

Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels  
Analyse akustischer Emissionen bei der  
Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 182



**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse  
akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-  
Pikosekundenlasern**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Patricia Weber  
aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 25.02.2014  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke





## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Ich bedanke mich bei Prof. Schulze für das entgegengebrachte Vertrauen in Bezug auf meine Tätigkeiten am wbk Institut für Produktionstechnik und die Übernahme des Hauptreferats. Weiterhin möchte ich Prof. Klocke danken für das Interesse an meiner Arbeit, die konstruktiven Anregungen und die Übernahme des Korreferats.

Ein großer Dank gilt meinen Mikrokollegen Christoph Ruhs, Marco Deuchert, Mateusz Chlipala und Philipp Hoppen für die gute Stimmung, das stets offene Ohr und die vielen schönen gemeinsamen Erinnerungen an die ich mich gerne zurückerinnern werde. Mein besonderer Dank gilt Friedbert Matthes für die hervorragende Zusammenarbeit an der Lasermikrobearbeitungsmaschine, die Unterstützung in der Betreuung der Studenten bei konstruktiven Arbeiten, sowie dem großen Engagement bei der Instandhaltung und -setzung des Versuchsstands. Ein Dank gilt auch den wbk- und insbesondere meinen Bürokollegen Dr. Chris Becke und Stefan Klotz sowie den Werkstattkollegen, die mich bei meiner Arbeit moralisch und tatkräftig unterstützt haben. Ich habe stets den Gedankenaustausch zwischen den drei Abteilungen FWT/MAP/PRO des wbks genossen. Vielen Dank auch den Kollegen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vielen Dank Herrn Zibat für seine Unterstützung am Laboratorium für Elektronenmikroskopie, Frau Ohl für die Probenpräparation in der Materialographie und Herrn Dr. Klein für seine Unterstützung bei den Absorptionsmessungen am Lichttechnischen Institut.

Ebenfalls danken möchte ich den Studenten, die mich während meiner Arbeit in Form von Studien- und Abschlussarbeiten oder als Hilfwissenschaftler mit größtem Engagement unterstützt haben. Ihr persönliches Interesse hat zu einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre in unserem „Laser“-Team beigetragen, weshalb es mir immer eine große Freude war mit Ihnen zusammenzuarbeiten.

Ich danke meinen Eltern und meiner Familie für den Zuspruch, Ihre Unterstützung, die Ausdauer und das „Auf-mich-Stolz-sein“.

Mein größter Dank gilt meinem Freund Thilo, der immer für mich da ist, Verständnis hat, mich auffängt, mir ein Lächeln auf die Lippen zaubert und mir mit seiner Liebe Halt gibt. Danke, dass es dich in meinem Leben gibt.

Patricia Weber



## **Abstract**

Due to its flexible application lasers are used in many innovative areas of industrial production, such as the electronics industry, the automotive industry, the solar sector and medical technology. The non-contact and thus force-free removal of material by laser sublimation allows machining of very hard materials such as steel, tungsten carbide and ceramics, but also sensitive materials like glass or silicon.

Especially in micro manufacturing tolerances are narrow and thus make an automated, controlled and regulated process essential. The integration of sensors and the development of monitoring and control units in the process are an important part of current research and development work.

The aim of this work is to increase the process repeatability by analyzing acoustic emissions during micro laser ablation with UV picosecond lasers. For this, the single-pulse, line, plane and 2½D ablation are investigated. In addition, formation mechanisms of holes on the ground of machined cavities are studied and remedies derived. Based on these new approaches the use of optical and acoustic emissions for focus positioning and control are able to increase the repeatability of the machining quality. An objective evaluation of the focus position towards the workpiece surface is realized by identification of uniform process-relevant criteria in the behavior of the acoustic emission. Furthermore, a specially developed LabVIEW program is implemented which evaluates the data and communicates automatically with the machine control. Thus the focus position is automatically and reproducibly adjusted on the workpiece's surface.



## **Kurzfassung**

Auf Grund seiner flexiblen Einsatzmöglichkeiten findet der Laser als Werkzeug stetigen Einzug in viele innovative Bereiche der industriellen Produktion, wie der Elektronikbranche, der Automobilbranche, dem Solarsektor und der Medizintechnik. Der berührungslose und damit kraftfreie Abtrag mittels Laser erlaubt mittels Sublimation die schädigungsarme Strukturierung sehr harter Materialien, wie Stähle, Hartmetalle und Keramiken, aber auch sensibler Werkstoffe wie Glas und Silizium.

Gerade in der Mikrofertigung sind die einzuhaltenden Toleranzen sehr gering und machen einen automatisierten, kontrollierten und geregelten Prozess unabdingbar. Die Integration von Sensoren und die Entwicklung von Kontroll- und Regelungseinheiten im Prozess sind ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern zu leisten. Dafür wird das Prozessverständnis für das Verhalten der Laserablation bei variierenden Parametereinstellungen erarbeitet, indem der Einzelpuls-, Bahn-, Flächen- und 2½D-Abtrag untersucht wird. Zudem werden Entstehungsmechanismen von Löchern im Grund der Kavitäten untersucht und Abhilfemaßnahmen abgeleitet. Darauf aufbauend wird mit neuen Ansätzen zur Nutzung optischer und akustischer Prozessemissionen zur Fokuslagenpositionierung und –regelung die Wiederholbarkeit der Bearbeitungsqualität erhöht. Um eine objektive Bewertung der Fokuslage zur Werkstückoberfläche zu erzielen, werden prozessrelevante einheitliche Kriterien im Verhalten der akustischen Emission identifiziert. Dafür wird ein eigens entwickeltes LabVIEW-Programm implementiert, welches selbständig mit der Maschinensteuerung kommuniziert und den Fokus automatisch auf der Werkstückoberfläche positioniert. Mit der Analyse der akustischen Signale lässt sich automatisiert und reproduzierbar die Fokuslage und die Laserleistung einstellen.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>III</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Kenntnisstand</b>	<b>4</b>
2.1 Grundlagen der Mikrolaserstrukturierung mit Ultrakurzpulslasern	4
2.1.1 Strahlformung für die Mikrostrukturierung	4
2.1.2 Absorption und Laser-Material-Wechselwirkung	8
2.1.3 Prozessemissionen	11
2.1.4 Prozessparameter	13
2.2 Stand der Technik zur Lasermikrostrukturierung mit gepulsten Lasern	15
2.2.1 Abtragen mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich	16
2.2.2 Abtragen mit Pulsdauern im Pikosekundenbereich	17
2.2.3 Abtragen mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich	17
2.2.4 Löcher im Abtragergebnis	19
2.3 Stand der Technik zur Fokuslagenüberwachung beim Laserabtragen	21
2.3.1 Fokuslagenüberwachung mit unabhängig vom Abtragprozess messenden Sensoren	23
2.3.2 Fokuslagenüberwachung durch Erfassung von Prozessemissionen	24
<b>3 Zielsetzung und eigener Ansatz</b>	<b>34</b>
<b>4 Versuchseinrichtung und -methodik</b>	<b>36</b>
4.1 Laserbearbeitungsanlage und integrierte Sensortechnik	36
4.2 Verwendete Werkstoffe	41
4.3 Proben topographie und Absorptionseigenschaften	42
4.4 Strahldiagnostik und Werkzeugcharakterisierung	47
4.5 Statistische Versuchsplanung - Design of Experiment (DoE)	49
4.5.1 Auswahl der Versuchspläne	50
4.5.2 Statistische Datenanalyse	52
4.5.3 Response Surface Methode (RSM)	52
4.6 Optische Methode zur Ermittlung der Fokuslage mittels „line test“	53
4.7 Prozessentwicklung zur Mikrolaserablation	54
4.8 Vorgehen bei der Entwicklung der akustischen Prozesskontrolle	58

<b>5 Ergebnisse</b>	<b>59</b>
5.1 Prozessfensteranalyse	59
5.1.1 Einzelpulsabtrag	59
5.1.2 Bahnabtrag	64
5.1.3 Ermittlung des Abtragverhaltens von WC-12Co zur Flächenablation ( $2\frac{1}{2}D$ )	68
5.2 Prozessparameterfindung im Schnelltest mittels RSM	72
5.2.1 Definition des Versuchsraums mit DoE	72
5.2.2 Ergebnis der Bearbeitung (WC-12Co)	74
5.2.3 Statistische Datenanalyse, Regression und Modelluntersuchung	75
5.2.4 Operations Research (OR) und Ergebnis des Schnelltests	76
5.2.5 Diskussion der Haupt- und Wechselwirkungseffekte	78
5.2.6 Validierung des Schnelltests für weitere Materialien und Diskussion	81
5.3 Entstehungsmechanismus unerwünschter Löcher im Bearbeitungsergebnis	83
5.3.1 Klassifizierung und Einflussanalyse zur Entstehung von Löchern	84
5.3.2 Ergebnisse der Untersuchung zum Entstehungsmechanismus	86
5.3.3 Diskussion zur Entstehung von Löchern	93
5.4 Analyse akustischer und optischer Emission	94
5.4.1 Einheit zur Erfassung akustischer (AE) Emissionen	95
5.4.2 Einheit zur Erfassung optischer (OE) Emissionen	101
5.4.3 Einflussanalyse und Versuchsplanung	102
5.4.4 Ergebnisse akustischer und optischer Emissionserfassung	105
5.4.5 Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Werkstoffe	115
5.4.6 Diskussion der Ursache des lokalen Signaleinbruchs der AE	118
5.5 Akustische Prozesskontrolle und- automatisierung	120
5.5.1 Strategieentwicklung und Diskussion der Nutzung von AE zur akustischen In-Prozess-Regelung	120
5.5.2 Ableitung des Regelkriteriums	121
5.5.3 Ergebnisse der akustischen Prozesskontrolle und -automatisierung	122
<b>6 Abschließende Bewertung</b>	<b>136</b>
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>142</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Anhang</b>	<b>XII</b>

## Abkürzungen

Kurzzeichen	Begriff
AE	Akustische Emission
CE	Konische Emission (Conical Emission)
DoE	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)
ECM	Elektrochemisches Abtragen (Electro Chemical Machining)
EDM	Funkenerosion (Electrical Discharge Machining)
ESEM	Spezielle Variante des Rasterelektronenmikroskops (Environmental Scanning Electron Microscope)
FIB	Ionenfeinstrahlanlage (Focused Ion Beam)
FFT	Fast-Fourier-Transformation
IR	Infrarotstrahlung
LS	Methode der kleinsten Fehlerquadrate
OE	Optische Emission
OR	Optimierungsmethode (Operations Research)
PK	Parameterkombination
PL	Prozessleuchten
PRESS	Prognose-Bestimmtheitsmaß (Predicted Residual Sums of Squares)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RSD	Response Surface Design
RSM	Response Surface Methode
SPP	Strahlparameterprodukt
TEM <sub>00</sub>	Transversale elektromagnetische Mode
UV	Ultraviolettstrahlung
VIS	Sichtbare Strahlung
WW	Wechselwirkung

## Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
a	Temperaturleitfähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
A	Absorption	[%]
AE <sub>17 kHz</sub>	Amplitude der 17 kHz-Frequenz der AE	[dB]
$\alpha$	Abstand zum Zentrumspunkt	[-]
b <sub>Bahn</sub>	Bahnbreite	[ $\mu$ m]
BA	Bahnabstand	[ $\mu$ m]
BÜ	Bahnüberlapp	[%]
$\beta_i$	Regressionskoeffizient	[-]
c	Abtragtiefe	[ $\mu$ m]
c <sub>p</sub>	Spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]
D	Strahldurchmesser vor der Fokussierung	[mm]
d <sub>F</sub>	Fokusdurchmesser, Position z = 0 mm = z <sub>F</sub>	[mm]
d <sub>eff</sub>	effektiver Abtragdurchmesser	[ $\mu$ m]
d <sub>w</sub>	Durchmesser des Schmelzebereichs	[ $\mu$ m]
dz	Abstand, Zustellungsinkrement	[ $\mu$ m]
$\varepsilon$	Fehler	[-]
f	Brennweite	[mm]
f <sub>rep</sub>	Repetitionsrate	[kHz]
H	Fluenz, mittlere Energiedichte pro Puls	[J/cm <sup>2</sup> ]
HV	Vickershärte	[-]
I <sub>0</sub>	Schwellintensität I (r = 0, z = 0)	[J]
I <sub>e</sub>	Einzelmessstrecke	[mm]
I <sub>r</sub>	Gesamtmessstrecke	[mm]
I <sub>t</sub>	Taststrecke	[mm]
I <sub>v</sub>	Einfallende Leistungsdichte	[W/m <sup>2</sup> ]

Formelzeichen	Größe	Einheit
I	Intensität	[J]
$I_s$	Materialspezifische Schwellintensität für das Abtragen	[J]
i	Störgrößen	[-]
j	Steuergrößen	[-]
k	Anzahl von Faktoren	[-]
K	Strahlqualität	[-]
$\kappa$	Wärmeleitfähigkeit	[ $\mu\text{m}$ ]
L	Bahnlänge	[ $\mu\text{m}$ ]
$l_\alpha$	Optisch Eindringtiefe	[nm]
$l_{th}$	Thermische Eindringtiefe	[nm]
$\lambda$	Wellenlänge	[nm]
$\lambda_c$	Grenzwellenlänge	[mm]
$L_p$	Schalldruckpegel	[dB]
m	Anzahl der Pulse	[-]
M	Stellgrößen	[-]
$M^2$	Beugungsmaßzahl	[-]
maxDiff	Maximale Abweichung der Mittelwerte	[ $\mu\text{m}$ ]
n	Anzahl der Ebenen	[-]
$n_v$	Versuchspunkteanzahl	[-]
N	Anzahl Einzelversuche	[-]
$N_{min}$	Mindestversuchsumfang	[-]
$N_{min,RSM}$	Mindestversuchsumfang mittels Schnelltest	[-]
p	Schalldruck	[Pa]
$p_0$	Bezugsdruck	[Pa]

Formelzeichen	Größe	Einheit
P	Optische Gesamtleistung	[mW]
$P_{av}$	Mittlere Leistung	[mW]
$P_{av, AE}$ (Ist)	Akustisch ermittelte mittlere Leistung	[mW]
PA	Pulsabstand	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta P_{max}$	maximale Abweichung der Leistung	[mW]
$P_{pk}$	Pulsspitzenleistung	[W]
PÜ	Pulsüberlapp	[%]
$Q_p$	Pulsenergie	[J]
r	Abtradius	[ $\mu\text{m}$ ]
$r_{eff}$	Effektiver Abtradius	[ $\mu\text{m}$ ]
R	Reflexion	[%]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß	[-]
$R^2_{adj}$	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß	[-]
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	Rautiefe im Profilschnitt	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta R$	Rückinkrement	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta R_F$	Rückinkrement für die Feinpositionierung	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta R_P$	Rückinkrement für die Präzisionspositionierung	[ $\mu\text{m}$ ]
PA	Pulsabstand	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta P_{max}$	Maximale Abweichung der Leistung	[mW]
$P_{pk}$	Pulsspitzenleistung	[W]
$Q_p$	Pulsenergie	[J]
$\theta$	Divergenzwinkel	[°]
$\rho$	Dichte des Werkstückwerkstoffs	[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Formelzeichen	Größe	Einheit
S <sub>a</sub>	arithmetischer Mittelwert des Flächenparameters	[ $\mu\text{m}$ ]
S <sub>z</sub>	Spitzenhöhe innerhalb der Messfläche	[ $\mu\text{m}$ ]
$\sigma$	Standardabweichung	[-]
$\sigma^2$	Varianz	[-]
t	Interaktionszeit, Pulsdauer	[s]
t <sub>s</sub>	Dauer der Spannungfortpflanzung im Material	[s]
T	Transmission	[%]
T <sub>S</sub>	Schmelztemperatur	[°C]
T <sub>Subl</sub>	Sublimationstemperatur	[°C]
T <sub>P</sub>	Pulstemperatur	[°C]
T <sub>V</sub>	Verdampfungstemperatur	[°C]
$\tau_e$	Abkühlzeit der Elektronen	[s]
$\tau_H$	Pulsperiodendauer	[s]
$\tau_i$	Heizzeit des Gitters	[s]
v	Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]
w(z)	Strahlradius an der Position z	[ $\mu\text{m}$ ]
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert	[-]
x <sub>med</sub>	Median	[-]
Z <sub>A</sub>	Arbeitsbereich	[mm]
Z <sub>F</sub>	Position des Fokus auf der Werkstückoberfläche	[mm]
Z <sub>R</sub>	Rayleighlänge	[mm]
Z <sub>OF</sub>	optisch gefundene Fokusslage	[mm]
Z <sub>AF</sub>	akustisch gefundene Fokusslage	[mm]
Z <sub>SF</sub>	Startwert der Feinpositionierung	[mm]
Z <sub>SP</sub>	Startwert der Präzisionspositionierung	[mm]





# 1 Einleitung

Die voranschreitende Miniaturisierung in vielen innovativen Bereichen der industriellen Produktion, wie der Elektronikbranche, der Automobilbranche, dem Solarsektor und der Medizintechnik fordert wirtschaftliche, flexible Technologien zur Herstellung von Mikrostrukturen oder Mikrokomponenten mit hohen Stückzahlen [Gei-03]. Auf Grund seiner flexiblen Einsatzmöglichkeiten findet der Laser als Werkzeug stetigen Einzug in die Fertigung der genannten und weiterer Branchen. Der berührungslose und damit kraftfreie Abtrag mittels Laser erlaubt die Strukturierung sehr harter Materialien, wie Stähle, Hartmetalle und Keramiken. Aber auch sensible Materialien, wie Glas und Silizium, können schädigungsarm abgetragen werden [Du-13]. Das Material wird idealer Weise mittels Sublimation direkt verdampft, weshalb das Laserabtragen zu den thermischen Abtragverfahren gehört und alle festen Materialien unabhängig von ihrer Härte und Leitfähigkeit bearbeiten kann [DIN 8580 bzw. 8590].

