNT06] Günther, J.: Aktuelle Verfahren zur Oberflächendekoration von Kunststoffen - Verfahrensbeschreibung. In: Tagungsband „Fachtagung Oberflächen von spritzgegossenen Kunststoffteilen“. Veranstalter: VDI Wissensforum IWB GmbH. Lüdenscheid. 18.-19.05.2006
-
- [HAGG98] Haggie, A.: Holz in der Fahrzeug-Innenausstattung - Handwerkliche Tradition im Verbund mit moderner Technik. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau - Zukunft durch neue Anwendungen“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf. Mannheim. 25.-26.03.1998, S. 365-375
-
- [HANS06] Hansen, C.: Verwendung von Textur in der Gefäßvisualisierung. Fakultät für Informatik - Institut für Simulation und Graphik. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Diplomarbeit. 2006
-
- [HEBE00] Heber, M.: Hinterspritzen und Hinterpressen von Automobilinnenteilen. In: Tagungsband „Spritzgießen 2000+ – Strategien, Technologien und Visionen“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf. 2000
-
- [HECK86] Heckbert, P.: Survey of texture mapping. In: IEEE Computer Graph. Appl. 6 (1986), Nr. 11. 1986, S. 56-67
-
- [HECK89] Heckbert, P.: Fundamentals of Texture Mapping and Image Warping, Master's thesis, UCB/CSD 89/516, CS Division, U.C. Berkeley, USA. Ausgabe 06/1989, S. 5
-
- [HEND04] Hendriks, H.: Technologie und Emotion - Anforderungen an den Innenraum in der Oberklasse. In: Tagungsband „Fortschritte im Automobil-Innenraum“. Veranstalter: mic - management information center GmbH. Ludwigsburg. 21.-22.09.2004
-
- [HERR04a] Hermann, T.: Mikromaterialbearbeitung mit Pikosekunden-Lasersystemen. In: Tagungsband „Laser-Summerschool 2004“. Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT. Dresden. 07.-09.06.2004
-
- [HERR04b] Hermann, T.: Micro-Machining using Picosecond Laser Systems with high Repetition Rate. In: Tagungsband „Laser Assisted Net Shape Engineering - LANE 2004“. Veranstalter: LFT Erlangen. Erlangen. 21.-24.09.2004
-
- [HERZ91] Herziger, G.: Abtragen mit Laserstrahlung. In: Laser und Optoelektronik. Ausgabe 23/4 1991, S. 64-69
-
- [HERZ93] Herziger, G.; Loosen, P.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Carl Hanser Verlag, München. 1993, S. 212
-
- [HERZ98] Herziger, G.; Poprawe, R.: Vorlesungsumdruck Lasertechnik I des Lehrstuhls für Lasertechnik an der RWTH, Aachen. 1998, 2. Auflage
-
- [HESS02] Hesselbach, J.; Weule, H.; Klocke, F.: mikroPRO - Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. Vulkan-Verlag, Essen. Ausgabe 11/2002
-
- [HIRC04] Hirche, J.: Hardware accelerated per-pixel displacement mapping. In: Graphics Interface. 2004, S. 153-158.
-
- [HOFF03] Hoffmann, C.: Farb- und Material-Innovationen im Automobil-Innenraum. In: Tagungsband „Der Automobil-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroforum, München. München. 9.-10.12.2003, S. 10
-
- [HÖHL04] Höhl, H.: Sinnliche Oberflächen. In: Plastverarbeiter. Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. 55. Jahrgang Nr. 3. 2004, S. 38-40
-
- [HOMM99] Hommel, B.; Kießling, H.; Müller, W.; Palme, M.: Spritzgießen feinststrukturierter optischer Oberflächen. In: F&M. Jahrgang 107, Heft 10. 1999, S. 72-74
-
- [HOPP05] Hoppermann, A.: Einfluss von Oberflächengestaltung und Werkstoffwahl auf das tribologische Verhalten von Gleit- und Dichtungskontakten hydraulischer Komponenten. Dissertation RWTH Aachen. 2005
-