Mikrolaserabtragen findet Einsatz zur Direktstrukturierung von Bauteilen, welche wiederum als verschleißbeständige Werkzeuge dienen können. Die stetig wachsende Nachfrage nach Mikrostrukturen und Mikrokomponenten in hohen Stückzahlen kann oft durch eine Direktstrukturierung nicht mehr zeit- und kosteneffektiv bewerkstelligt werden, so dass hier Replikationsverfahren, wie beispielsweise der Pulverspritzgießprozess (Powder Injection Molding, PIM) oder der Metall-Kapillardruckgießprozess zum Einsatz kommen [Gei-03, Pre-11, Sch-08]. Die Verschleißbeständigkeit der kostenintensiven Formeinsätze und Werkzeuge ist dabei von großem Interesse, weshalb der Einsatz neuer verschleißbeständiger Materialien angestrebt wird [Eve-97, Hel-00, Mar-05, Pio-11].

Für den Metall-Kapillardruckgießprozess werden derzeit forschungsseitig überwiegend keramische Gussformen verwendet, welche aus technischen Keramiken wie Aluminiumoxid oder Siliziumnitrid bestehen [Pre-11]. Die Abformung keramischer Mikrobauteile im Keramikpulverspritzgießprozess (CIM) erfolgt in Formeinsätzen aus gehärteten Stählen und Hartmetallen. Der Werkzeugbau mittels alternativer Verfahren zum Laserabtragen, wie dem Mikrofräsen, der Mikrofunktenerosion (EDM) oder dem elektrochemischen Abtragen (ECM) stößt bei der Strukturierung sehr harter und/oder nicht leitfähiger Materialien an verfahrensbedingte Grenzen [Du-13, Eve-97, Klo-07]. Das Mikrofräsen ist primär durch die Härte der zu bearbeitenden Materialien und im Miniaturisierungspotenzial begrenzt. Oft werden Hartmetallfräswerkzeuge eingesetzt, deren Härte der des zu bearbeitenden Hartmetalls oder der Keramik

nicht Stand halten kann. EDM und ECM fordern eine elektrische Mindestleitfähigkeit der zu bearbeitenden Werkstoffe, welche gerade bei Keramiken nicht immer gegeben ist. Die drei genannten Verfahren sind des Weiteren in ihrem Miniaturisierungspotenzial aufgrund der kleinsten verfügbaren Werkzeuge auf Mindestabmaße von bis zu 20  $\mu\text{m}$  limitiert.

Die Möglichkeit der Strahlfokussierung auf nur wenige Mikrometer, macht den Laser zu einem besonders geeigneten Werkzeug für die Fertigung von Mikrostrukturen. Er ermöglicht einen flexiblen, kontaktfreien Abtrag von Mikrostrukturen in eine Vielzahl von festen Werkstoffen.

Mit einem Marktvolumen von rund 2 Mrd. US\$ in 2011 ist die Mikrolasertechnologie bereits heute eine der am stärksten wachsenden Technologien des 21. Jahrhunderts [Opt-12]. Laut einer Studie der Strategies Unlimited im Jahre 2012 zum Thema „Industrielle Laserlösungen“ bildet unter anderem der Bereich der Lasermaterialbearbeitung die größten Marktanteile. Die Prognose für 2015 besagt einen Laserumsatz von über 9 Billionen US\$ (Abbildung 1-1). Allein der Anteil der Materialbearbeitung beläuft sich auf 2 Billionen US\$ Jahresumsatz für das Jahr 2012 [Fra-12, Str-12]. Trotz hoher Wachstumsprognosen steht die Lasermaterialbearbeitung immer noch vor großen Herausforderungen und Entwicklungsbedürfnissen. Neben der Prozessentwicklung zur Erzielung der gewünschten Präzision im Submikrometerbereich sind auch unternehmerische Anforderungen, wie die Wirtschaftlichkeit, die Zuverlässigkeit und die Reproduzierbarkeit, Bestandteile gegenwärtiger Entwicklung der Laserfertigungstechnologie. Anforderungen des Kunden und des Wettbewerbs stehen dabei stets im Vordergrund. Abbildung 1-1 verdeutlicht die Wechselwirkungen und wichtige Optimierungsgrößen der Lasermaterialbearbeitung und ihrer Markttreiber.

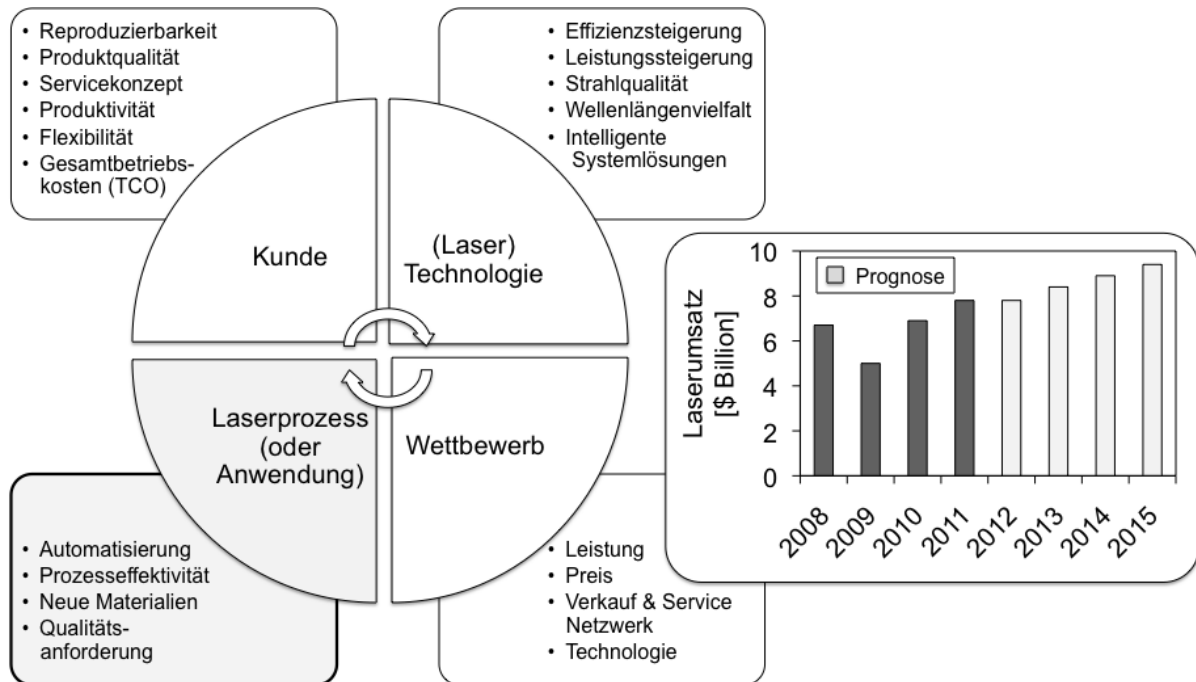


Abbildung 1-1: Markttreiber und Trends gemäß [Fra-12], Weltweiter Laser Markt, Marktstudie 2012 – 2015 gemäß [Str-12, Fra-12]

Gerade in der Mikrofertigung sind die einzuhaltenden Toleranzen sehr gering und machen einen automatisierten, kontrollierten oder gar geregelten Prozess unabdingbar [Dub-08, Kra-13]. Die Integration von Sensoren und die Entwicklung von Kontroll- und Regelungseinheiten im Prozess sind ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [Dub-08], die unter anderem auch im Rahmen dieser Arbeit bei der Formeinsatzherstellung mittels Laserabtragen als Teilbereich des Sonderforschungsbereichs 499 „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ angegangen wurden. Einen Schwerpunkt stellt dabei die Entwicklung des Prozesses und eine Steigerung der Qualität, Robustheit und Prozesssicherheit dar [Kra-13].

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, in diesem Kontext mit Unterstützung der Erfassung von akustischen Emissionen gezielt und automatisiert Prozessparameter einzustellen, die zu einem reproduzierbaren Abtragsbild führen.

## 2 Kenntnisstand

### 2.1 Grundlagen der Mikrolaserstrukturierung mit Ultrakurzpulslasern

Das Abtragen von Werkstoffen mit Arbeitsgenauigkeiten im Submikrometerbereich von  $0,1\ \mu\text{m}$  bis  $8\ \mu\text{m}$  wird als Ultrapräzisionsbearbeitung bezeichnet [Pop-05]. Der Einsatz von ultrakurzen Pulsen mit sehr hohen Pulsspitzenleistungen eines fokussierten Gaußstrahls ermöglicht auf Grund der nahezu wärmeintragsfreien Laserablation sehr hohe Bearbeitungs-genauigkeiten und geringe Schädigungszonen, da die Wechselwirkungszeit meist auf atomarer Ebene liegt. Die Einhaltung dieser präzisen Arbeitsgenauigkeiten stellt hohe Anforderungen an das Lasersystem, dessen Strahlformung, die Maschine und die Prozessführung, auf dessen wesentliche Grundlagen in diesem Kapitel näher eingegangen wird.

#### 2.1.1 Strahlformung für die Mikrostrukturierung

Der fokussierte Laserstrahl in Form eines Gaußstrahls ist gerade für die Mikrolaserablation besonders interessant, da dieser beugungsbegrenzt fokussiert werden kann. Die Intensitätsverteilung im Fokus folgt dabei einer Gauß'schen Intensitätsverteilung (= transversale elektromagnetische Mode,  $\text{TEM}_{00}$ ). Die Fokussierbarkeit von Laserstrahlen ist dabei abhängig von der Wellenlänge, der Strahlqualität und der Fokussieroptik. Der Laserstrahl mit der Wellenlänge  $\lambda$  wird in seinem Strahlengang durch verschiedene optische Komponenten geführt und dabei manipuliert. Ein Strahlaufweiter weitet den Strahl auf den Durchmesser  $D$  auf, welcher anschließend durch ein Objektiv mit der Brennweite  $f$  zum Durchmesser  $d_F$  fokussiert wird. Die Strahlaufweitung ist hier ein Mittel zur stärkeren Fokussierung des Laserstrahls [Hüg-09]. Abbildung 2-1 zeigt einen fokussierten Gaußstrahl und dessen wichtigste Kenngrößen.

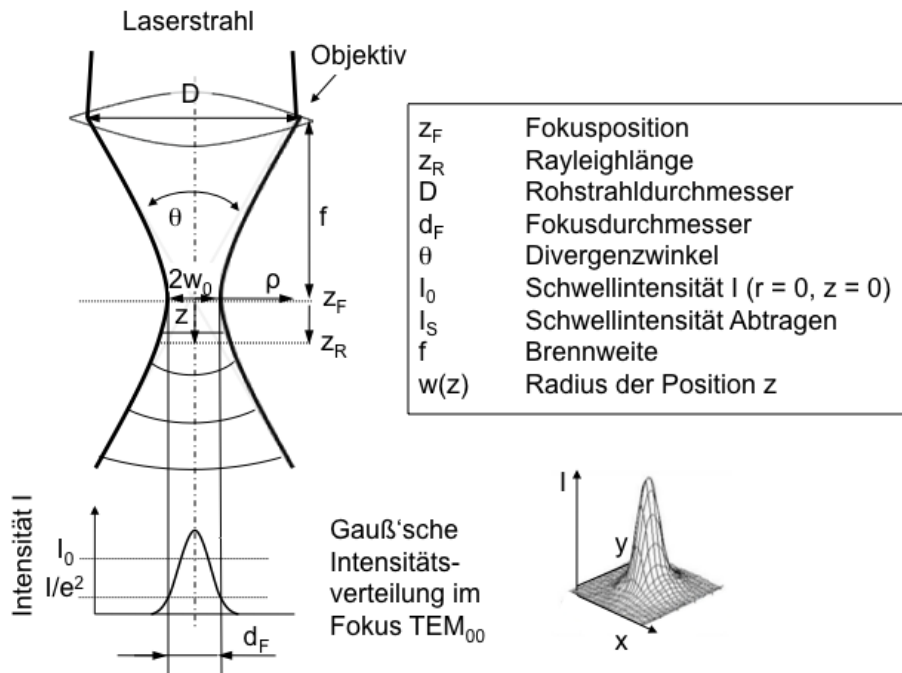


Abbildung 2-1: Kenngrößen fokussierter Laserstrahlung und Gauß'sche Intensitätsverteilung im Fokus  $TEM_{00}$  [Bah-00]

Wie dargestellt, bildet der Strahl entlang seiner Ausbreitungsrichtung in z eine Strahltaile mit dem Radius  $w(z)$  aus, der sich theoretisch wie folgt errechnen lässt [Klo-07]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

Formel 2-1

Der schmalste Radius  $w_0$  der Taille, in der Position  $z = 0 \text{ mm} = z_F$ , befindet sich im sogenannten Fokus. Bei einem idealen Gaußprofil ist der Durchmesser  $d_F = 2w_0$  im Fokus durch Abfall der Strahlintensität (gemäß 86 % Methode) auf den Wert  $1/e^2$  definiert [Pas-08]. Die Rayleighlänge  $z_R$ , beschreibt die Distanz, bis zu der sich die bestrahlte Querschnittsfläche, ausgehend von der Strahltaile  $z_F$ , verdoppelt. Sie errechnet sich zu:

$$z_R = \frac{\pi \cdot d_F^2}{4\lambda}$$

Formel 2-2

Der Strahl weitet sich im Fernfeld  $z \gg z_R$  mit dem Divergenzwinkel  $\theta$  auf. Die radiale Intensitätsverteilung von Gaußstrahlen errechnet sich wie folgt [Pas-08]:

$$I(x,y,z) = I(\rho,z) = I_0 \left( \frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left\{ -\frac{2\rho^2}{w^2(z)} \right\} \quad \text{Formel 2-3}$$

Die Intensität  $I$  ist abhängig vom Radius  $r$  und der Position  $z$  der Strahlachse.  $I_0$  ist die Intensität für  $r = 0$  und  $z = 0$ . Durch Integration der Intensität über die Querschnittsfläche lässt sich die optische Gesamtleistung  $P$  des Strahls zu

$$\begin{aligned} P &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(\rho,z) \rho d\rho d\phi = 2\pi I_0 w_0^2 \int_0^\infty \frac{\rho}{w^2(z)} \exp \left\{ -\frac{2\rho^2}{w^2(z)} \right\} d\rho \\ &= 2\pi I_0 w_0^2 \left[ -\frac{1}{4} \exp \left\{ -\frac{2\rho^2}{w^2(z)} \right\} \right]_0^\infty = \frac{1}{2} \pi I_0 w_0^2 \quad \text{Formel 2-4} \end{aligned}$$

berechnen [Ebe-08]. Mit  $P = P_{av}$  (mittlere Leistung) kann somit die Intensität im Fokus  $I(z = 0) = I_0$  mit  $w(z = 0) = w_0$  [Pas-08] berechnet werden.

$$I_0 = \frac{2P_{av}}{\pi(w_0)^2} \quad \text{Formel 2-5}$$

Der effektive Abtragdurchmesser  $d_{eff}$  ist der Durchmesser des Einzelpulsabtrags, der mit dem Oberflächenniveau des Werkstücks zusammenfällt. Dieser Durchmesser beinhaltet nicht den wärmebeeinflussten Bereich der Schmelzeaufwurfzone. Der Durchmesser des Einzelpulsabtrags, der den wärmebeeinflussten Schmelzebereich mit einbezieht, wird als  $d_w$  bezeichnet. Abbildung 2-2 (links) visualisiert die Durchmesser anhand des Querschnitts eines Einzelpulsabtragkraters. Wie Abbildung 2-2 (rechts) verdeutlicht, kann der effektive Bearbeitungsdurchmesser  $d_{eff}$  durch asymptotisches Nähern an die Schwellintensität ( $I \approx I_S$ ) für das Abtragen des Werkstoffs kleiner werden als der Laserstrahldurchmesser  $d_F$  im Fokus [Lie-06, Pop-05].

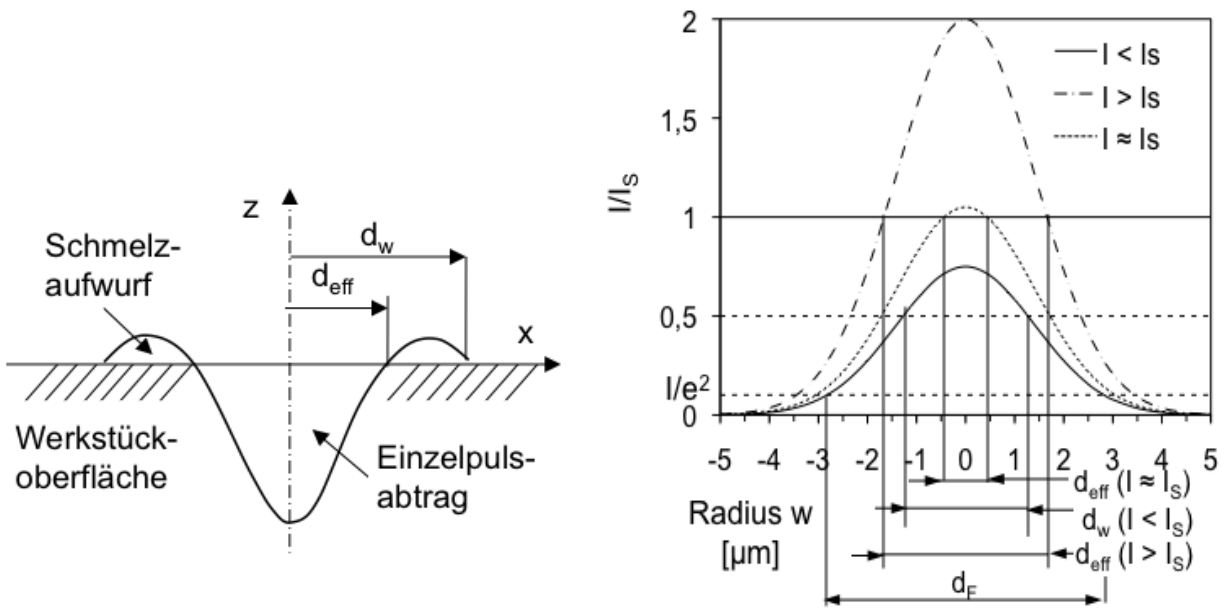


Abbildung 2-2: Schema der Durchmesser  $d_w$  und  $d_{eff}$  beim Einzelpulsabtrag (links), Ausdehnung des Abtrags für variierende Intensitäten  $I$  für  $z_F$  (rechts) [Pop-05]

Das Strahlparameterprodukt SPP vereint die Größen zur Aussage über die Strahlqualität  $K$  und die Fokussierbarkeit. Es wird folgendermaßen berechnet:

$$SPP = \frac{\theta}{4} \cdot d_F = M^2 \frac{\lambda}{\pi} = \frac{\lambda}{K \cdot \pi} \tag{Formel 2-6}$$

Theoretisch lässt sich zur Ultrapräzisionsbearbeitung der Bearbeitungsdurchmesser durch Verkleinern der Wellenlänge und der Brennweite oder durch Vergrößern des Strahldurchmessers  $D$  vor dem Objektiv reduzieren [Hüg-09, Pop-05]. Die Beugungsmaßzahl  $M^2$  vergleicht den Divergenzwinkel des realen Strahls mit dem des idealen Gaußstrahls und ist damit ein Maß für die Fokussierbarkeit des Strahls. Für reale Strahlen ist  $M^2$  immer größer 1. Für die Mikrobearbeitung ist  $M^2$  eine wichtige Kennzahl, da diese die kleinstmögliche Fokussierbarkeit beschreibt. Je kleiner  $M^2$  ist, umso kleiner ist der mögliche erreichbare Fokusbereich [Eic-04].

In der Praxis weicht der reale Strahl vom idealen Gaußstrahl ab, weshalb eine Messung des realen Strahlprofils unumgänglich ist [Eic-04]. Reale Laserstrahlen besitzen einen höheren Divergenzwinkel und bei Fokussierung durch eine Linse einen größeren Strahldurchmesser als der fokussierte ideale Gaußstrahl [Klo-07]. Dadurch verringert sich die Leistungs- und Strahldichte im Fokus. Der Arbeitsbereich  $z_A$ , in welchem sich die Strahltaile auf der Oberfläche befinden

soll, beschreibt den Toleranzbereich der Fokuspositionierung um die Position  $z_F$  coaxial zum Laserstrahl. Dieser muss empirisch überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden, da die theoretischen idealen Größen der Rayleighlänge und des Fokusbereichs von den realen abweichen können [Bah-00, Eic-04, Klo-07].

### 2.1.2 Absorption und Laser-Material-Wechselwirkung

Die Effizienz des Abtrags mittels Laserstrahlung hängt maßgeblich von der Absorption der Strahlung im Werkstück ab. Dabei spielen die Wellenlänge und die eingebrachte Energie eine entscheidende Rolle. Von dem zu bearbeitenden Material und dessen Absorptionseigenschaften hängt die Wahl der geeigneten Wellenlänge zur Mikrostrukturierung ab. Kurze Wellenlängen im ultravioletten Bereich sind besonders geeignet für die Strukturierung von Hartmetallen, Keramiken, Kunststoffen und auch transparenten Materialien, wie Gläsern [Dul-08, Hel-00, Hüg-09, Yeh-01]. Die Absorption der Laserstrahlung hängt neben der Wellenlänge von den optischen Konstanten des Werkstoffs, dem geometrischen Zustand der Oberfläche, der chemischen Beschaffenheit der Oberfläche und der Temperatur ab, wobei letztere wiederum alle drei zuvor genannten Parameter beeinflusst [Pop-05]. Die einfallende Laserstrahlung kann an der Oberfläche des Werkstücks reflektiert (R), transmittiert (T) und absorbiert (A) werden. Bei Probendicken von mehreren Millimetern kann die Transmission vernachlässigt werden, wie beispielsweise im Fall von Metallen ( $T = 0$ ). Dabei lässt sich die Gleichung zur Bestimmung der Absorption unter Idealbedingungen, wie folgt umstellen [Pop-05, Wei-05]:

$$A + T + R = 1 \xrightarrow{T=0} A = 1 - R$$

Formel 2-7

Das Absorptionsverhalten eines Werkstücks wird alternativ auch über die optische Eindringtiefe  $l_\alpha$  dargestellt und definiert sich als die Tiefe, in der die Intensität auf den Wert  $1/e$  abgefallen ist [Wei-05]. In der Praxis liegen Idealbedingungen nicht vor, weshalb der genaue Wert der Absorption nur durch Messungen bestimmt werden kann. Für einen Einfallswinkel von bis zu  $8^\circ$  gegenüber der Senkrechten besteht für die Absorption zwischen paralleler oder senkrechter Polarisation des Laserstrahls laut Seibold [Sei-06] kein Unterschied, weshalb hier nicht näher auf die Polarisation eingegangen wird. Die absorbierte Strahlungsenergie wird im Werkstück in Wärme umgewandelt. Mit der Abnahme der Reflexion wird eine Zunahme der Energieeinkopplung beobachtet, die Pirri et al. [Pir-79] auf ein Plasma auf der Oberfläche zurückführen. Poprawe [Pop-05]



beschreibt, dass bei geeignet gewählter Intensität der Laserstrahlung das laserinduzierte Plasma in der Nähe der Werkstückoberfläche bleibt und zur Erhöhung der Energieeinkopplung führen kann [Bre-09, Cap-04, Hüg-09, Zen-06], andernfalls löst es sich ab und bewirkt das Gegenteil, indem die Laserstrahlung vom Werkstück abgeschirmt wird [Bre-09, Hüg-09, Ste-10, Str-09, Pop-05, Wal-10]. Ein Dampfplasma kann das Laserlicht streuen oder Druck auf die Schmelze ausüben, was zur Deformation der Schmelzeoberfläche und bis zur Bildung einer Dampfkapillare führen kann, die weit in das Werkstück hineinragt [Pop-05, Zen-06]. Von einer Abschirmung der Abtragzone durch den Materialdampf wird bei Pulsdauern von wenigen Pikosekunden und Repetitionsraten von 1 kHz bei Annahme einer endlichen gasdynamischen Expansionsgeschwindigkeit nicht ausgegangen [Hüg-09, Pop-05, Wal-10]. Eine geeignete Abstimmung der Leistungsdichte und Einwirkzeit in der Wechselwirkungszone führt zum Materialabtrag. Meiners [Mei-95] beschreibt in seiner Arbeit ein Modell zum eindimensionalen stationären Materialabtrag von Metallen durch Verdampfen und Schmelzeaustrieb. Er stellt fest, dass mit steigender Intensität die Abtrageffizienz infolge des wachsenden Dampfanteils sinken kann. Bei der Metallbearbeitung wird das Material durch die Laserstrahlung so stark erhitzt, dass Verdampfung eintritt (Abbildung 2-3).

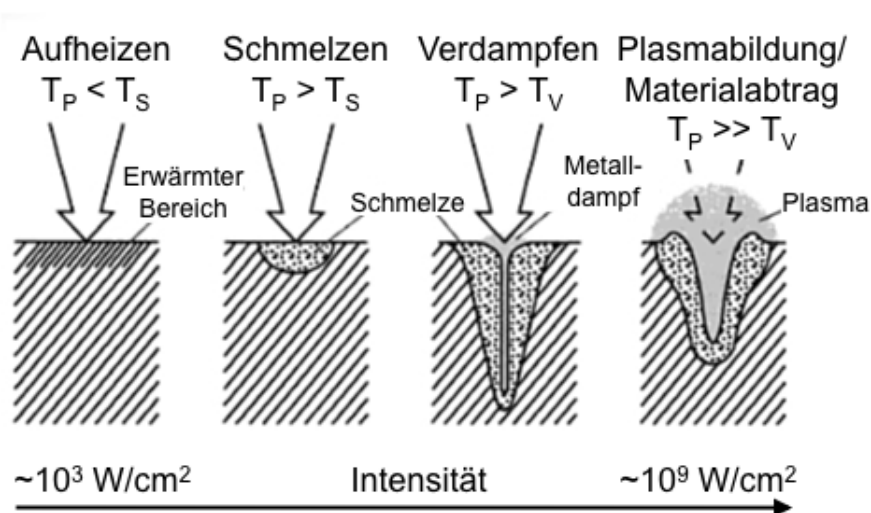


Abbildung 2-3: Wechselwirkung Laserstrahl/Werkstück bei steigender Intensität, Veränderungen der Wärmewirkzone und der Mechanismen der Energieeinkopplung mit  $T_P$  = Pulstemperatur,  $T_S$  = Schmelztemperatur,  $T_V$  = Verdampfungstemperatur, aus [Hüg-09]

Zunächst wird die auf die Materialoberfläche einfallende Laserstrahlung lokal von den leicht beweglichen Elektronen im Festkörper absorbiert. Atomrümpfe und schwere Ionen sind für eine Schwingungsanregung zu schwer, weshalb hier

keine Erwärmung direkt durch die Laserstrahlung erfolgt. Die Stoßvorgänge der Elektronen untereinander führen zu einer Thermalisierung des elektronischen Systems, welches die Wärme an das Gitter weiter gibt und allmählich zu dessen Erwärmung führt.

Die Gittererwärmung erfolgt gemäß Weikert [Wei-05] für Metalle wie Eisen nach etwa 0,5 ps, für Aluminium oder Kupfer liegt die Zeit eine bis zwei Größenordnungen höher. Unterhalb dieser Zeitdauer existiert ein thermisches Ungleichgewicht zwischen den sehr heißen Elektronen und dem noch kalten Gitter, so dass die Temperatur von Elektronen und Gitter getrennt im sogenannten Zwei-Temperaturen-Modell erfasst wird [Hau-09, Wei-05]. Erst nach dieser Zeit sind Elektronen und Kristallgitter im thermodynamischen Gleichgewicht, so dass eine makroskopische Temperatur angenommen werden kann. Die thermische Erwärmung des Werkstücks lässt sich durch die Diffusionslänge (thermische Eindringtiefe)  $l_{th}$  beschreiben. Weikert [Wei-05] beschreibt die Diffusionslänge als den Weg, den eine Isotherme im Werkstück zurück legt. Sie ist abhängig von der Interaktionszeit  $t$  und der Temperaturleitfähigkeit  $a$  (bzw. der Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$ , Dichte  $\rho$  und spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ ) [All-87, Wei-05].

$$l_{th} = 2 \cdot \sqrt{a \cdot t} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot t}{\rho \cdot c_p}}$$

Formel 2-8

Die thermische Eindringtiefe sollte im Bereich der optischen Eindringtiefe liegen, um auszuschließen, dass die Energie während der Bestrahlung aus der Absorptionszone heraus dissipiert und sich die lokale Energiedichte erniedrigt [Hau-09]. Für Pulsdauern im Pikosekundenbereich ist diese Voraussetzung gegeben. Für die Bearbeitung von Stahl ( $\kappa = 80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $c_p = 452 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $\rho = 7,874 \text{ g/cm}^3$ ) mit einer Pulsdauer von  $t = 13 \text{ ps}$  ergibt sich eine thermische Eindringtiefe von  $l_{th} \approx 30 \text{ nm}$ . Die optische Eindringtiefe  $l_\alpha$  liegt für Stahl bei etwa 20 nm [All-87].

Weiterhin muss die Pulsdauer kleiner sein als die Zeitdauer  $t_s$ , in der sich Spannungen durch den Bereich der optischen Eindringtiefe  $l_\alpha$  im Material fortpflanzen, damit die absorbierte Energie mechanisch so konzentriert werden kann, dass ausreichend hohe Energiedichten entstehen [Hau-09].

Erhitzt sich nun das Gitter auf die thermodynamisch kritische Temperatur, ist der Phasenübergang in den gasförmigen Zustand oder gar die Bildung von Plasma möglich [Wal-10], welches ein Gemisch aus freien Elektronen, positiv und negativ geladenen Ionen und neutralen Teilchen ist. Wird ein Material unter

Ausbildung eines Plasmas verdampft, so handelt es sich gemäß DIN 32540 um eine Laserstrahlsublimationsablation [Hüg-09, Pop-05, Ser-08].

### 2.1.3 Prozessemissionen

In der Laser-Material-Wechselwirkungszone entstehen während der Laserablation mit ultra kurzen Pulsen Prozessemissionen. Von dieser Wechselwirkungszone ausgehend werden während der Sublimation Abtragpartikel explosionsartig in die umgebende Atmosphäre geschleudert und gasdynamische Stoßwellen, akustischer Luftschall und Körperschall emittiert. Es entsteht ein laserinduziertes Plasma, das zudem optische Emissionen (OE) sowie reflektierte Laserstrahlung in die Umgebung abstrahlt. Abbildung 2-5 veranschaulicht die Prozessemissionen beim Laserabtragen mit einem Pikosekundenlaser [Bor-06, Sha-05, Wal-10]. Das sichtbare Prozessleuchten (PL) beinhaltet hier die sichtbare Strahlung des Materialdampfes und des laserinduzierten Plasmas während der Ablation.

Akustische Emissionen (AE) sind Schallwellen, welche aus mechanischen Schwingungen elastischer Medien resultieren, die fest, flüssig oder gasförmig sein können. Sie werden entsprechend dem Medium, in welchem sie auftreten, in Körper-, Flüssig- und Luftschall unterschieden. Abbildung 2-4 verdeutlicht die übliche Unterteilung der Schallfrequenzbereiche [Ler-09]. Die Frequenzen zwischen 16 Hz und 20 kHz sind für das menschliche Ohr hörbar und werden als Hörschall bezeichnet.