[HUBE03]	Huber, N.; Heitz, J.; Bäuerle, D.: Pulsed-laser ablation of polytetrafluoroethylene (PTFE) at various wavelengths. In: The European Physical Journal - Applied Physics. Ausgabe 25/2004, S. 33-38
[IED06]	N. N.: Branchenübergreifende Studie - Oberflächendesignstrukturen im Unternehmen. Fragebogen im Rahmen des BMWA geförderten InnoNet-Projekts FlexOStruk (16IN0191). Institut für Ergonomie und Designforschung IED der Universität Duisburg-Essen, Fachbereich 4. 2006
[INNO03]	N. N.: Haptik wird messbar. In: Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 07/2003
[JACO05]	Jacob, S.: Veredelung von Kunststoffoberflächen durch Lackieren. In: Tagungsband „Fachtagung Oberflächen-technik für Kunststoffe“. Veranstalter: Kunststoff Institut Lüdenscheid. Lüdenscheid. 28.09.2005
[JANS04]	Jansson, H.; Mitzler, J.: Vorformen und Hinterprägen in einem Schritt. In: Kunststoffe 94/3. 2004, S. 70-74
[JENK03]	Jenke, G.: Laser-3D-Strukturierung von Druck- und Prägwalzen. In: Tagungsband „Oberflächenbearbeitung mit dem Laser“. Veranstalter: LFT Erlangen. Erlangen. 26.02.2003
[JOHA04]	Johannaber, F.; Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. Carl Hanser Verlag, München. 2. Auflage 2004
[KAST03]	Kasten, H.-G.: Wie sieht das Interieur von morgen aus? In: Tagungsband „Der Automobil-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroforum München. München. 09.-10.12.2003
[KAUF03]	Kaufmann, G.: Werkzeugtechniken für das Hinterspritzen, Hinterpressen und Quellflussprägen von Dekormaterialien. In: Tagungsband „Niedersächsisches Forum Kunststofftechnik Kunststofftrends im Automobil“. Veranstalter: Wissens- und Innovationsnetzwerk Polymertechnik, Wolfsburg. Wolfsburg. 17.-18.09.2003
[KERK02]	Kerkhoff, D.: Oberflächengestaltung – Zielkonflikt zwischen Endkonsument und Spezifikation. In: Tagungsband „Oberflächen in der Fahrzeuginnenausstattung“. Köln. 24.-25.06.2002, S. 16
[KLAW03]	Klawitter, C.: Design-Schutz - Neues Recht in Deutschland und Europa. In: Tagungsband „Der Automobil-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroforum München. München. 09.-10.12.2003
[KLEI04]	Klein, B.; Spitznagel, F.; Szekeley, P.: Anspruchsvolle Oberflächen leicht gemacht. In: Kunststoffe Automotive - Special: Innovationen im neuen BMW 6er. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 03/2004. 2004, S. 42-43
[KLOC01a]	Klocke, F.; Klotz, M.: Funkenerosion für anspruchsvolle Bearbeitungsaufgaben. In: wt Werkstatttechnik. Springer VDI Verlag. Ausgabe 91, Heft 7. 2001, S. 409-413
[KLOC01b]	Klocke, F.; Fallböhrer, M.; Trommer, G.; Willms, H.: Knowledge Based Systems for Production Planning in Early Design Phases. International CIRP Design Seminar. Stockholm, Sweden, 06.-08.06.2001
[KLOC02]	Klocke, F.; Willms, H.; Fallböhrer, M.; Trommer, G.: Hilfsmittel für die konstruktionsbegleitende Gestaltung von Prozessketten. In: Industrie Management. Ausgabe 18 Nr. 1. 2002, S. 31-34
[KLOC04a]	Klocke, F.; Arntz, K.; von Bodenhausen, J.: Potenziale beim Hartfräsen von Mikrostrukturen. In: Mikroproduktion. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 01/2004, S. 24-26
[KLOC04b]	Klocke, F.; Kordt, M.: Laser Microablation - Tribological Microstructures for Hydraulic Componentes. In: Tagungsband „Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2004“. Erlangen. 21.-24.09.2004
[KLOC07]	Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung. Springer-Verlag, Berlin. 4. Auflage 2007
[KNIT98]	Knittel, D.: Materialbearbeitung mit Excimerlasern. In: Laser in der Materialbearbeitung - Band 11. VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf. 1998
[KNOC04]	Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Dissertation RWTH Aachen. 2004
[KNOD02]	Knodt, S.: Skalierte Strukturen - Anwendungen und Herausforderungen für die Präzisions- und Mikrobearbeitung. In: FoKus - Newsletter. Herausgeber: Fraunhofer-Demonstrationszentrum Formen für die Kunststoffverarbeitung FoKus, Pfinztal. Ausgabe 2/2002, S. 12-15
[KOCH01]	Koch, O.; Michel, F.; Gruber, H. P.: Mikrobearbeitung durch Funkenerodieren - Technologien und Anwendungen. In: Seminarband „Präzisions-, Ultrapräzisions- und Mikrobearbeitung mit Verfahren der Zerspan- und Abtragtechnik“. Veranstalter: Institut für Produktionstechnik TU Dresden. Dresden. 23.03.2001
[KOCH03]	Koch, W.: Wohlbefinden im Fahrzeug-Innenraum. In: Tagungsband „Der Automobil-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroforum, München. München. 09.-10.12.2003
[KOEP03]	Koepen, H. J.; Hasse, A.; König, F.: Das Glanzpaket - Erfahrungen und Ausblicke. In: Tagungsband „Stuttgarter Automobiltag“. Stuttgart. 06.11.2003
[KÖNI97]	König, W.; Klocke, F.: Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren. Springer Verlag, Berlin. 5. Auflage 1997, S. 176
[KÖNI05]	König, R.: Strukturbildung auf verschiedensten Grundmaterialien durch ein neues Lackierverfahren. In: Fachtagung Hochwertige Werkstoffe für den Fahrzeuginnenraum. Veranstalter: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (SKZ), Würzburg. Würzburg. 29.-30.06.2005, S. 1
[KÖNI03]	Königshofen, A.; Pies, P.; Möbius, A.: Neue Wege der Direktmetallisierung. In: Galvanotechnik. Eugen G. Leuze, Bad Saulgau. Ausgabe 04/2003, S. 829-833
[KONI05]	Koning, E.: Hinterschäumen von Dekormaterialien. In: Tagungsband „Hochwertige Werkstoffe für den Fahrzeuginnenraum“. Veranstalter: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (SKZ), Würzburg. Würzburg. 29.-30.06.2005
[KORD03]	Kordt, M.; Hoppermann, A.: Laserstrukturierte Kontaktflächen verbessern Verschleiß- und Reibungsverhalten hydraulischer Komponenten. In: wt Werkstatttechnik. Ausgabe 93, Heft 6. 2003, S. 472-473