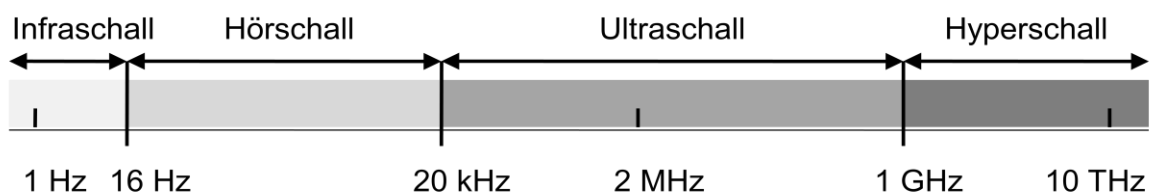


Abbildung 2-4: Frequenzbereiche in der Akustik gemäß [Ler-09]

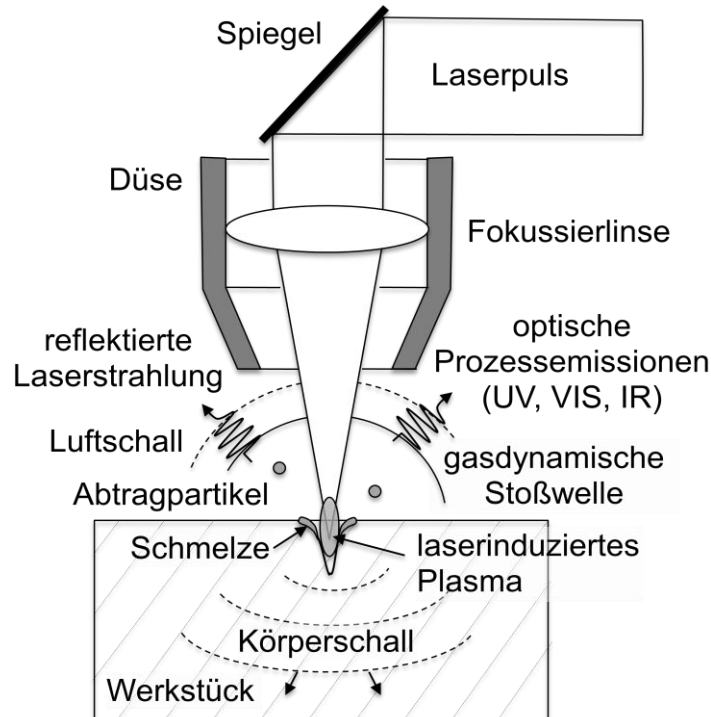


Abbildung 2-5: Prozessemissionen beim Laserabtragen mit Pikosekundenlasern  
[Sha-05, Wal-10]

Luftschallwellen sind Schwankungen der Luftdichte (Schalldruck  $p$ ) welche durch Anregung der Luft entstehen. Diese äußern sich in Form von Unter- und Überdruck als longitudinale Verdichtungs- und Verdünnungswelle. Die anfängliche Verdichtung der hochelastischen Luftmassepartikel läuft wellenartig weiter [Ler-09]. Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt bei einer Temperatur von 20°C etwa 343 m/s [Her-11]. In flüssigen oder festen Körpern ist sie größer. Wenn feste Körper zu Schwingungen angeregt werden und unmittelbar mit der Luft in Berührung stehen, kann ebenfalls Luftschall entstehen. Der primär entstehende Körperschall wird dabei auf die Luft übertragen. Bei einer punktförmigen Anregung auf der Oberfläche, die dem einzelnen Laserpuls nahe kommt, breiten sich die Schallwellen in Gasen in alle Richtungen gleich aus (Kugelwelle) und werden durch deren Volumenelastizität bestimmt. Bei der Schallausbreitung in Festkörpern spielt zusätzlich die Formelastizität mit hinein. Dadurch treten zu den Longitudinalwellen noch Transversalwellen und gegebenenfalls auch Biege- und Dehnwellen auf [Ler-09].

Li und Steen [Li-92] beschreiben drei verschiedene Arten von akustischen Wellen, die während der Laserbearbeitung entstehen. Eine Art entsteht innerhalb des Materials in Folge von Phasenumwandlungen. Eine weitere Art wird durch thermische Spannungen im Material erzeugt und als dritte nennen sie die Art, die durch Gasdruck und Schockwellen in der Nähe eines Schmelzebades emittiert

werden. Die wichtigsten Quellen des Luftschalls sind dabei die Variationen in der Gasdynamik durch Erhitzungs- und Verdampfungsprozesse. Die Stärke des akustischen Signals ist vom erzeugten Gasdruck abhängig. Verdampfung erfolgt, wenn die Leistungsdichte und Belichtungszeit einen materialspezifischen Wert überschreiten. Wenn Verdampfung einsetzt, sind akustische Phänomene zu erwarten [Li-92, Mei-95].

Schallereignisse werden durch die Schallfeldgröße Schalldruck mit der SI-Einheit Pascal charakterisiert [Vei-05]. Der Schalldruck, der die lokale Druckabweichung bezeichnet, wird oft als Schalldruckpegel mit der Hilfsmaßeinheit Dezibel [dB] angegeben. Er ist ein logarithmisches Maß zur Beschreibung der Stärke eines Schallereignisses und wird im Folgenden auch als die Amplitude der AE bezeichnet. Er ist abhängig vom Schallfeld, also von der Größe und Form des Raumes und der Entfernung zur Quelle. Der Schalldruckpegel  $L_p$  beschreibt das logarithmierte Verhältnis des quadrierten Effektivwertes des Schalldrucks mit der Einheit Pascal eines Schallereignisses zum Quadrat eines Bezugswerts  $p_0$  für einen bestimmten Abstand zur Schallquelle [Her-11, Ler-09, Vei-05] wie folgt:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{20} \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ [dB]} \quad \text{Formel 2-9}$$

Der Bezugswert für Luftschall ist  $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ . Er entspricht dem Schalldruck an der Hörschwelle des Menschen bei 1 kHz. Die Referenzdrücke für verschiedene Medien sind in DIN EN 21683 genormt.

#### 2.1.4 Prozessparameter

Ultrakurzpulslaser für die Mikrobearbeitung besitzen meist eine geringe mittlere Leistung im Bereich von Milliwatt bis Watt. Die Spitzenleistung im Fokus kann bei Pulsdauern im Pikosekundenbereich jedoch einige hundert Kilowatt pro Quadratzentimeter betragen. Mit einem Leistungsmessgerät wird die mittlere Leistung  $P_{av}$  gemessen, aus welcher sich anschließend die Pulsenergie  $Q_p$  mit der mittleren Leistung  $P_{av}$  und Repetitionsrate  $f_{rep}$  wie folgt errechnen lässt [Lor-09, Som-10]:

$$Q_p = \frac{P_{av}}{f_{rep}} \quad \text{Formel 2-10}$$

Zur Herstellung von Mikrostrukturen wird die Werkstückoberfläche relativ zur Laserstrahlung mit der Geschwindigkeit  $v$  mäanderförmig bewegt und dabei Puls für Puls, Bahn für Bahn und Ebene für Ebene eine dreidimensionale Kavität

erzeugt. Die mittlere Energiedichte  $H$  pro Puls, wird auch als Fluenz bezeichnet und errechnet sich aus der mittleren Leistung.

$$H = \frac{4 \cdot P_{av}}{\pi \cdot d_F^2 \cdot f_{rep}} = \frac{4 \cdot Q_P}{\pi \cdot d_F^2} \quad \text{Formel 2-11}$$

Die eingebrachte Energiedichte zur Fertigung einer Bahn der Länge  $L$  hängt zudem von der Anzahl der Pulse  $m$  und deren Pulsabstand  $PA$  ab, die zur Herstellung eingesetzt werden. Der Pulsüberlapp  $P\ddot{U}$  ist dabei größer als 0 und spielt eine wichtige Rolle für das Abtragergebnis. Ist der Pulsüberlapp groß, so steigt die Anzahl der Pulse und somit die eingebrachte mittlere Energie zur Herstellung einer Bahn. Gemäß der DIN-Norm 32540 definiert sich der Pulsüberlapp  $P\ddot{U}$  folgendermaßen [Lie-06]:

$$P\ddot{U} = 1 - \frac{v \cdot t}{d_{eff} + v \cdot \tau_H} \xrightarrow{v \cdot \tau_H \rightarrow 0} P\ddot{U} = 1 - \frac{v}{d_{eff} \cdot f} = 1 - \frac{PA \cdot f}{d_{eff} \cdot f} = 1 - \frac{PA}{d_{eff}} \quad \text{Formel 2-12}$$

Dabei ist  $d_{eff}$  der effektive Abtragdurchmesser,  $t$  die Pulsdauer,  $\tau_H$  die Pulsperiodendauer,  $v$  der Vorschub und  $PA$  der Pulsabstand. Der Einfluss der vorhandenen Verzerrung der Pulsgeometrie  $v \cdot \tau_H$  ist hier vernachlässigbar klein, weshalb dieser nicht berücksichtigt wird [Lie-06]. Der Zusammenhang von Puls- und Bahnabstand zur Strukturierung einer Fläche ist für ideale Pulse schematisch in Abbildung 2-6 skizziert. Durch Nachführen der Fokusslage um einen Ebenenabstand  $dz$  werden dreidimensionale Kavitäten ebenenweise abgetragen.

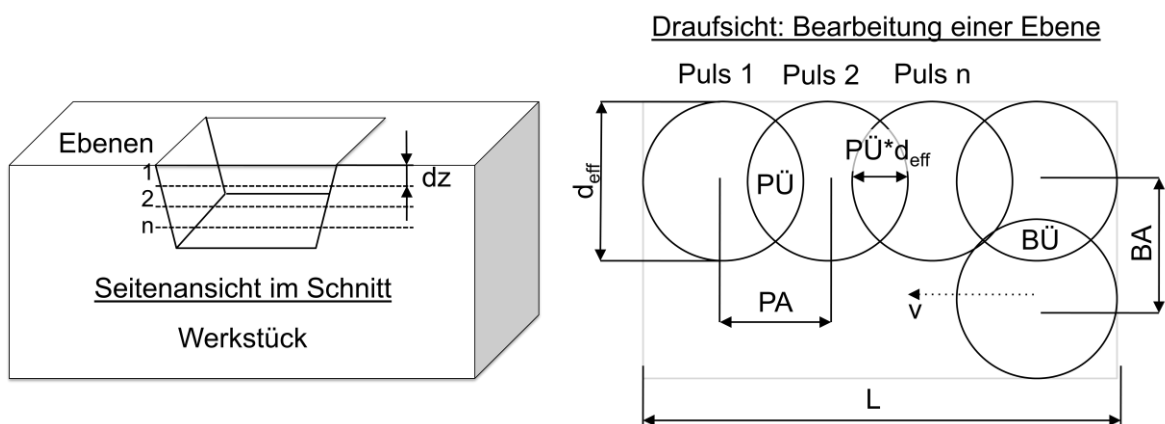


Abbildung 2-6: Prozessparameter bei der Bearbeitung einer 3D-Kavität

Der Pulsüberlapp  $P\ddot{U}$  ist stark von der Fokusposition abhängig. Befindet sich der Fokus in der Position  $\pm z$  außerhalb des Arbeitsbereichs, so vergrößert sich der

Strahldurchmesser und verringert sich die Intensität maßgeblich. Damit wirkt eine geringere Fluenz  $H$  auf das Material und die gewünschte Parametereinstellung kann nicht eingehalten werden. Wie in Abbildung 2-7 dargestellt, steht ein positives Vorzeichen der Position  $z$  für eine Fokusposition oberhalb der Materialoberfläche. Die Bearbeitung erfolgt dabei mit dem divergenten Strahlanteil.

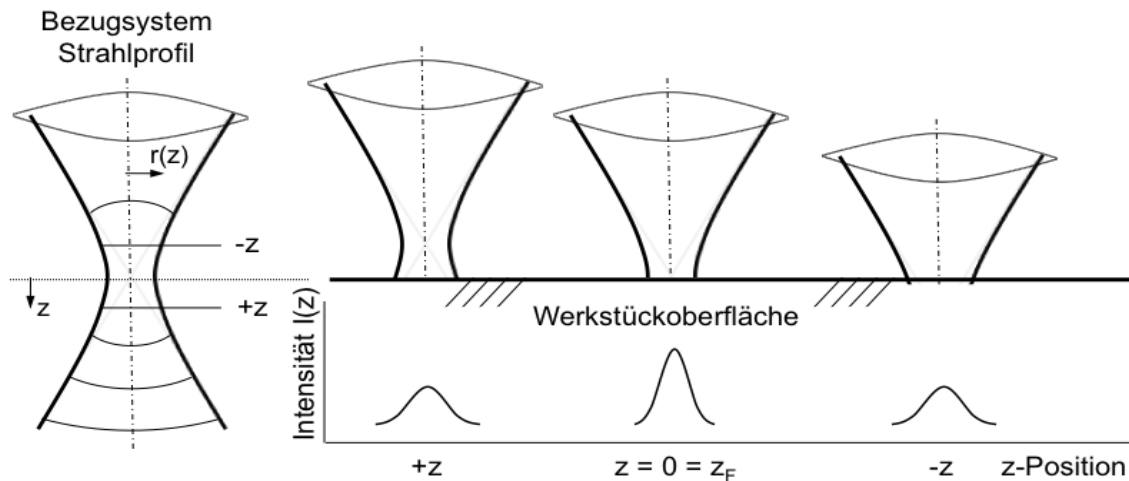


Abbildung 2-7: Definition des Bezugssystems der z-Koordinate

## 2.2 Stand der Technik zur Lasermikrostrukturierung mit gepulsten Lasern

Für die Lasermikrostrukturierung werden Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen und Pulsdauern eingesetzt. Neben der kurzen Wellenlänge sind die drei relevantesten Zeitskalen für die Lasermikrobearbeitung Pulsdauern im Femto-, Piko- (sogenannte „ultra kurze Pulse“) und Nanosekundenbereich (sogenannte „kurze Pulse“). Durch die kurzen Pulsdauern bringen sie hohe Leistungsdichten mit sich, die zum direkten Verdampfen des Materials (Sublimation) führen. Dadurch kann die Abtragsqualität deutlich gesteigert werden, weshalb der Einsatz von ultrakurzen Pulsen für die Mikrostrukturierung im Vergleich zu längeren Pulsdauern von besonderem Vorteil ist [Som-10]. Im Folgenden wird die Funktionsweise an metallischen Werkstoffen verdeutlicht. Die Laserstrahlung aller drei Pulsdauern wird zunächst im Elektronensystem deponiert und dabei von den im Werkstoff schwach gebundenen Elektronen absorbiert. Je nach Pulsdauer des Lasers  $t$  resultieren verschiedene charakteristische Zeitskalen für die Abkühlzeit der Elektronen ( $\tau_e$ ) und die Heizzeit des Gitters ( $\tau_i$ ), die sich in unterschiedlichen Material-Laser-Wechselwirkungen und somit Abtragverhalten widerspiegeln [Bre-04, Bre-09, Brü-12, Chi-96, Ruf-04, Sch-09b, Str-04].

### 2.2.1 Abtragen mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich

Bei der Bearbeitung mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich (fs) wird davon ausgegangen, dass die Pulsdauer viel kleiner ist als die Abkühlzeit der Elektronen. Es ergibt sich somit  $t \ll \tau_e$ . Die Kopplung zwischen Elektronen und Gitter kann hier vernachlässigt werden, da erst nach dem Ende des Pulses binnen 1 ps die Energie von den Elektronen auf das Gitter übertragen wird. Somit ändert sich die Gittertemperatur im betrachteten Zeitintervall nicht signifikant. Auf Grund der kleinen Zeitskalen und hohen Leistungen ( $10^{16}$  bis  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>) wird die flüssige Phase theoretisch übersprungen und es erfolgt ein direkter Übergang vom festen in den Plasma- oder Gaszustand. Damit ist ein sehr präziser Abtrag möglich, der auch als „kalter Abtrag“ bezeichnet wird [Chi-96, Sch-09b, Str-04]. Aufgrund der zu erwartenden hohen erreichbaren Qualität und der damit wegfallenden Nachbearbeitung ist die Erkundung des Potenzials der Bearbeitung mit fs-Pulsen Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten [Bre-09, Kön-06, Sch-08, Som-10, Wei-05]. Die Bearbeitung mit hohen Repetitionsraten ( $f = \text{kHz} - \text{MHz}$ ) zeigt dabei neuartige Effekte der Laser-Materie-Wechselwirkung, wie z.B. Wärmeakkumulation, Pulsabschirmung oder die Ausbildung von sich selbst organisierenden Mikrostrukturen [Sch-08].

Weikert [Wei-05] stellt fest, dass bei fs-Pulsdauern die Strukturqualität im Vergleich zur Bearbeitung mit ps-Pulsdauern nur noch geringfügig gesteigert werden kann. Die höheren Anschaffungskosten für fs-Laser sind somit nicht gerechtfertigt [Bre-09, Wei-05]. Des Weiteren merkt er an, dass bei der Bearbeitung in Luft mit fokussierten fs-Laserpulsen eine Streuung und Aufweitung der Laserstrahlung im Bereich des Fokus beobachtet wird. Dieses Phänomen ist als Conical Emission (CE) bekannt. Als Grund für diese Streueffekte werden nichtlineare Effekte im Luftdurchbruch (Ausbildung eines Plasmas in der Luft) vermutet, die durch die hohe Energiedichte im Strahlfokus ausgelöst werden [Bre-04, Kli-03]. Die Auswirkungen der CE treten laut Weikert nur bei fs-Pulsdauern auf. Auch im Abtragergebnis von Nuten können die Einflüsse der CE nachgewiesen werden. Die Streuung der Laserstrahlung erfolgt äußerst unregelmäßig, so dass kein gleichmäßiger Abtrag in den Nuten erreicht wird [Wei-05]. Einer CE kann durch eine Bearbeitung im Vakuum oder unter einer Schutzgasatmosphäre aus Helium entgegengewirkt werden. Die Schaffung dieser speziellen Atmosphäre ist mit hohen Kosten verbunden. Alternativ wirkt eine Verlängerung der Pulsdauer auf mindestens 1,5 ps der Entstehung der CE entgegen [Kli-03].



### 2.2.2 Abtragen mit Pulsdauern im Pikosekundenbereich

Bei Pikosekundenlasern ist die Pulsdauer viel länger als die Abkühlzeit der Elektronen, jedoch viel kürzer als die Heizzeit des Gitters. Es ergibt sich somit  $\tau_e \ll t \ll \tau_i$ . Daraus folgt, dass die Gitter-Temperatur immer noch sehr viel kleiner ist als die Temperatur der Elektronen, jedoch muss bereits eine Wärmeleitung in die Umgebung angenommen werden. Das Abtragbild zeigt nur minimale thermisch induzierte Schmelzeaufwürfe [Chi-96, Ruf-04]. Weikert [Wei-05] berichtet, dass für die Bearbeitung von Metallen eine Pulsdauer von etwa 5 - 10 ps ausreichend kurz ist, um nahezu ablagerungsfreie Strukturen zu erzeugen. Durch eine Erhöhung der Repetitionsrate kann eine Erhöhung der Abtragrate erzielt werden. Der Materialabtrag des ersten Pulses mit seinem entstehenden Plasma muss jedoch zunächst abgeschlossen sein um den folgenden Puls darin nicht abzuschwächen oder zu verändern [Brü-12, Kön-06, Wei-05]. Die Pulse sind mit einer Dauer in diesem Regime kurz genug, um bei geeigneter Prozessführung die thermische Schmelzebildung bei der Bearbeitung so weit wie möglich zu reduzieren und nichtlineare Wechselwirkungen mit der Umgebungsatmosphäre zu beherrschen.

### 2.2.3 Abtragen mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich

Bei der Bearbeitung mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich (ns) ist die Pulsdauer länger als die Abkühlzeit der Elektronen und die Heizzeit des Gitters. Es ergibt sich somit  $\tau_e \ll \tau_i \ll t$ . Während dieser Pulsdauer wird das Gitter von den Elektronen erhitzt, so dass sich nach dieser Pulsdauer die Gitter- und Elektronentemperatur angeglichen haben ( $\tau_e \cong \tau_i$ ). Ein Teil der Laserenergie wird im Material so deponiert, dass es zum Verdampfen und zum Aufschmelzen im umliegenden Bereich kommt. Deutliche Schmelzeaufwürfe und Ablagerungen sind die Folge [Chi-96, Hel-00, Kor-07, Läß-94, Lie-05, Ruf-04, Yeh-01].

Lorenz [Lor-09] analysiert das Verfahren Laserstrahlabtragen mit ns-Pulsdauern für den wirtschaftlichen Einsatz im Werkzeug- und Formenbau und betrachtet dabei die Prozessqualität, -durchlaufzeit und -kosten. Er empfiehlt als präventive Maßnahme zur Vermeidung einer Akkumulierung der Ablagerung (Debris) die Reduktion des Schmelzeanteils zu Gunsten des Sublimationsabtrags durch Steigerung der Intensitäten und Senkung der Pulsdauer.

Yeh [Yeh-01] untersucht in ihrer Arbeit den Einfluss von Bearbeitungsparametern auf die Oberflächen- und Werkstoffeigenschaften von laserbearbeiteten Mikroteilen mit ns-Pulsdauern und hält fest, dass durch die Wahl der Parameter nicht zugleich die Oberflächenrauheit, die Dicke der wiedererstarteten Schicht und die eingebrachten Eigenspannungen minimiert werden können. Es

lässt sich lediglich ein Kompromiss erarbeiten. Die ausgeprägte wärmebeeinflusste Zone hat negative Auswirkungen auf die Festigkeit des Materials und bei einem Einsatz als Werkzeug somit auf dessen Standzeit. Um Prozessrückstände und Schmelzeschichten nachträglich zu entfernen, stehen Nachbearbeitungsmethoden, wie das chemische Beizen, das elektrolytische Polieren, das Trockenstrahlen und das Ultraschall-Nassstrahlen zur Verfügung [Kie-11, Yeh-01]. Die erzielbare Qualität mit ns-Pulsen ist nach einer Nachbearbeitung für Anwendungen wie Präge- oder Spritzgusswerkzeuge ausreichend, wenn die Bearbeitungsparameter für die jeweilige Aufgabe optimal aufeinander abgestimmt wurden [Hel-00]. Nichtsdestotrotz sind Nachbearbeitungen zeit- und kostenintensiv und sollten bestenfalls vermieden werden.

### Fazit

Breitling [Bre-09] fasst das Potenzial für die abtragende Präzisionsbearbeitung von Metallen mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen gemäß Abbildung 2-8 zusammen. Bei langen Pulsen im ns-Regime wird die Bearbeitungspräzision durch zunehmende Schmelzbildung begrenzt und für ultrakurze Pulse im fs-Regime beeinträchtigen nichtlineare Wechselwirkungen der Laserstrahlung mit dem Gasmedium das Strahlprofil und reduzieren dadurch die erzielbare Genauigkeit drastisch. Den Qualitätsanforderungen an die Lasermikromaterialbearbeitung wird jedoch die Bearbeitung mit ps-Pulsen gerecht [Bre-04, Bre-09, Kar-07, Kno-06, Krü-00, Sch-11, Wei-05].

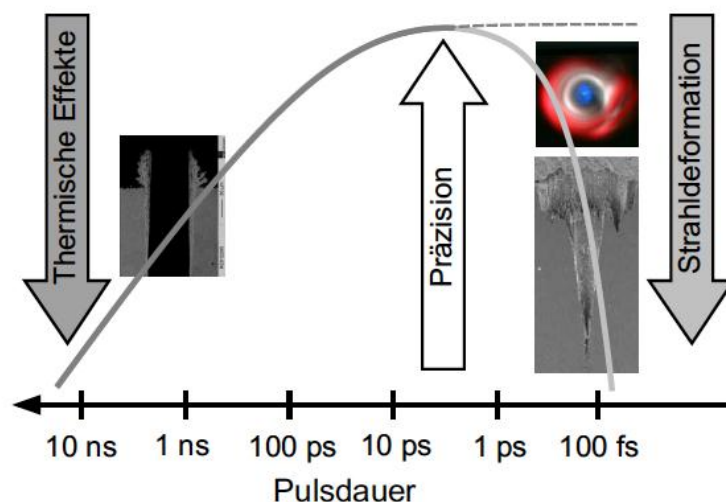
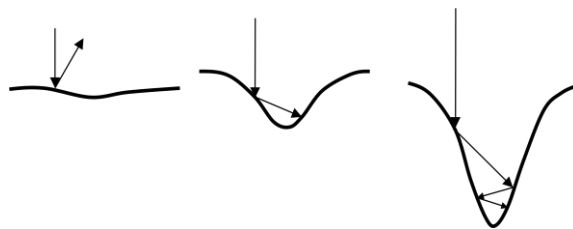


Abbildung 2-8: Potenzialdarstellung für die abtragende Präzisionsbearbeitung von Metallen mit kurzen/ultrakurzen Laserpulsen aus [Bre-09]

## 2.2.4 Löcher im Abtragergebnis

In der Literatur werden nach der Bearbeitung mit verschiedenen Lasersystemen regelmäßig Löcher im Grund von Kavitäten beobachtet [Wei-05]. Als eine mögliche Ursache werden Laserreflexion an Wänden und Unebenheiten genannt. Solange die Unebenheiten flach sind, wird die reflektierte Strahlung von der Werkstoffoberfläche wegreflektiert (Abbildung 2-9, links). Überschreitet der Flankenwinkel jedoch einen bestimmten Wert, dann trifft die reflektierte Strahlung erneut auf das Material, wo weitere Energie vom Werkstück absorbiert und somit das Material abgetragen wird (Abbildung 2-9, Mitte).



*Abbildung 2-9: Schematische Darstellung zur Erläuterung von Mehrfachreflexionen gemäß [Wei-05]*

Wird der Flankenwinkel der Vertiefung noch größer, tritt Mehrfachreflexion auf und verstärkt das Loch in die Tiefe (Abbildung 2-9, rechts) [Wei-05]. Ebenso werden Reflexionen an Abtragpartikeln, die sich auf der Oberfläche im Kavitätsgrund abgesetzt haben, als eine mögliche Ursache genannt. Durch geeignetes Abblasen der Abtragpartikel können Löcher verringert, aber nicht komplett vermieden werden [Wei-05]. Auch die Prozessatmosphäre zeigt einen Einfluss auf die Oberflächengüte [Läß-94]. Als weitere mögliche Entstehungsursache für Löcher wird eine Erwärmung des Bauteils, besonders an den Wandbereichen der Kavität genannt, welche dort einen stärkeren Materialabtrag im Grund zur Folge haben soll. Diese Erwärmung soll entweder durch Mehrfachreflexionen der Laserstrahlung an den Wänden oder durch Materialdampf, der nicht ungehindert abströmen kann und somit seine Wärme an das Material der Wand abgibt, hervorgerufen werden [Kli-04].

In Federstahl CK101 beobachtet Weikert [Wei-05] die Entstehung von Vertiefungen und Löchern an den Strukturkanten und im Strukturgrund für verschiedene Pulsdauern. Der Durchmesser der kreisrunden Löcher beträgt ca. 30  $\mu\text{m}$ . Zunächst vergleicht er das Abtragsbild für fs- bis ps-Pulsdauern beim Abtragen flächiger Strukturen und stellt fest, dass bei der Bearbeitung mit der Pulsdauer von 2 ps am wenigsten Löcher entstehen (Abbildung 2-9).

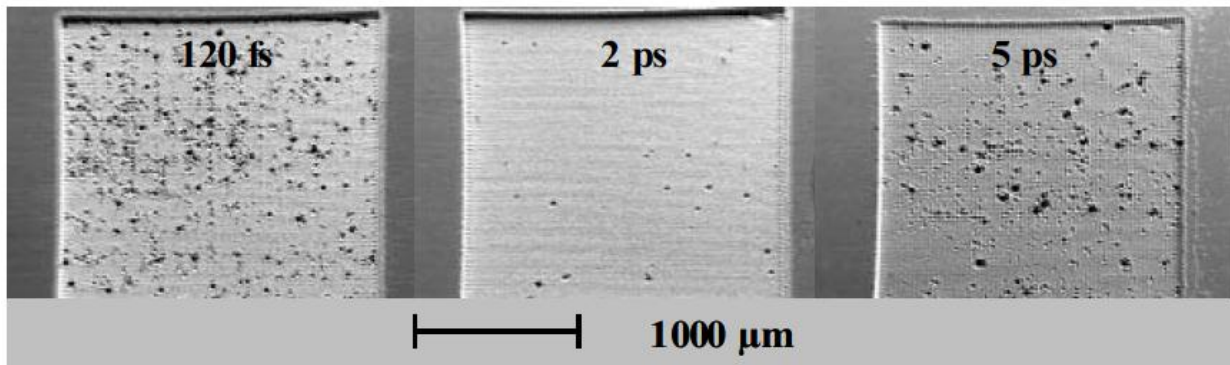


Abbildung 2-10: Vergleich der Pulsdauer beim Abtragen flächiger Strukturen ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $t = 120 \text{ fs}$ ,  $2 \text{ ps}$ ,  $5 \text{ ps}$ ,  $f_{\text{rep}} = 1 \text{ kHz}$ ,  $H = 197 \text{ J/cm}^2$ ,  $d_F = 18 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $v = 900 \text{ mm/min}$ ,  $BA = 15 \text{ }\mu\text{m}$ , 40 Überfahrten) Material Ck 101 aus [Wei-05]

Außerdem untersucht er das Vorkommen von Löchern beim fs-Abtrag für die Bearbeitung in Umgebungsatmosphäre und im Druckluftstrom. Er findet heraus, dass bei der Bearbeitung im Druckluftstrom weniger Löcher auftreten (Abbildung 2-11) und sieht darin eine Bestätigung für den Einfluss von Schmutzpartikeln auf den Abtrag.

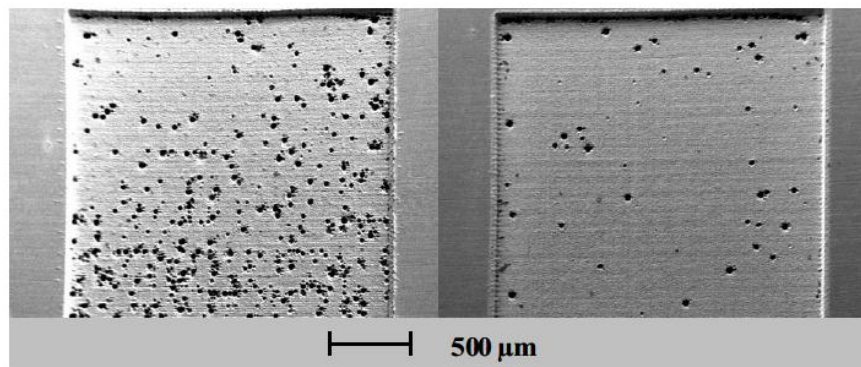


Abbildung 2-11: Abtrag von flächigen Strukturen, Bearbeitung in Umgebungsatmosphäre (links), Bearbeitung im Druckluftstrom (rechts) ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $t = 500 \text{ fs}$ ,  $f_{\text{rep}} = 1 \text{ kHz}$ ,  $H = 197 \text{ J/cm}^2$ ,  $d_F = 18 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $v = 900 \text{ mm/min}$ ,  $BA = 15 \text{ }\mu\text{m}$ , 40 Überfahrten) Material: Ck 101 aus [Wei-05]

Weikert [Wei-05] vermutet, dass, sobald in der Struktur eine Vertiefung entstanden ist, sich diese auf Grund von Mehrfachreflexionen bei erneuter Bestrahlung verstärkt. Seine Hypothesen zu deren Entstehung besagen, dass die Löcher neben der Strahlfokussierung an oxidierten Schmutzpartikeln auf der Werkstückoberfläche auch durch einen lokal erhöhten Pulsüberlapp aufgrund von Beschleunigungs- oder Abbremsvorgängen im Bereich der Strukturkanten entstehen. Auch Inhomogenität im Werkstoff oder Schwankung der Pulsenergie zieht er als Entstehungsursache in Betracht. Zur Untersuchung der Entstehung solcher unerwünschten Löcher sind keine weiteren Arbeiten bekannt, auch wenn

in vielen Publikationen eindeutig Löcher im Strukturgrund (meist bei Stählen z.B. 1.5920, 1.2379 und St 37-2) abgebildet sind [Koc-11, Kön-06, Mei-95, Sch-08, Stü-95, Wal-10, Yeh-01]. Auf diese wird jedoch in den Arbeiten nicht näher eingegangen.

### **2.3 Stand der Technik zur Fokuslagenüberwachung beim Laserabtragen**

In allen Einsatzbereichen der Lasertechnologie wird die Fokusslage auf der Werkstückoberfläche als eine besonders wichtige Prozessgröße hervorgehoben [Art-90, Bag-98, Bin-06, Bor-06, Bre-01, Fox-02, Gar-91, Geb-91, Hon-04, Ish-92, Mül-02, Mül-09, Ree-00, Sch-00, Sto-10, Tsu-98, Wal-10]. Die Fokusposition ist einer der kritischsten Parameter bei der Laserablation, da sie sich direkt auf die Leistungsdichte und somit auf das Abtragsvolumen und die -geometrie auswirkt [Bor-06]. Je höher die zu erzielende Präzision ist, desto wichtiger wird die genaue Fokuspositionierung und desto kleiner sind die zulässigen Toleranzen [Ree-00]. Wie Binder [Bin-06] herausfand, lässt sich in der Praxis der optimale Abstand der Fokussierlinse zum Werkstück für ein sicheres Prozessfenster nicht einfach aus der Brennweite und der berechneten Rayleighlänge ableiten.

Die Erkenntnis, dass für das Erreichen der gewünschten Genauigkeit und Oberflächengüte beim Laserabtragen die Fokusposition von entscheidender Bedeutung ist, bestätigen viele Forschungsarbeiten und widmen sich dem Zusammenhang der eingestellten Fokusposition in Form einer Distanz der Fokussieroptik zur Werkstückoberfläche und dem damit erzielbaren Abtragsbild [Bin-06, Bor-06, Brü-12, Hon-04, Nan-02, Ree-00, Wan-08, Wei-05]. Dabei wird oft mit dem sogenannten „line test“ gearbeitet. Es werden Linien (oder Einzelpulse) mit unterschiedlichen z-Positionen (fokussierter und defokussierter Bereich des Laserstrahls) auf der Werkstückoberfläche ablatiert und das Abtragergebnis bewertet, um Rückschlüsse auf die Fokusposition zu ziehen [Bin-06, Bor-02, Bor-06, Brü-12, Läß-94, Wan-08].

Wang et al. [Wan-08] halten für die Bearbeitung mit fs-Lasern fest, dass sich bei der Bearbeitung mit dem konvergenten Teil des Laserstrahls ein V-förmiger Bahnquerschnitt ausbildet und bei der Bearbeitung mit dem divergenten Strahlenteil ein U-förmiger Bahnquerschnitt zu erwarten ist.

Weikert [Wei-05] stellt fest, dass für die Bearbeitung von Grauguss und Stahl mit ps-Pulsdauern die Nutbreite minimal ist, wenn der Fokus sich auf der Oberfläche befindet ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $t = 5 \text{ ps}$ ,  $f_{\text{rep}} = 1 \text{ kHz}$ ,  $v = 20 \text{ mm/s}$ ,  $H = 118 \text{ J/cm}^2$  im Fokus, 40 Überfahrten). Defokussiert nimmt die Nutbreite zu. Weikert empfiehlt daher

die ps-Bearbeitung von Grauguss und Stahl mit der Fokusebene in der Bearbeitungsfläche.