-
- [KORD04] Kordt, M.: Herstellung von tribologisch wirksamen Mikrostrukturen für hydraulische Bauteile mittels Laserstrahlmikroabtragen. In: Tagungsband „Laser-Summerschool 2004“. Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT. Dresden. 07.-09.06.2004
-
- [KÖST05a] Köster, A.: Ohne Umwege zu genarbten Oberflächen. In: K-Zeitung Online. Ausgabe 26.08.2005
-
- [KÖST05b] Köster, A.: Genarbte Oberflächen – Mit Direct Texturing sind Narbungen kostengünstiger und reproduzierbarer herstellbar. In: K-Zeitung. Ausgabe 17/2005
-
- [KÖST06] Köster, A.: Texturen. Vortrag während des design+engineeringforums auf der Euromold 2006, Messe Frankfurt. 01.12.2006
-
- [KRAC02] Krack, M.: Herstellung von Mikroformen mit Laser Engraving, Kleine und kleinste filigrane Kavitäten schnell herstellen. In: Kunststoffe-Synthetics. Vogt-Schild/Habegger Medien AG, Solothurn, CH. Ausgabe 12/2002, S. 6-7
-
- [KRAC04] Krack, M.; Dumitru, G.: Die Fertigungstechnologie der Zukunft. In: Kunststoffe-Synthetics, Vogt-Schild Medien AG, Solothurn, CH. Ausgabe 10/2004, S. 68
-
- [KRAM06] Kramer, R.; Brandl, V.; Schwede, H.; Wolf, S.; Märten, O.: Strahlanalyse - Blick in den Fokus von Hochleistungs- und Kurzpulslasern. In: Photonik - Fachzeitschrift für die Optischen Technologien. AT-Fachverlag, Fellbach. Ausgabe 38. Nr. 1-2006, S. 62-65
-
- [KRÜT05] Krüth, S.: Beeindruckende Strukturen. In: Plastverarbeiter. Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. Ausgabe 11/2005, S. 40-41
-
- [KUHL97] Kuhl, M.: Machining of moulds and dies through laser ablation. In: Tagungsband „Laser Assisted Net Shape Engineering - Lane'97“. Veranstalter: LFT Uni Erlangen. Erlangen. 1997, S. 857-865
-
- [KUHL01] Kuhl, M.: 3D-Laserabtragen für die Feinwerktechnik. In: Tagungsband „Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik µLEF'01“. Veranstalter: LFT Uni Erlangen. Erlangen. 2001
-
- [KUHL04] Kuhl, M.: Laserabtragen von Spritzgussformen. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik'04“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 28.-30.04.2004, S. 307-321
-
- [KUHL05] Kuhl, M.: Maschinenteknik zum Laserabtrag für Spritzgusswerkzeuge. In: Tagungsband „aachener Laser Seminar: Laser im Werkzeug- und Formenbau“. Veranstalter: Carl Hanser Verlag. Aachen. 16.10.2005
-
- [KUHL06] Kuhl, M.: MIKROTOOL - Rapid Tooling für Mikrowerkzeuge. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik AKL'06“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 03.-05.05.2006
-
- [KULI02] Kulik, C.: Bearbeitungsstrategien für die lasergestützte 3D-Mikrostrukturierung technischer Keramiken. Dissertation Universität Hannover. 2002
-
- [KULP00] Kulp, W.; Greiner, W.; Graf von der Schulenburg, J.-M.: Der Ophthalmologe - Verwendung des Excimer-Lasers in der refraktiven Augen Chirurgie. Springer Verlag, Berlin. Ausgabe 97, Nummer 11. 2000
-
- [KUNS04] N. N.: Innenraum aus einer Hand. In: Kunststoffe Automotive – Special: Innovationen im neuen BMW 6er. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 03/2004, S. 34
-
- [LAMP99] Lampe, T.; König, F.; Schwarzer, P.: Emotionen wecken durch edle Oberflächen. In: Kunststoffe im Automobilbau - variabel für die Zukunft. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf. 1999, S. 139-163
-
- [LASE07] N. N.: Internetpublikation. MST-Microstrahltechnik Vertrieb GmbH, Reutlingen. www.mst-reutlingen.de. 2007
-
- [LASO00] Lasov, L.; Stojanova, P.: Die Rolle der optischen und thermischen Eigenschaften des Targets bei Lasermaterialbearbeitung. In: Tagungsband „14. internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida“. Veranstalter: Hochschule Mittweida. Mittweida. 08.-11.11.2000
-
- [LÄSS94] Läßiger, B.: Kontrollierter Formabtrag durch Sublimation mittels Laserstrahlung. Dissertation RWTH Aachen. 1994
-
- [LCTE98] N. N.: Grundlegende Untersuchungen zum Laserabtragen von Werkzeug- und Formstählen mit Tiefenregelung. Abschlußbericht für das F+E-Vorhaben 13 N 6638/6. Projektzeitraum: 1995 bis 1998. LCTec GmbH Laser- und Computertechnik, Pfronten. 1998
-
- [LENG98] Lengyel, S.: Design - Spannungsfeld zwischen Rationalität und Emotionalität. In: Geste & Gewissen im Design. Dumont Verlag, Köln. 1998, S. 118
-
- [LEON06] Leonhardt, E.: Per Pixel Displacement Mapping - Generalized Displacement Mapping. Hauptseminararbeit der graphischen Datenverarbeitung. Technische Universität Dresden. Wintersemester 2005/2006, S. 5
-
- [LÖBB04] Löbbbecke, S.: Baukastenkonzepte für die Mikroverfahrenstechnik: Das FAMOS-System. In: Chemie-Ingenieur-Technik CIT, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim. Ausgabe 76 Nr. 5. 2004, S. 581-583
-
- [LORE06] Lorenz, A.: Untersuchungen zur Prozessfähigkeit von kurzpuls-Laser-Systemen. In: Laser-Summerschool 2006, Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT. Dresden. 28.-30.06.2006, S. 5
-
- [LUDW05] Ludwig, H.-J.: Folientechnik im Automobilbau - ein Vergleich. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Mannheim. Mannheim. 09.-10.03.2005, S. 145
-
- [MANG03] Mangold, M.: Teppich, Haut & Co. - Innovative Oberflächen im Fahrzeuginnenraum. In: Der Automobil-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor. Veranstalter: Euroforum, München. München. 09.-10.12.2003
-
- [MEIN92] Meiners, E.; Kessler, A.; Dausinger, F.; Hügel, H.: Approaches in Modelling of Evaporative and Melt Removal Processes in Micro Machining. In: Tagungsband „ECLLAT 92“. Veranstalter: DGM-Verlag. Göttingen. 1992
-
- [MENG99] Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P.: Spritzgieß-Werkzeuge: Anleitung zum Bau von Spritzgieß-Werkzeugen. Carl Hanser Verlag, München. 5. Auflage 1999
-
- [MEYE00] Meyer, G.: Wertsteigerung durch Kunststoffmetallisierung. In: Tagungsband „Spritzgießen 2000+ – Strategien, Technologien und Visionen“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf. 2000, S. 237-251
-