Brüning [Brü-12] ermittelt den minimalen Ablationsdurchmesser, indem er Einzelpulse in variierenden Fokuslagen ablatiert und diese anschließend mit einem Mikroskop bewertet. Den kleinsten Ablationsdurchmesser definiert er als die Fokuslage  $z = 0$  mm. Er hält fest, dass in dieser Lage der Strahl auf Grund des minimalen Durchmessers die maximale Fluenz aufweist. Diese Einstellung nutzt er für weitere Abtragsuntersuchungen.

Läßiger [Läß-94] untersucht die Abhängigkeit der Abtragsrate und der Repetitionsrate zur Fokuslage bei der Ablation von Edelstahl, Kupfer, Messing und Aluminium mit ns-Pulsdauern. Die Position des Brennpunkts der Bearbeitungsoptik auf der Werkstückoberfläche definiert er als die Fokuslage  $z = 0$  mm und stellt fest, dass bei einer verwendeten Leistungsdichte von  $8 \cdot 10^7$  W/cm<sup>2</sup> die Abtragsrate bei einer Bearbeitung in der Fokuslage  $z = 0$  mm maximal ist. Defokussiert nimmt die Abtragsrate ab. Sinkt die Leistungsdichte dabei unter die Verdampfungsschwelle so bricht der Abtragsprozess ab.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für alle untersuchten Laserparameter ein Zusammenhang der Symmetrie des Verhaltens der ablatierten Bahnbreite zur Fokusposition gefunden werden konnte. Im Bereich der schmalsten Bahn oder des kleinsten Einzelpulsabtragdurchmessers wird der Fokus auf der Oberfläche vermutet und dient in der Praxis als gängige Bewertungsmethode zur Ermittlung der Fokuseinstellung für die Bearbeitung. Auch für eine gewünschte defokussierte Bearbeitung muss nach diesem Vorgehen die Fokusposition zunächst bestimmt werden, um die gewünschten Parametereinstellungen reproduzierbar vornehmen zu können. Gleichmaßen wird in den oben genannten Arbeiten die Herausforderung der reproduzierbaren und sicheren Fokuspositionierung hervorgehoben.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden in der Literatur unterschiedliche Automatisierungsmöglichkeiten zur Fokuslageneinstellung und -überwachung untersucht, welche im Folgenden vorgestellt werden. Ziel ist es hierbei, eine sichere und reproduzierbare Fokuspositionierung vor und während der Bearbeitung zu gewährleisten und bestenfalls sogar Informationen über die Abtragtiefe und -rate zu erhalten. Bekannte Ansätze nutzen dafür unabhängig vom Laserprozess messende Sensoren für die Abstandsmessung und zur Tiefenermittlung der Struktur [Chr-94, Mei-95, Hau-09, Hell-00] oder die Beobachtung von Prozessemissionen [Ale-13, Bre-09, Chr-94, Fox-02, Kli-04, Läß-94, Mei-95, Mül-10, Ree-10, Som-10, Stü-95].

### 2.3.1 Fokuslagenüberwachung mit unabhängig vom Abtragprozess messenden Sensoren

Die Ermittlung der erzielten Strukturtiefe oder des Fokusabstands zur Oberfläche erfolgt entweder taktil über integrierte Tastsysteme oder berührungslos mittels optischer Sensoren über den Strahlengang [Ale-13, Fox-02, Hell-00, Hon-04, Gei-11, Kas-09, Kli-04, Lee-87, Mei-95, Nis-10, Ree-00].

Erstere bringen den Nachteil mit sich, dass diese nicht berührungslos messen und nicht in der Lage sind Informationen aus dem laufenden Prozess zu erfassen. Meiners [Mei-95] realisiert daher die Abstandsmessung optisch mit dem Triangulationsverfahren und setzt damit erste Grundsteine für die tiefengeregeltere Ablation durch Schruppen und Schlichten mit ms-Pulsdauern.

Klinger [Kli-04] untersucht das Kohärenzradar und den Doppelspaltensor für die Tiefenermittlung. Bei einer weiteren Methode wird über die Fokussierlinse des Laserstrahls ein zusätzlicher Messstrahl (kollimiertes Licht einer Laserdiode bzw. eines Helium-Neon-Lasers) überlagert und auf das Werkstück abgebildet [Hon-04, Kas-09, Nis-10]. Der reflektierte Teil des Messstrahls wird durch die gleiche Optik zurückgeführt, ausgekoppelt und auf einen Sensor geleitet. Befindet sich das Werkstück im Fokus, so wird das rückreflektierte Licht vollständig vom Sensor erfasst. Durch eine Korrektur der Lage des Werkstücks wird ein Autofokus realisiert, indem die Position des Werkstücks so lange verändert wird, bis das reflektierte Licht maximal ist. Eine wichtige Voraussetzung für diese Methode ist, dass die Werkstückoberfläche spiegelt, weshalb sich eine starke Abhängigkeit von der Rauheit und vom Winkel der Werkstückoberfläche ergibt [Hon-04, Kas-09, Nis-10].

Geisler [Gei-11] beschreibt die Fokusbeobachtung mittels einer Kamera und die anschließende Positionierung auf den Abtragdurchmesser mit dem kleinsten Durchmesser.

Haupt [Hau-09], Hellrung [Hell-00] und Sommer [Som-10] nutzen in ihrer Arbeit einen konfokalen Weißlichtsensor, dessen Licht über eine spezielle Optik, die eine wellenlängenabhängige Brechung weißen Lichts ermöglicht, auf die Werkstückoberfläche fokussiert wird. Die im Fokus befindliche Wellenlänge wird am stärksten reflektiert und über ein Spektrometer ausgewertet und ein Abstandsmesswert angezeigt. Sie entwickeln dazu Regelungskonzepte und integrieren den Sensor sowohl für die Offline- als auch Onlinetiefenerfassung.

Bei den vorgestellten Messmethoden bleibt dennoch oft die Herausforderung der richtigen Referenzierung des Messstrahls zum Laserstrahl. Durch thermische Effekte auf die Fokussierlinse beider Strahlen kann es hier zu weiteren

Abweichungen kommen. An Kanten kommt es zu Abschattungen und somit zu Messfehlern. Zudem sind diese Messverfahren stark abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit (Transparenz, Reflektivität, Farbe, Rauheit), welche wiederum die geeignete Anpassung der Beleuchtung erfordern oder insbesondere beim Einsatz für die Mikrostrukturierung nicht genügend Lichtinformation aus der Mikrokavität mit hohem Aspektverhältnis zurückgewinnen. Zusätzliche Ansätze zur Fokuslagenpositionierung und dessen Überwachung erfolgen durch die Erfassung von Prozessemissionen.

### **2.3.2 Fokuslagenüberwachung durch Erfassung von Prozessemissionen**

Für die Prozessüberwachung z.B. beim Laserschweißen und –bohren wurden verschiedene prozessrelevanten Größen, wie zum Beispiel die Schweißnahtqualität oder der Bohrungsdurchbruch, über die Detektion optischer und akustischer Emissionen erfasst und teilweise bereits als Regel- oder Überwachungsgröße erfolgreich eingesetzt [DeK-07, Dei-06, Dia-10, Far-99, Gu-96, Kan-98, Li-92, Liu-05, Miy-93, Pet-08, She-94a, She-94b].

Li und Steens [Li-92] Untersuchung zeigt, dass erzeugter Dampf oder entstehendes Plasma mit einer Schallemission in der Luft einhergeht. Das akustische Signal steigt mit Ereignissen, die die Dampfemissionen verbessern, wie beispielsweise die Erhöhung der Laserleistung. Die Anwesenheit eines Plasmas kann das Prinzip bei niedriger Plasmadichte verbessern. Gleichzeitig scheinen hohe Plasmadichten als Diffusor oder Abschirmung auf die akustischen Wellen zu wirken.

Binder [Bin-06] untersucht das Mikrobohren mit gepulsten Festkörperlasern. Er setzt eine Fokuslagenabschätzung durch Leuchtphänomene und eine Fokuslagenbestimmung durch Einzelbohrungen in einer Matrix aus 20 x 10 Bohrungen mit variiertem Höhenposition der Fokussierlinse um. Die von ihm beschriebene Fokuslagenabschätzung durch Leuchtphänomene nutzt die Fokusposition mit dem stärksten Leuchten unter der Annahme, dass dies die Position mit dem kleinsten Strahldurchmesser ist. Diese Methode lässt keine Rückschlüsse auf die Tiefenschärfe zu und dient lediglich zur groben Positionierung von fokussierten Strahlen mit langer Brennweite oder geringer Strahlqualität. Für die Fokuslagenbestimmung durch Einzelbohrungen in einer Fokusmatrix werden in eine 50 µm dicke Aluminiumnitrid-Probe Bohrungen ablatiert und bei jeder folgenden Bohrung der Abstand der Fokussierlinse zum Werkstück in definierten Inkrementen variiert. Das Abtragbild wird unter dem Mikroskop bewertet und die z-Achsenposition der Bohrung mit dem kleinsten



Durchmesser als die Fokusposition auf der Werkstückoberfläche mit einer Genauigkeit von 0,2 mm definiert.

Auch beim Laserabtragen werden Prozessemissionen erfasst und untersucht, um Rückschlüsse über die Tiefe von Strukturen oder die Fokusposition aus der Bearbeitungszone zu erhalten [Cha-12, Kli-04, Läß-94, Mei-95, Ree-10, Som-10, Stü-95, Tat-02].

Stürmer [Stü-95] führt Untersuchungen zum Materialabtrag mit ms-gepulsten Nd:YAG-Lasern an Stahl durch ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 0,1 - 20 \text{ ms}$ ,  $f_{\text{rep}} = < 500 \text{ Hz}$ ). Er wertet die Prozessstrahlung für mögliche Prozessüberwachungssysteme aus und findet heraus, dass insbesondere die Signalanteile im VR/IR-Bereich auswertbare Informationen über die einzelnen Abtragphasen wie Aufheizung, Oxidation und Abkühlung enthalten und zur Detektion von Störungen geeignet sind. Das Prozessleuchten tritt im Gegensatz zum Laserstrahltrennen und Laserbohren gleichmäßiger auf.

Sommer [Som-10] erarbeitet die Effizienzsteigerung beim präzisen Oberflächenabtragen mit fs-Laserpulsen. Er belegt, dass mit kurzen Wellenlängen die Abtragqualität deutlich gesteigert werden kann. Abschließend zeigt er Ansätze zur Prozessabsicherung auf, welche die Notwendigkeit der Erfassung der Nuttiefe und -breite beinhaltet und die Sicherstellung der Gratfreiheit ermöglichen soll. Er hält fest, dass die Tiefenmessung mit konfokalen Weißlichtsensoren lateral beugungsbegrenzt und damit im Einsatz an Kanten und dunklen Werkstoffen limitiert ist. Zudem nennt er alternativ optische und akustische Ansätze. Er stellt die Abmessungen laserstrukturierter Nuten in Grauguss, den akustischen Körperschallemissionen und dem optischen Plasmaleuchten in Abhängigkeit von der Fokusslage gegenüber (Abbildung 2-12). Bei Defokussierung des Laserstrahls nimmt die Breite der Nut zu. Die minimale Nutbreite wird erreicht, wenn sich die minimale laterale Ausdehnung des Laserstrahls im Bereich der Werkstückoberfläche befindet. Er hält fest, dass im Gegensatz zur Nutbreite die Nuttiefe keine signifikante Veränderung durch die Defokussierung erfährt. Im fokusnahen Bereich ist das Körperschallsignal maximal, während sich das Signal des Plasmaleuchtens invers verhält. Die Datenpunkte trägt er mit einer Genauigkeit der Fokusslage von 0,1 mm auf.

Sommer fasst zusammen, dass die Intensität des Prozessleuchtens als Maß für die Menge des abgetragenen Materials gilt und aus diesem Grund einen ähnlichen Verlauf wie die Nutbreite zeigt. Er vermutet, dass die Körperschallamplitude innerhalb der Probe offensichtlich nicht vom ablatierten Materialvolumen abhängt, sondern direkt mit dem Durchmesser des Laserstrahls

auf der Werkstückoberfläche und somit in indirekter Weise mit der Nutbreite gekoppelt ist. Mit steigender Pulsenergie nehmen die Breite und die Abtragtiefe der Struktur sowie das Körperschallsignal zu, wobei die Intensität des Plasmaleuchtens abnimmt. Er hält fest, dass auf diesen Messgrößen basierende Verfahren das Potential besitzen, Abweichungen von den Zielgeometrien beim Abtragen mit gepulster Laserstrahlung zu detektieren und eine Online-Überwachung des Bearbeitungsprozesses ermöglichen können.

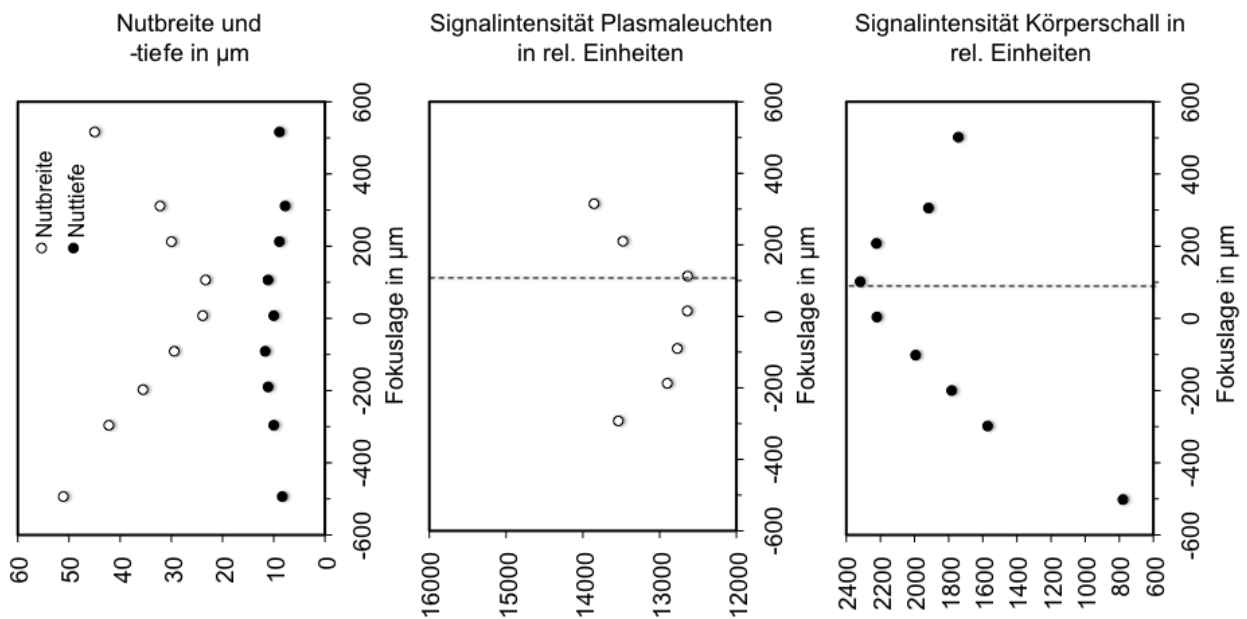


Abbildung 2-12: Gegenüberstellung geom. Abmessungen (Grauguss), akustische und optische Prozessemissionen in Abhängigkeit von der Fokuslage ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $t = 800 \text{ fs}$ ,  $f_{\text{rep}} = 950 \text{ Hz}$ ,  $Q_P = 5 \mu\text{J}$ ,  $v = 0,1 \text{ mm/s}$ ) gemäß [Som-10]

Breitling [Bre-09] beobachtet die Bearbeitungszone mittels ICCD und CMOS Kamera und erfasst mittels Lumineszenz-, Resonanzabsorptions- und Mie-Streuungsfotografie das Plasma beziehungsweise die Materialdampf Wolke. Abbildung 2-13 zeigt die Entwicklung der pilzförmigen Strömung exemplarisch zu drei verschiedenen Zeitpunkten bei der Ablation von Aluminium mit einzelnen 5-ps-Pulsen. Er beschreibt, dass bis etwa 40 ns nach dem Laserpuls die Gesamtströmung von einem planaren Anteil dominiert wird, der anschließend zu einer zentralen zylindrischen Dampfsäule führt, die sich ausgehend von der Probenoberfläche geradlinig ausbreitet (Abbildung 2-13, links). Nach 80 ns führt eine zweite Strömungskomponente zu einer Bedeckung eines Großteils der Probenoberfläche innerhalb der Stoßwelle mit einer flachen Dampfschicht (Abbildung 2-13, Mitte). In der Folge bildet sich ein rotationssymmetrischer Wirbel an der Front der Dampfsäule, wodurch eine Pilzform des Materialdampfs in der Stoßwelle entsteht. Ab etwa 100 ns nach dem Puls beginnt sich die

tellerförmige Dampfstruktur über der Probenoberfläche an den Rändern aufzufächern und löst sich weitere 80 - 100 ns später schließlich von der Oberfläche ab (Abbildung 2-13, rechts). Er vermutet, dass das typische Strömungsbild des Materialdampfes durch die Verdampfung an sich, durch die charakteristischen Strömungs- und Druckverhältnisse im Inneren gasdynamischer Stoßwellen und durch innere Reibung in der Gas- und Dampfströmung verursacht werden [Bre-09].

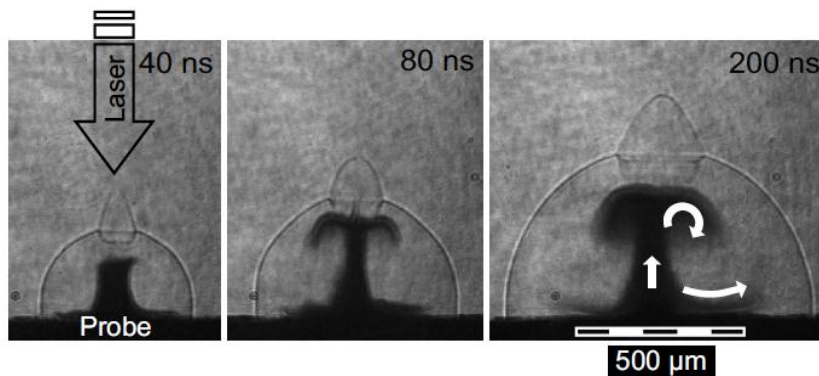


Abbildung 2-13: Resonanzabsorptionsfotografien der Materialdampfströmung bei der Ablation von Aluminium mit einzelnen 5-ps-Pulsen; Verzögerungszeit nach dem Bearbeitungspuls ist im Bild angegeben ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $Q = 500 \text{ µJ}$ , Fokussierung:  $M^2 = 1,5$ ,  $d_F = 15 \text{ µm}$ ,  $H = 280 \text{ J/cm}^2$ , Fokuslage 0, Zeitauflösung 0,5 ns) aus [Bre-09]

Um den Verbleib der verdampften Ablationsrückstände über noch längere Zeiträume hin beobachten zu können, die beispielsweise bis in den Bereich der zeitlichen Pulsabstände von typischen gepulsten Lasersystemen reichen, setzt er die Mie-Streuungsfotografie ein. Abbildung 2-14 zeigt eine Serie von zeitlich gestaffelten Aufnahmen der Abtragswolke bei Einzelpulsablation mit einem 500-fs-Laserpuls und verdeutlicht, dass die Dampfverteilung bis deutlich in den Millisekundenzeitbereich klar erkennbar bleibt. 100 - 400  $\mu\text{s}$  nach dem Laserpuls bricht die kompakte Wolke auf und bildet turbulente Strömungsmuster [Bre-09]. Er beschreibt in seiner Arbeit zudem ausführlich den Gasdurchbruch im Fokus ultrakurzer Laserpulse und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Materialdampfströmung bei der Laserablation.

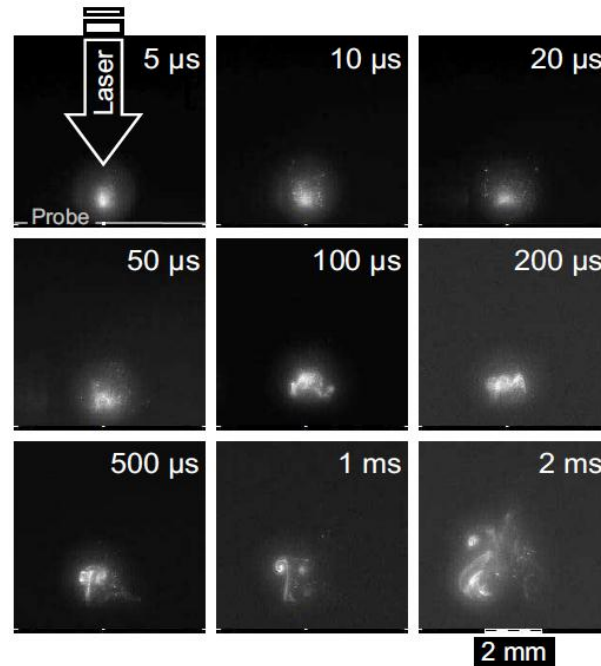


Abbildung 2-14: Mie-Streuungs fotografie der Ausbreitung der Materialdampf wolke beim Abtragen von Aluminium mit einem 500-fs-Puls; Verzögerungszeit nach dem Bearbeitungspuls ist im Bild angegeben ( $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $Q = 500 \mu\text{J}$ , Fokussierung:  $M^2 = 1,5$ ,  $d_F = 15 \mu\text{m}$ ,  $H = 280 \text{ J/cm}^2$ , Fokusslage 0, Zeitauflösung 30 ns) aus [Bre-09]

Streek et al. [Str-09] visualisieren mittels der modernen Highspeedkinematographie ns-Laserwechselwirkungsprozesse in kleinen Zeitskalen ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 80 \text{ ns}$ ). Wesentliche Effekte der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie, wie z.B. das Entstehen von Plasma oder Druckwellen, werden, wie in Abbildung 2-15 dargestellt gegenübergestellt und analysiert. Der Effekt der gerichteten Expansion infolge der Ausbildung einer Kavität mit der Fokusposition auf der Materialoberfläche wird deutlich, während sich das Plasma beim defokussierten Schmelzen der Materialoberfläche kugelförmig ausbreitet.

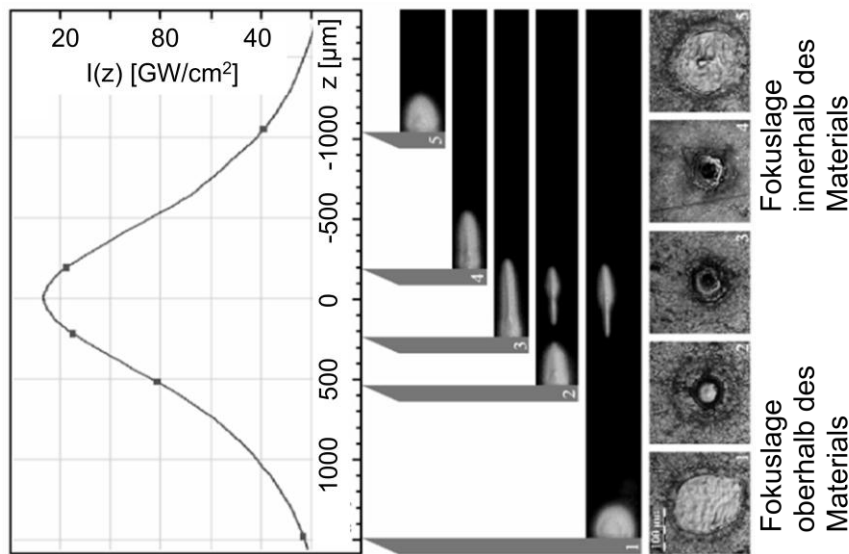


Abbildung 2-15: Intensitätsverteilung eines Gaußstrahls relativ zur Fokusslage bzgl. der Materialoberfläche (links), zugehörige Plasmaaufnahmen (Mitte) und Abtraggilder auf Edelstahl (rechts),  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 80 \text{ ns}$ , gemäß [Str-09]

Auch Steglich [Ste-10] beleuchtet ausführlich die Plasmaentstehung und Abschirmung während der Bearbeitung mit fs- und ps-Pulsdauern für UV-Strahlung. Beim Auftreffen des ersten Pulses auf die Oberfläche entsteht ein Plasma mit der höchsten Intensität welches sich bei den darauffolgenden Pulsen einem stetigen Wert nähert. Er beschreibt die Ausbildung des Plasmas aus unterschiedlich großen und schweren Ladungsträgern in Form einer Primär-, Sekundär- und Tertiärausbreitung. Des Weiteren hält er fest, dass ein Niederschlag der ablatierten Teilchen senkrecht zur axialen Ausbreitungsrichtung erfolgt.

Läßiger [Läß-94] beschreibt in seiner Arbeit den kontrollierten Formabtrag mit ns-Pulsdauern anhand von Metallen und Keramiken ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 100 - 400 \text{ ns}$ ,  $d_F = 0,08 - 0,195 \text{ mm}$ ,  $f_{\text{rep}} = 1 - 13 \text{ kHz}$ ). Für eine Online-Prozessüberwachung und -regelung untersucht er die prozessrelevanten akustischen und optischen Signale. Läßiger hält fest, dass auf Grund der Laufzeitunterschiede zwischen dem Licht und dem Schall in Luft die akustischen Luftschallsignale nur zur Prozessüberwachung jedoch nicht für eine Online-Regelung geeignet sind. Er nutzt daher die Auswertung der aus der Prozesszone emittierten und reflektierten Strahlung, um während der Bearbeitung die aktuelle Abtragtiefe mit einer Messtoleranz von  $0,1 \text{ mm}$  zu bestimmen. Er beschreibt, dass für eine Repetitionsrate von  $9 \text{ kHz}$  das Materialdampfleuchten im Fokus maximal wird (Abbildung 2-16).

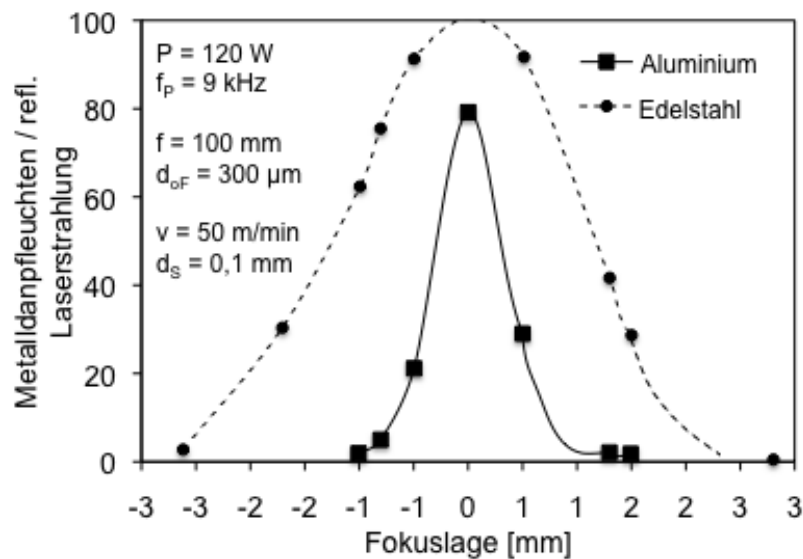


Abbildung 2-16: Quotient aus Metaldampfleuchten und reflektierter Laserstrahlung in Abhängigkeit von der Fokusslage,  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 100 - 400 \text{ ns}$ ,  $f_{rep} = 9 \text{ kHz}$ , gemäß [Läß-94]

Ab einer Repetitionsrate von 10 kHz stellt Läßiger fest, dass die Abtragsrate im Fokus deutlich abnimmt. Für eine präzise Regelung der Fokusslage sind die dargestellten Datenpunkte jedoch nicht ausreichend. Es lässt sich lediglich festhalten, dass das Metaldampfleuchten im fokussnahen Bereich eine maximale Intensität aufweist (Abbildung 2-17).

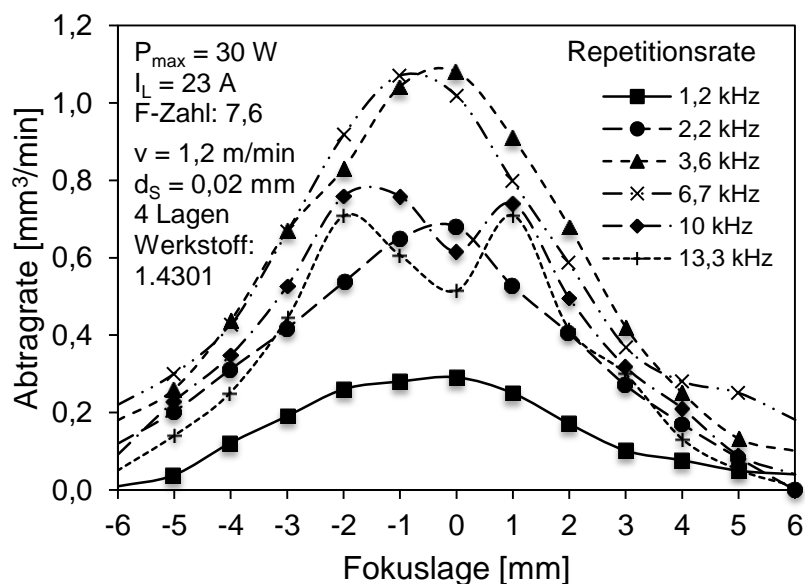


Abbildung 2-17: Abtragsrate in Abhängigkeit von der Fokusslage für Edelstahl,  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 100 - 400 \text{ ns}$ ,  $f_{rep} = 1 - 13,3 \text{ kHz}$ , gemäß [Läß-94]

Bordatchev und Nikumb [Bor-06] betrachten den Zusammenhang der Fokussposition zu den Eigenschaften der akustischen Körperschallemission aus der

Laser-Materialwechselwirkungszone ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 12 \text{ ns}$ ,  $f_{\text{rep}} = 10 \text{ kHz}$ ,  $Q_P = 0,055 \text{ }\mu\text{J}$ ,  $d_{F,\text{theo.}} = 6 \text{ }\mu\text{m}$ ). Sie variieren die Fokusposition in  $75 \text{ }\mu\text{m}$ -Inkrementen in Richtung zur Werkstückoberfläche und ziehen dabei gemäß des „line tests“  $0,5 \text{ mm}$  lange Bahnen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $2 \text{ mm/s}$  in Messing. Anschließend vermessen sie die Breite der ablatierten Bahnen außerhalb der Maschine. Die defokussierte Bearbeitung führt zu breiteren Linien als solchen Linien, die mit dem Fokus auf der Oberfläche ablatiert wurden. Die Aufnahme der Körperschallemissionen erfolgt mit einem  $30 \text{ mm}$  von der Schallquelle entfernt befestigten Körperschallsensor (Abmaße: Durchmesser  $d = 20 \text{ mm}$ , Höhe  $h = 22 \text{ mm}$ ) mit einer Frequenz von  $20 - 500 \text{ kHz}$ . Die Datenauswertung führen sie mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) durch. Sie unterteilen die akustischen Signale in die drei Bänder  $V_1 = 20 - 180 \text{ kHz}$ ,  $V_2 = 180 - 300 \text{ kHz}$  und  $V_3 = 300 - 500 \text{ kHz}$ . Wie Abbildung 2-18 zeigt, weisen alle drei Bänder keine eindeutige Korrelation mit der Fokusposition und Nutbreite (Grabenweite) auf.

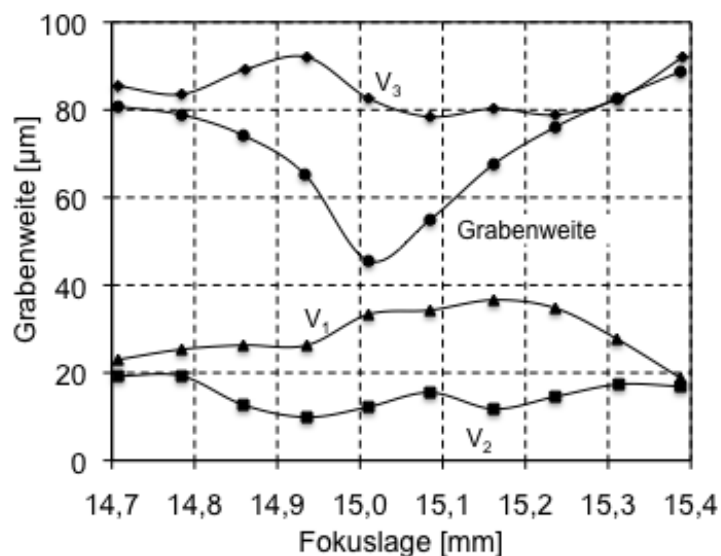


Abbildung 2-18: Zusammenhang zwischen der Nutbreite bei der Bahnablation einer Messingfolie in Abhängigkeit von der Fokusposition und der jeweiligen Körperschallemission ( $V_1$ :  $20 - 180 \text{ kHz}$ ,  $V_2$ :  $180 - 300 \text{ kHz}$ ,  $V_3$ :  $300 - 500 \text{ kHz}$ ),  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $t = 12 \text{ ns}$ ,  $f_{\text{rep}} = 10 \text{ kHz}$ ,  $Q_P = 0,055 \text{ }\mu\text{J}$ ,  $d_{F,\text{theo.}} = 6 \text{ }\mu\text{m}$ , gemäß [Bor-06]

Aus diesem Grund wurde der Ansatz einer Mustererkennung der drei Frequenzbänder verfolgt, um Veränderungen zu erkennen. Diese basiert auf einer Diskriminanzanalyse, welche eine Unterscheidung von zwei oder mehreren Gruppen in Clustern mit spezifischen und einzigartigen Eigenschaften erlaubt. Sie fassen zusammen, dass die Analyse mittels Mustererkennung der

vorgeschlagenen Frequenzbänder aufwendig sei, jedoch eine statistische Systematik der tatsächlichen Fokusposition aufzeigen und für eine Prozesskontrolle voraussichtlich genutzt werden könne [Bor-02, Bor-06].