[MEYE05a]	Meyer, K.: Luxus gestalten - Markenwerte und Tradition entscheiden. Zitat von A. Dornbracht In: design report. Konradin-Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen. Ausgabe 09/2005
[MEYE05b]	Meyer, K.: Luxus gestalten - Markenwerte und Tradition entscheiden. Zitat von W. Sawaya. In: design report. Konradin-Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen. Ausgabe 09/2005
[MEYE05c]	Meyer, K.: Luxus gestalten - Markenwerte und Tradition entscheiden. In: design report. Konradin-Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen. Ausgabe 09/2005
[MICH98]	Michaeli, W.: Innovationspotential Kunststoff im Automobilbau. In: Kunststoff im Automobilbau. VDI-Verlag. 1998
[MICH99]	Michaeli, W.; Rogalla, A; Ziegmann, C.: Mikrostrukturen in der Serie fertigen. In: Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München. Jahrgang 89 Nr. 9. 1999, S. 80-82
[MICH00a]	Michaeli, W.; Greif, H.; Kretzschmar, G.; Ehrig, F.: Technologie des Spritzgießens. Carl Hanser Verlag, München. 2. Auflage 2000
[MICH00b]	Michaeli, W.; Spennemann, A.: Mikrostrukturierte Funktionsoberflächen spritzgießen. In: Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München. Jahrgang 90 Nr. 9. 2000, S. 52-57
[MILL03]	Miller, F.: Neue Strahlquelle für Feinstbearbeitung. In: Fraunhofer Magazin. Ausgabe 02/2003, S. 44-45
[MITZ04]	Mitzler, J.; Bauer, G.; Emig, J.: Hochwertige Premiumoberflächen aus Spritzgieß- und Reaktionstechnik. In: Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 94 Nr. 10. 2004, S. 180-186
[MITZ05]	Mitzler, J.: Hochwertige Innenraum-Oberflächen, hergestellt im SkinForm-Verfahren. In: Tagungsband „Hochwertige Werkstoffe für den Fahrzeuginnenraum“. Veranstalter: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (SKZ), Würzburg. Würzburg. 29.-30.06.2005, S. 1
[MOMM95]	Mommsen, J.: Verfahren des automatisierten Mikroabtrags mit Excimerlaser. Dissertation Uni Hannover. 1995, S. 10
[MORI05]	Moritz, T.; Lenk, R.; Adler, J.; Zins, M.: Modular micro reaction system including ceramic components. In: Tagungsband „International Conference and Exhibition on CICMT 2005 - Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies“. Baltimore Marriott Waterfront, Baltimore, USA. 10.-13.04.2005
[NINI04]	Ninic, M.; Schröder, J.: Design im Spannungsfeld zwischen Ergonomie und Technik. In: Tagungsband „Fort-schritte im Automobil-Innenraum“. Veranstalter: mic - management information center, München. Ludwigsburg. 21.-22.09.2004
[NOIS02]	Noisternig, J.: Oberflächentrends aus Sicht eines Zulieferers. In: Tagungsband „Oberflächen in der Fahrzeuginnenausstattung“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Köln. 24.-25.06.2002, S.37
[NOLT99]	Nolte, S.; Momma, C.; Chichkov, B.; Welling, H.: Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen. In: Physikalische Blätter. WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim. Ausgabe 55 Nr. 6. 1999
[OETT04]	Oettle, M.: Mikrobearbeitung im Werkzeug- und Formenbau. In: Tagungsband „6. Schmalkalder Werkzeugtagung 2004“. Schmalkalden. 10.-11.11.2004
[OHLI01]	Ohlinger, R.: Oberflächengestaltung mit Tiefziehfolien und Slushhäuten unter Berücksichtigung neuer Qualitäts- und Funktionsanforderungen. In: Tagungsband „Oberflächen im Fahrzeugbau, Innenausstattung und Karosserie“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Frankfurt am Main. 19.-20.06.2001, S. 1
[ORLA06]	Orlamünder, B.: Texturen. Skript zur Vorlesung Informatik. Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik. 2006, S. 23
[PESC81]	Peschko, W.: Abtragung fester Targets durch Laserstrahlung. Dissertation TH Darmstadt. 1981
[PETE95]	Peters, R. J.: Abtragen, Bohren und Trennen mit Festkörperlasern. In: Laser in der Materialbearbeitung - Band 7. Herausgeber: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien. 1995
[PETE98]	Peters, R. J.: Abtragen mit CO ₂ -Hochleistungslasern. In: Laser in der Materialbearbeitung - Band 10. Herausgeber: VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien. 1998
[PETR95a]	Petring, D.; Zefferer, H.; Beyer, E.: Formabtragen mit Laserstrahlung. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik AKL'95“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 1995
[PETR95b]	Petring, D.; Zefferer, H.: Laserstrahl-Formabtragen: Verfahrensvarianten, Stand der Technik und Chancen für das Rapid Prototyping durch kombiniertes Auf- und Abtragen. In: Tagungsband „Aachener Rapid Prototyping Tage ARTE'95“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 1995
[PILT04]	Piltz, S.: Mikrosenkrosive Verfahren für die Fertigung von Mikrokavitäten und Mikrostrukturen. In: Future - Mitteilungen aus dem Produktionstechnischen Zentrum (PTZ). Ausgabe 01/2004, S. 7
[PLAS01]	N. N., Bayer AG: Funktionen der Kunststofflackierung. In: Plastverarbeiter. Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. Ausgabe 11/2001
[POPP06]	Popp, U.: Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen. Dissertation Universität Erlangen. 2006
[POPR02]	Poprawe, R.: Umdruck Lasertechnik I und II des Lehrstuhls für Lasertechnik an der RWTH Aachen. 2002
[POPR05]	Poprawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Springer Verlag, Heidelberg. 1. Auflage 2005
[POPR06]	Poprawe, R.: Trends und Perspektiven der Lasertechnik. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik AKL'06“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 03.-05.05.2006
[PÖTZ06]	Pötzelberger, W.: Texturkoordinaten. Kunst Universität Linz. 2006
[RAMS95]	Rams, D.: Weniger, aber besser = Less but better. Klatt Design & Design Verlag, Hamburg. 1995

[RAU03]	Rau, H.; Christop, E.: TPU im Interieur – Eine neue Werkstoffgeneration für hochwertige Oberflächen . In: Tagungsunterlagen Kunststoffe im Automobilbau. Mannheim. 2003
[REIS00]	Reiße, G.: Pikosekunden-Lasermaterialbearbeitung. In: Tagungsband „14. internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida“. Veranstalter: Hochschule Mittweida. 08.-11.11.2000
[ROGA98]	Rogalla, A.: Analyse des Spritzgießens mikrostrukturierter Bauteile aus Thermoplasten. Dissertation RWTH Aachen. 1998
[RÜBE01]	Rübenach, O.: Schwingungsunterstützte Ultrapräzisionsbearbeitung optischer Gläser mit monokristallinen Diamantwerkzeugen. Dissertation RWTH Aachen. 2001
[RÜDI05]	Rüdiger, C.; Vollmer, G.; Rau, H.; Lemmle, J.: Dekorleisten in Folientechnik als Differenzierungsmerkmal. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau“. Mannheim. 09.-10.03.2005, S. 21-22
[SANC06]	Sánchez, J. A.: Oberflächenintegrität bei mit Drahterosion geschnittenen Werkstücken. In: EDMWORLD. 2006, S. 10-11
[SCAN02]	N. N.: Installation and Operation - The RTC3 PC Interface Board. Anleitung Rev. 1.4 e. Scanlab AG, Puchheim. 08.02.2002
[SCHA04]	Scharf, A.: Kratzfest im Auto. In: design report. Konradin-Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen. Ausgabe 10/2004
[SCHA94]	Schauf, D.: Die strukturierende Formnestoberfläche und deren Abformung durch Thermoplaste. Firmenpublikation. Bayer AG, Leverkusen. Herausgeber: KU-Marketing, Artikel: ATI 584. 1994, S. 12
[SCHI05]	Schierholt, M.; Bergers, H.: Innovative Technik für anspruchsvolle Oberflächen. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. Jahrgang 107. Ausgabe 12/2005, S. 1082-1084
[SCHI04]	Schindler, T.: 3D-Materialabtrag für den Mikroformenbau. In: mav - maschinen anlagen verfahren. Ausgabe 04/2004, S. 64-65
[SCHI03a]	Schink, K.; Popp, M.; Schubert, M.: Long-term Performance of IMD Parts. In: Kunststoffe Plast Europe. Vol. 93, Nr. 4. 2003, S. 30-31
[SCHI03b]	Schinköthe, W.: Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich. In: Tagungsband „18. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium“. Veranstalter Universität Stuttgart. Stuttgart. 19.-20.03.2003, S. 2
[SCHL04]	Schlott, S.: Viel Neues im Zeichen der 6. Interview mit M. Stahmer, Projektleiter BMW 6er. In: Kunststoffe Automotive - Special: Innovationen im neuen BMW 6er. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 03/2004, S. 31
[SCHM01]	Schmidt, J.; Hüntrup, V.: Mikrozerspanung mit großen Potenzialen. In: WB. Ausgabe 05/2001, S.12-18
[SCHM95]	Schmidt-Hebbel, R.; Bartl, N.; Geiger, M.: Präzisionsbohren mit dem Nd:YAG-Laser. Abschlußbericht BMFT-Verbundprojekt: Abtragen und Bohren mit dem Festkörperlaser; Förderkennzeichen: BMFT 13 N 5752. 1995
[SCHM02]	Schmidt-Sandte, T.: Laserstrahlbasierte Entgratverfahren für feinwerktechnische Anwendungen. Dissertation Universität Braunschweig. 2002
[SCHN05]	Schneider, R.: Vakuumkaschierung tiefgezogener PVC-Schaumfolien. In: Tagungsband „Kleb-Kaschieren von Kfz-Innenteilen“. Veranstalter: SKZ - ConSem GmbH, Würzburg. Würzburg. 21.-22.04.2005
[SCHU98]	Schubart, D.: Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO ₂ -Laserstrahlung. Dissertation Universität Erlangen. 1998
[SCHU99]	Schulten, S.: Cockpit für höchste Ansprüche. In: Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 08/1999
[SCHW05]	Schwarzer, P.: Lackanwendungen für Kfz-Innenraumbauteile - Gründe, Anforderungen, Innovationen. In: Tagungsband Kunststoffe im Automobilbau 2005, Veranstalter: VDI e.V., Mannheim. Mannheim. 09.-10.03.05
[SIEB03]	Sieber, A.: Dreidimensionales Laserabtragen im Werkzeugbau. In: Tagungsband „Oberflächenbearbeitung mit dem Laser“. Veranstalter: LFT Universität Erlangen. Erlangen. 26.02.2003
[SIEL03]	Sielaff, S.: Vom Entwurf zur Serie - Das Interior Design Kompetenz Center von DaimlerChrysler. In: Tagungsband „Der Automobil-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroforum, München. München. 09.-10.12.2003
[SIEL05]	Sielaff, S.: Der Mercedes-Benz Interior Design Entstehungsprozess - Von der Skizze zum Produkt. In: Tagungsband „Fortschritte im Automobil-Innenraum“. Veranstalter: mic - management information center GmbH. Ludwigsburg. 29.-30.11.2005
[SIMO04]	Simon, J.: Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoff. PlasticsEurope Deutschland - Verband der Kunststoff-erzeuger, Arbeitsausschuss Statistik und Marktforschung. 19.07.2004, S. 39
[SINK04]	Sinkwitz, H.: Innenraum in kleinen Fahrzeugklassen. In: Tagungsband „Fortschritte im Automobil-Innenraum“. Veranstalter: mic - management information center GmbH. Ludwigsburg. 21.-22.09.2004
[SOMM04]	Sommer, S.: Laserbohren bei reduziertem Umgebungsdruck unter Einsatz von quergeströmten Potentialwirbel-fenstern. In: Tagungsband Laser-Summerschool 2004, Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft für Laser-technik WLT. Dresden. 07.-09.06.2004
[SPAN06]	Van Spankeren, A.: Innovatives Verfahren und Anlage zum Laserstrahlpolieren. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik AKL'06“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. Aachen. 03.-05.05.2006
[STAH05]	N. N.: Hinterspritztechniken und die dabei eingesetzten Werkzeuge. In: Der Stahlformenbauer. Fachverlag Möl-ler, Velbert. Ausgabe 06/2005, S. 22-26
[STAN06]	N. N.: Technische Informationen zur ätztechnischen Oberflächenstrukturierung. Firmenpublikation. Standex GmbH, Krefeld. www.standex-gmbh.de. 2006

[STEI03]	Steiner, G.: Ein- und Mehrkomponentenformen für das TPE-Spritzgießen. In: Tagungsband „TPE - Grundlagen und Verfahrenstechnik“. Veranstalter: VDI Kunststofftechnik. Brüssel, Belgien. 13.-14.11.2003, S. 29
[STEN02]	Stengler, R.; Weinhold, W. P.: Die Oberfläche sensorisch im Griff - Maßgeschneidertes Prüfprofil. In: Quality Engineering. Konradin-Medien Verlag, Leinfelden-Echterdingen. Ausgabe 04/2002, S. 30-32
[STRU04]	Struck, F.: Shaderentwicklung für menschliche Darsteller in 3D-Echtzeitanwendungen. Diplomarbeit. Fachhochschule Wedel, Fachrichtung Medieninformatik. 2004
[SUTO94]	Sutor, U.: Formabtrag mit CO ₂ -Laserstrahlung. Dissertation RWTH Aachen. 1994
[TETT01]	Tettenborn, G.; Specht, O.: Fugen im Innenraum. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf. Mannheim, 04.-05.04.2001, S. 21-44
[THEI06]	Theisel, H.: Computergaphik I. Skript zur Vorlesung. Fachhochschule Bielefeld. Sommersemester 2006, Kap. 4
[THÖN04]	Thöniß, T.: Laseraufweitungssysteme. In: optolines, Nr. 1. Ausgabe 1 Quartal 2004, S. 11
[TIET01]	Tietz, W.: Oberflächenentwicklung von Schalttafeln. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau“. Veranstalter: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf. Mannheim. 04.-05.04.2001, S. 45-57
[TÖNS93]	Tönshoff, H. K.; Stürmer, M.: Abtragen und Bohren mit Festkörperlasern: Abschlußbericht zum Teilvorhaben: Auswuchten und Trieren mit Festkörperlasern. Förderkennzeichen BMFT 13 N 5757. LZH, Hannover. 1993
[TÖNS03]	Tönshoff, H. K.: Positionierung technologischer Schnittstellen in Fertigungsketten - Ergebnisbericht des Teilprojekts C3 des SFB 489. IFW Universität Hannover. 2003
[TREU85]	Treusch, H. G.: Geometrie und Reproduzierbarkeit einer plasmagestützten Materialabtragung durch Laserstrahlung. Dissertation TH Darmstadt. 1985
[TREU92]	Treusch, H. G.; Lässig, B.: Verfahrensentwicklung zum definierten Formabtrag mit Laserstrahlung. In: Tagungsband „Laser Konferenz 1991“. Veranstalter: Springer Verlag, München. München, 1992
[VDA03]	N. N.: Dekorative Oberflächen von Anbau- und Funktionsteilen im Außen- und Innenbereich von Automobilen - Beurteilungsbedingungen, Merkmalsdefinition, Fehleransprache und Annahmekriterien. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Oberursel. 1. Auflage 2003, S. 12-15
[VDI75]	N. N.: Elektroerosive Bearbeitung - Begriffe, Verfahren, Anwendung. VDI-Richtlinie VDI 3400. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. Artikel: DK 621.9.048.4 (083.132). Jahrgang 06/1975
[VOLL04]	Vollrath, L.: Kunststoffe im Fahrzeugbau - ein Erfolgskonzept. In: Kunststoffe Automotive - Special: Innovationen im neuen BMW 6er. Carl Hanser Verlag, München. Ausgabe 03/2004, S. 21
[WAGN03]	Wagner, T.: Der Laser - ein Multitalent und was ihm noch fehlt. In: Tagungsband „Stuttgarter Lasertage'03“. Stuttgart, 25.09.2003, S. 2
[WALD06]	Walder, B.: Kaschieren von Kunststoffoberflächen mit Textilien, Leder und Kunstleder. In: Tagungsband „Oberflächen von spritzgegossenen Kunststoffteilen“. Lüdenscheid. 18.-19.05.2006
[WALL01]	Wallentowitz, H.; Paar, T.: Zukünftige Trends in der Fahrzeugentwicklung - Auswirkungen auf den Kunststoffeinsatz. In: Tagungsband „Kunststoffe im Automobilbau“. Mannheim. 04.-05.04.2001, S. 275-276
[WECK01]	Weck, M.; Day, M.: Maschinenkonzepte zur Mikrozerspanung mit Diamantwerkzeugen. In: Industriediamantensrundschau. IDR 35, Nr. 4. 2001, S. 311-317
[WEHA02]	Wehage, O.; Finke, C.: Metallisch wirkende Oberflächen – ein Trend im Kfz-Interieur. In: Tagungsband „Oberflächen in der Fahrzeuginnenausstattung“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Köln. 24.-25.06.2002, S. 1-29
[WEIK06]	Weikert, M.: Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen. Dissertation Universität Stuttgart. 2006
[WESL04]	Wesling, V.: Maschinenbau II - Fertigungstechnik. In: Vorlesungsskript des Instituts für Schweißtechnik und trennende Fertigungsverfahren. TH Clausthal. 2004, S. 82-90
[WILL06]	Willenborg, E.: Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung. Dissertation RWTH Aachen. 2006
[WIRT03]	Wirtz, W.: Design - Kaufargument und Unterscheidungskriterium. In: Tagungsband „Der Automobile-Innenraum - Design als Wettbewerbsfaktor“. München. 09.12.2003
[WISS04]	Wissenbach, K.: Innovative Entwicklungen im Bereich der Laseroberflächentechnik. In: Tagungsband „Aachener Kolloquium für Lasertechnik AKL'04“. Veranstalter: Fraunhofer ILT, Aachen. 28.-30.04.2004, S. 534-536
[WITT05]	Wittner, E.: Ganz groß in kleinen Tools. In: werkzeug&formenbau, verlag moderne industrie, Landsberg. Ausgabe 11/2005, S. 32-33
[YEH01]	Li-Ya Yeh: Einfluß von Bearbeitungsparametern auf die Oberflächen- und Werkstoffeigenschaften von laserbearbeiteten Mikrobautteilen, Dissertation RWTH Aachen. 2001

11 Anhang

Annex



Scanlab HurryScan 25

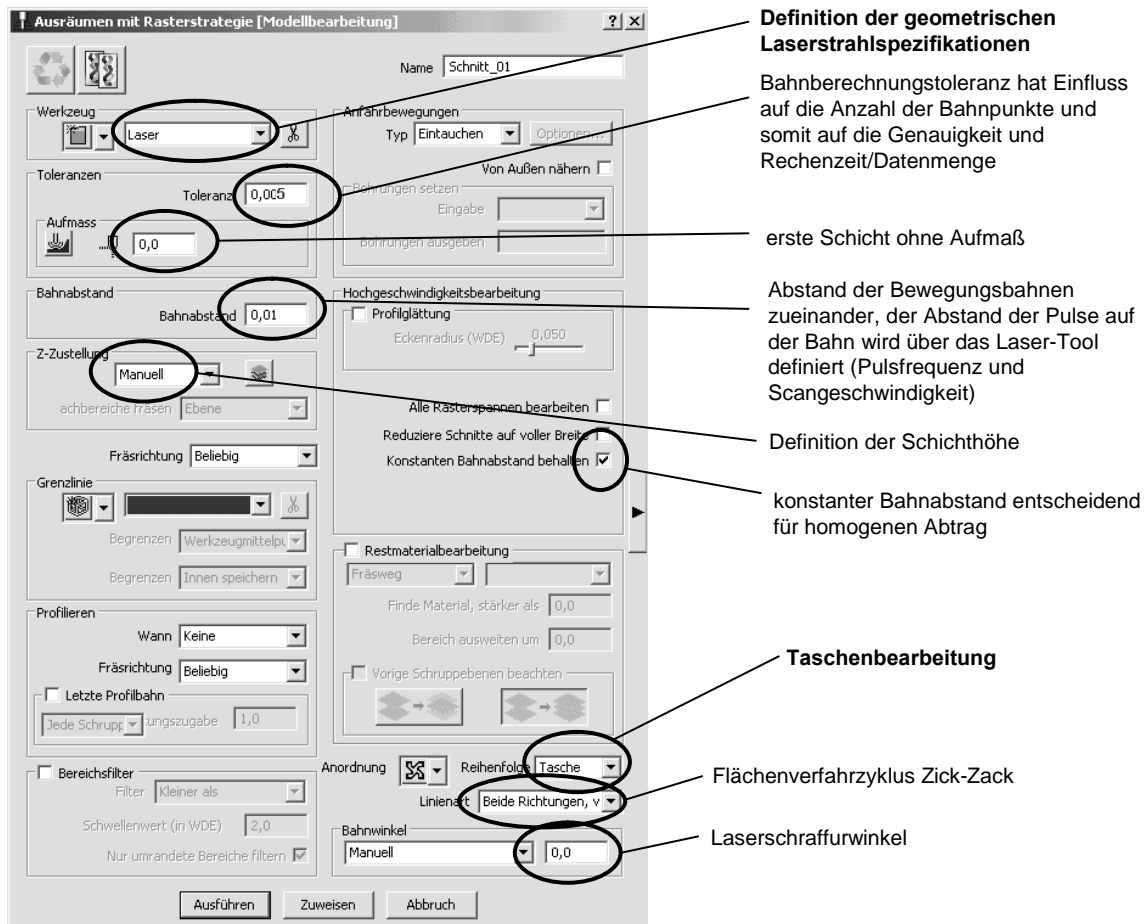
- 2-Achs-Spiegel-Galvanometer-Scanner
- Wasser/Luft-Kühlung
- Abmessungen (x/y/z): 140 x 206,9 x 180 mm³
- Gewicht: 5,8 kg
- Eingangsapertur: 25 mm
- Markier-Geschwindigkeit: max. 0,8 m/s
- Positionier-Geschwindigkeit: max. 5 m/s
- Auslenkwinkelabweichung (Positioniergenauigkeit): < 5 mrad
- Fehler der Achs-Orthogonalität: < 5 mrad
- Nichtlinearität: < 3,5 mrad
- dyn. Wiederholgenauigkeit pro Achse: < 22 µrad
- dyn. Verschiebung durch Temperatur: < 25 µrad/K
- dyn. Vergrößerung des Arbeitsfelds durch Temperatur: < 80 ppm/K
- Nachführfehler (Delay): 0,5 ms
- statische optische Vergrößerung des Arbeitsfelds: < 5 mrad
- statische optische Verzerrung des Arbeitsfelds: < 1,5 mrad

Scanlab VarioScan 40

- Motorische Strahlaufweitung - z'-Achse
- Wasser-/Luftkühlung
- Länge: 190 mm
- größter Durchmesser: 60 mm
- Gewicht: 2,4 kg
- Feste Strahlaufweitung: 2,8 fach
- Eingangsapertur: max. 8 mm
- Ausgangsapertur: max. 20 mm
- Positioniergeschwindigkeit: 80 mm/s bei f = 80 mm
- Nachführfehler (Delay): 1,4 ms



A1: Bild 5-2: Spezifikationen HurryScan 25 und VarioScan 40 (Scanlab AG)
Specifications of HurryScan 25 and VarioScan 40



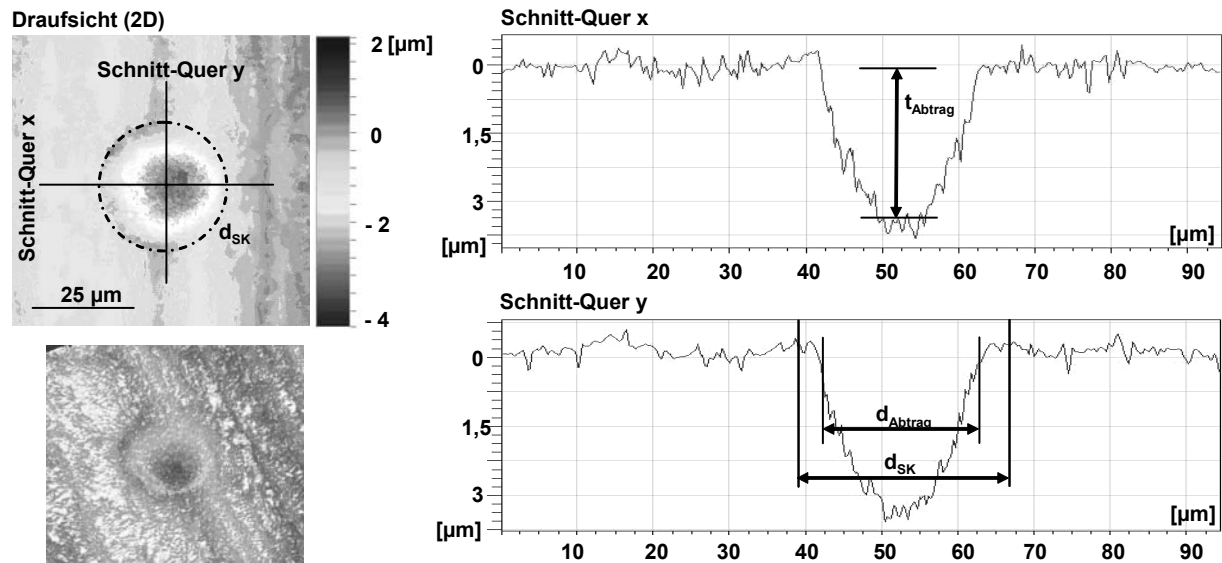
A2: Bild 6-22: CAM-GUI zum z'-Level-Constant-Machining in PowerMill 6.0.08 und die für eine Laserbearbeitung wesentlichen Parameter

CAM-GUI for z'-Level-Constant-Machining in PowerMill 6.0.08 and the substantial parameters for laser machining

Werkstoffkonstante	Variable	Wert	Einheit
Absorptionsindex	κ	60 (bei 20°C)	
Schmelztemperatur	T_s	1500	K
Verdampfungstemperatur	T_v	2945	K
Schmelzenthalpie	H_s	$2,81 \cdot 10^5$	J/kg
Verdampfungsenthalpie	H_v	$6,246 \cdot 10^6$	J/kg
Temperaturleitfähigkeit	χ	$9 \cdot 10^{-6}$	m^2/s bei $T_0 = 20^\circ C$
Werkstoffdichte	ρ	7,85	kg/dm^3
Spezifische Wärmekapazität	c	0,444	J/g K
Wärmeleitfähigkeit	λ_w	28	W/mK
Richtanalyse [%]	C 0,45; Si 0,25; Mn 0,3; P 0,025; S 0,0021; Cr 1,3; Ni 4; Mo 0,25		

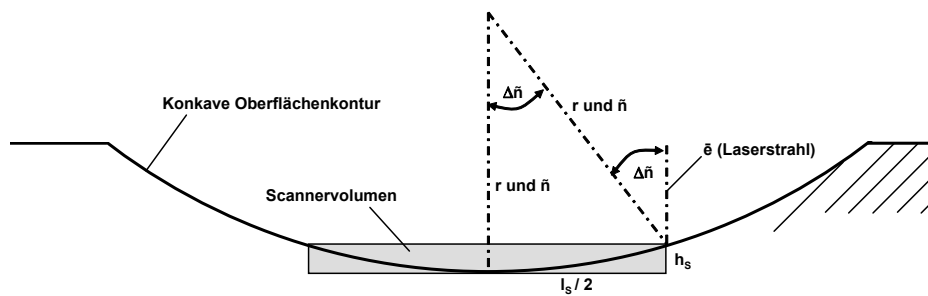
A3: Tabelle 7-1: Werkstoffkonstante und Richtanalyse für 1.2767 (45NiCrMo16) (Herstellerangaben von Buderus, Böhler, Dörrenberg)

Material constant and metallurgical analysis of 1.2767 (45NiCrMo16) (manufacturer data of Buderus, Böhler, Dörrenberg)



Arbeitsabstand in Maschinenkoordinaten $Z_{\text{Ref}} = -71,655 \text{ mm}$; ebene Oberfläche; Umgebungstemperatur $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; Material 1.2767, Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ μm}$; $I_A = 30 \text{ A}$; $f_P = 40 \text{ kHz}$

A4: Bild 7-5: Detaillierte Auswertung eines Einzelpulses mit Wyko NT 1100
Detailed analysis of a single pulse with Wyko NT 1100



A5: Bild 7-34: Trigonometrische Eingriffsverhältnisse im Scannerfeld
Trigonometric relations in the scanner field

Lebenslauf

Johannes Mario Kordt

geboren am 06. Juni 1972 in Aachen

1978 - 1983	Besuch der Gemeinschaftsgrundschule Nord, Jülich
1983 - 1992	Besuch des Gymnasiums Haus Overbach, Jülich – Barmen
1992 - 1993	Wehrdienst in der Panzerkaserne Düren, Instandsetzungskompanie 530
1993 - 1997	Grundstudium Maschinenbau an der RWTH Aachen
1997 - 2001	Hauptstudium Maschinenbau an der RWTH Aachen (Abschluss: Dipl.-Ing. der Fachrichtung Fertigungstechnik)
2002 - 2007	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer–Institut für Produktions- technologie IPT, Aachen (Abteilung Prozesstechnologie)
ab 2007	Mitarbeiter der Freudenberg Anlagen- und Werkzeugtechnik GmbH, Laudenbach (Leiter Technologiemanagement Werkzeugbau)