Lu et al. [Lu-96] untersuchen hörbare akustische Emissionen aus der Laser-Material-Wechselwirkungszone für die Laserablation von Aluminium mit einem KrF-Excimerlaser ( $\lambda = 248 \text{ nm}$ ,  $t = 20 \text{ ns}$ ,  $H = 0,2 - 20 \text{ J/cm}^2$ ). Sie stellen Zusammenhänge zwischen dem akustischen Luftschallsignalverlauf von 20 Hz bis 20 kHz und der Abtrage fest. Den dominantesten Frequenzausschlag beobachten sie bei einer Frequenz von 10,9 kHz.

Kanicky et al. [Kan-99] untersuchen die Möglichkeiten zur Nutzung der akustischen Emissionen bei der Laserablation im Bezug auf die Charakterisierung der Fokusposition bezüglich der Oberfläche, der Abtragtiefe, des Abtragedurchmessers, der eingebrachten Leistung und der Intensität der optischen Signale des verdampften Materiales. Aussagen über die Genauigkeit der Fokuspositionierung oder den genauen Verfahrensablauf zur effektiven Nutzung der akustischen Emissionen für eine systematische Positionierung des Fokus auf der Oberfläche werden jedoch nicht gemacht.

Grad und Mozina [Gra-93a] stellen das Potential sowohl des bei der Ablation entstehenden Luftschalls als auch des dabei auftretenden Körperschalls zur Fokuspositionierung dar. Sie untersuchen Zusammenhänge der akustischen Emission mit der Abtrage eines ns-gepulsten Excimerlasers ( $\lambda = 308 \text{ nm}$ ,  $t = 20 \text{ ns}$ ,  $Q_P = 90 \text{ mJ}$ ,  $f_{\text{rep}} = <5 \text{ Hz}$ ). Der Luftschallsensor ist im Abstand von 90 mm zur Schallquelle positioniert. Auf der Rückseite der Aluminiumprobe erfassen sie mit einem Piezosensor den Körperschall. Grad und Mozina untersuchen das Potential der akustischen Emissionserfassung zur Nutzung derer als Eingangsgröße im Rahmen einer Überwachung der Fokusposition relativ zur Materialoberfläche. Sowohl das Luft- (Abbildung 2-19), als auch Körperschallsignal (Abbildung 2-20) weisen im Fokus einen maximalen Ausschlag auf. Sie stellen fest, dass das Luftschallsignal als Messgröße für die Fokusposition besser geeignet ist. In einer weiteren Arbeit finden sie heraus, dass beide Emissionsarten den Tiefenanstieg bei der Ablation von Keramiken mit mehreren Pulsen erfassen [Gra-93b]. Sie halten fest, dass akustische Emissionen zur Überwachung des Abtrags von  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Keramiken mit Excimerlasern geeignet sind.



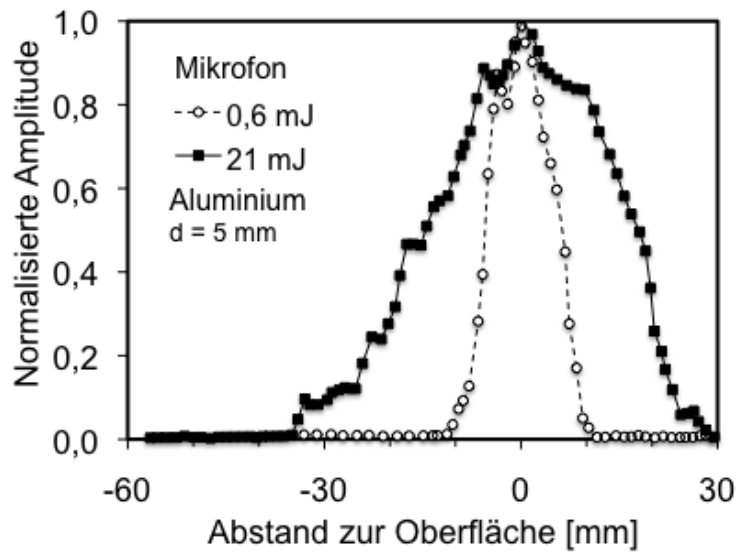


Abbildung 2-19: Abhängigkeit der Amplitude von der Fokusposition für das Luftschallsignal auf Aluminium,  $\lambda = 308 \text{ nm}$ ,  $t = 20 \text{ ns}$ ,  $Q_P = 90 \text{ mJ}$ ,  $f_{\text{rep}} = <5 \text{ Hz}$ , gemäß [Dia-10, Gra-93a]

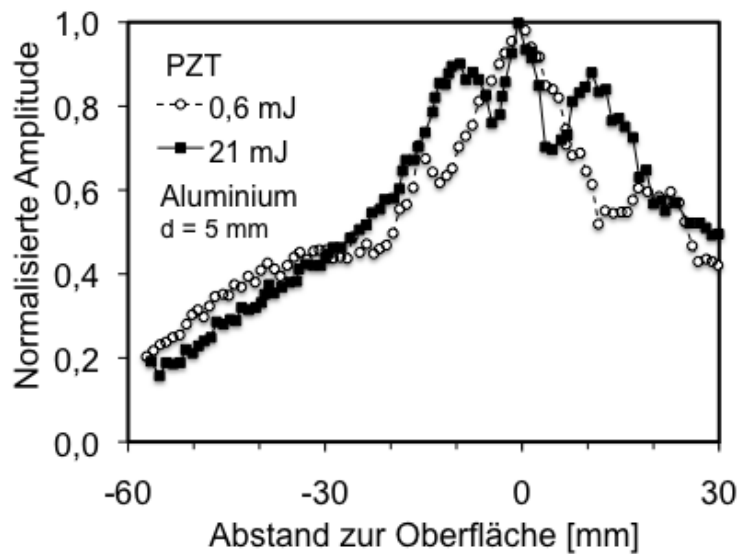


Abbildung 2-20: Abhängigkeit der Amplitude von der Fokusposition für das Körperschallsignal auf Aluminium,  $\lambda = 308 \text{ nm}$ ,  $t = 20 \text{ ns}$ ,  $Q_P = 90 \text{ mJ}$ ,  $f_{\text{rep}} = <5 \text{ Hz}$ , gemäß [Dia-10, Gra-93a]

## Fazit

Das Potenzial der Erfassung des Prozessleuchtens und der akustischen Emissionen als Prozesskontrolle der Fokuslage, Abtragate und –tiefe wird in der Literatur aufgezeigt, jedoch erreichen die Arbeiten nie die detaillierte Ausarbeitung und geforderte Genauigkeit für eine Regelung der Fokuslage in der Mikromaterialbearbeitung.

### 3 Zielsetzung und eigener Ansatz

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, mittels der Erfassung von akustischen Emissionen gezielt und automatisiert vor der Bearbeitung eine Fokusslage zu finden, die zu einem reproduzierbaren Abtragsbild führt. Dabei ist es primär nicht von Interesse, ob die Strahltaile leicht oberhalb oder unterhalb der Materialoberfläche platziert ist, solange das gewünschte Abtragergebnis erreicht wird. Für einen reproduzierbaren Prozess ist lediglich die reproduzierbare Position der Fokusslage relevant, die zu einem geforderten Abtragergebnis führt. Die Laser-Material-Wechselwirkung spiegelt im Abtragsbild die Symmetrie des Laserstrahls um die Strahltaile wider und wird für die Beurteilung der Fokusposition genutzt. Die Reproduzierbarkeit ist besonders dann gegeben, wenn die Fokuslagenermittlung automatisiert über gemessene Größen und die Erfüllung von definierten Kriterien erfolgen kann. Dafür wird in dieser Arbeit ein akustischer Ansatz erarbeitet.

Zunächst wird das Abtragverhalten in Abhängigkeit von der Fokusslage und der Prozessparameter für die Strukturierung des Hartmetalls WC-12Co erarbeitet und ein Prozessfenster extrahiert, das zu geeigneten Abtragergebnissen führt. Dafür ist die Kenntnis der Probeneigenschaften (Topographie, Absorptionseigenschaft) und des Werkzeugs (Laserstrahl) maßgeblich. Unter Zuhilfenahme der statistischen Versuchsplanung wird der Aufwand für die Prozessfensteranalyse sinnvoll begrenzt. Das Prozessverständnis wird schrittweise unter Steigerung der Komplexität und der Anzahl der Parameter erarbeitet. Zunächst werden der Einzelpulsabtrag, anschließend der Bahnabtrag und zuletzt die Strukturierung von Flächen und dreidimensionalen Volumina betrachtet. Da der schrittweise Verständnisaufbau für eine Bearbeitung nicht immer relevant ist, wird zur Ermittlung der Parameterkombinationen zur Flächenstrukturierung ein Schnelltest unter Ausnutzung der statistischen Response Surface Methode (RSM) erarbeitet und die Zeiteinsparung aufgezeigt.

Den im Abtragsbild auftretenden Defekten in Form von Löchern wird ebenfalls Rechnung getragen und ein Beitrag zum Verständnis der Entstehungsmechanismen geleistet sowie mögliche Abhilfen aufgezeigt.

Mit dem somit erlangten Prozessverständnis wird im weiteren Verlauf eine Methode zur reproduzierbaren Fokuslagenpositionierung (Prozessvorbereitung) mittels akustischer Emissionen (AE) entwickelt. In der Entwicklungsphase werden sowohl akustische als auch optische Emissionen erfasst, um Parallelen abzuleiten. Die optische Emission (OE) besteht aus dem sichtbaren laserinduzierten Plasma, welches als Prozessleuchten auftritt. Die eingestellten

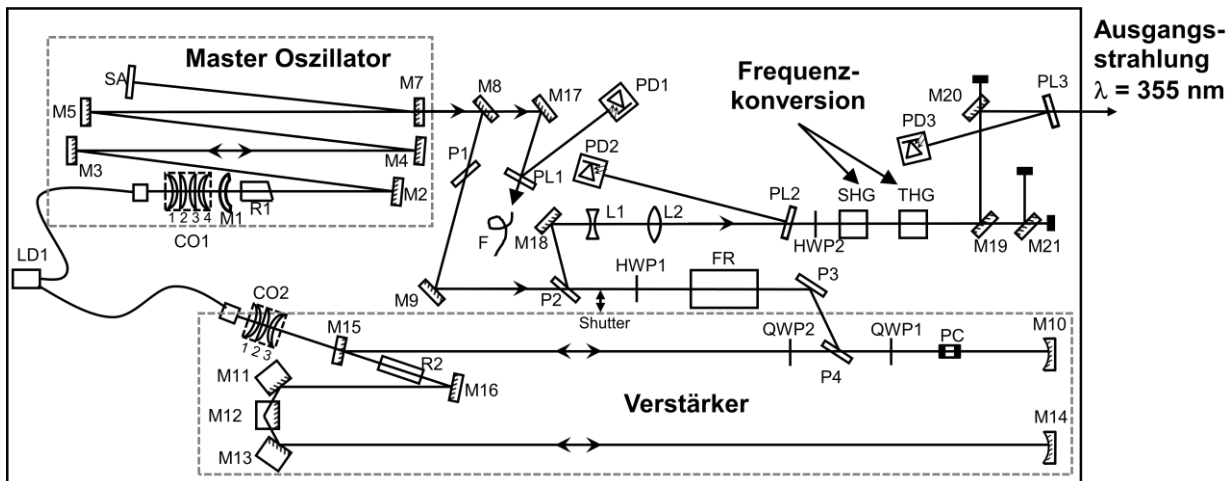
Parameter und die erfassten Emissionen werden dem Abtragergebnis gegenübergestellt und Gesetzmäßigkeiten für die Fokuspositionierung abgeleitet. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Strategie zur akustischen Fokuslagenpositionierung und Leistungseinstellung erarbeitet und die Automatisierung in der Software LabVIEW (National Instruments) implementiert.

## 4 Versuchseinrichtung und -methodik

### 4.1 Laserbearbeitungsanlage und integrierte Sensortechnik

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine für die Lasermikrobearbeitung entwickelte Laserbearbeitungsanlage (microPULSE) der Firma 3D-Micromac AG verwendet. Zur Entwicklung von neuen Regelungskonzepten und Bearbeitungsstrategien wurde diese um spezifische Komponenten erweitert. In die Laserbearbeitungsanlage microPULSE sind die Strahlquelle, die Strahlführungskomponenten, die Steuerung, die Kinematik sowie Sensoren zur Erleichterung der Prozessführung integriert.

Da sich die Fokussierbarkeit mit kleiner werdenden Wellenlängen verbessert, wird hier für die Mikrolaserbearbeitung eine Ultrakurzpulsstrahlquelle (UKP-Laser) mit einer Wellenlänge von 355 nm verwendet. Die Strahlquelle ist ein ultrakurz gepulster, modengekoppelter, frequenzverdreifacher Nd:YAG-Festkörperlaser der Firma Ekspla (Typ PL2210). Die Strahlerzeugung erfolgt im Wesentlichen in drei Schritten gemäß dem MOPA-Aufbau (Master-Oscillator-Power-Amplifier), welcher die Einheiten Master-Laser, den Verstärker und die Frequenzkonversion beinhaltet (Abbildung 4-1). Im Master-Laser werden ultrakurze Laserpulse durch Modenkopplung generiert [Kne-08]. Dabei wird der Bauraum durch Faltung der Resonatorlänge gering gehalten und ein Ytterbium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Stab (Yt:YAG) als laseraktives Medium genutzt. Als Pumpquelle kommt eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von 808 nm zum Einsatz. Aus dem Master-Laser werden Pulse in die Verstärkereinheit gelenkt. Im Verstärker werden die Pulse anschließend bei 16 Umläufen durch einen weiteren ebenfalls diodengepumpten Neodym dotierten Yttrium-Aluminium-Granat-Stab (Nd:YAG) verstärkt. Mittels eines optischen Schalters (Pockels-Zelle) werden die verstärkten Pulse mit einer Wellenlänge von 1064 nm aus der Verstärkungseinheit ausgekoppelt und der Frequenzkonversion zugeführt, welche sich in zwei Stufen gestaltet. Zunächst wird der Strahl durch eine nichtlineare Optik, den SHG-Kristall (Second Harmonic Generator) gelenkt und somit zu einer Wellenlänge von 532 nm konvertiert, um dann im THG-Kristall (Third Harmonic Generator) auf die UV-Wellenlänge von 355 nm gebracht zu werden [Kne-08].



- |                          |                     |                                 |
|--------------------------|---------------------|---------------------------------|
| LD: Laserdiode           | FR: Faraday Rotator | HWP: Lambda/2 Plättchen         |
| CO: Einkoppeloptik       | M: Spiegel          | QWP: Lambda/4 Plättchen         |
| R: Laserstab             | L: Linse            | SHG: Frequenzverdoppler         |
| SA: Sättigbarer Absorber | PD: Fotodiode       | THG: Frequenzverdreifacher      |
| F: Lichtwellenleiter     | PL: Glasplättchen   | P: Polarisierender Strahlteiler |
| PC: Pockels Zelle        |                     |                                 |

Abbildung 4-1: Ekspla Lasersystem Typ PL2210 (MOPA-Aufbau)

Am Ausgang des Lasersystems steht ein linear polarisierter Laserstrahl mit einer maximalen mittleren Laserleistung von 200 mW bei einer Repetitionsrate von 1000 Hz und einem Strahldurchmesser von 6 mm zur Verfügung, der in den weiteren Strahlengang eingekoppelt wird. Im Strahlengang wird der Laserstrahl zunächst über zwei Umlenkspiegel auf die optische Achse der weiterführenden Optiken gelenkt. Ein Shutter der Firma Uniblitz schaltet in 1,7 ms den Laserstrahl für den Arbeitsraum zu. Der Shutter ist um 3° um die eigene Achse verdreht, so dass im geschlossenen Zustand die AlMgF<sub>2</sub> beschichtete Seite des Shutters den Strahl in eine Strahlfalle leitet und in Wärme überführt.

Im offenen Zustand passiert der Strahl den Shutter. Anschließend wird der Laserstrahl durch eine Abschwächereinheit geführt. Wie in Abbildung 4-2 schematisch dargestellt, besteht diese aus einer motorisierten λ/2-Platte, einem Strahlteilerwürfel und einer Strahlfalle. Durch Verdrehen der λ/2-Platte wird die Polarisation des Strahls verändert und der Strahlteilerwürfel lenkt die abweichende Polarisationsrichtung in die Strahlfalle ab. Somit wird ein Teil des Strahls herausgefiltert und die Laserleistung in der Wirkzone reduziert. Aufgrund des begrenzten Bauraums wird der passierende Anteil des Strahls um 90° umgelenkt und einer weiteren motorisierten λ/2-Platte zur Manipulation der Polarisation (linear oder zirkular) zugeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgt mit linear polarisierter Laserstrahlung, deren Polarisation konstant gehalten wird.

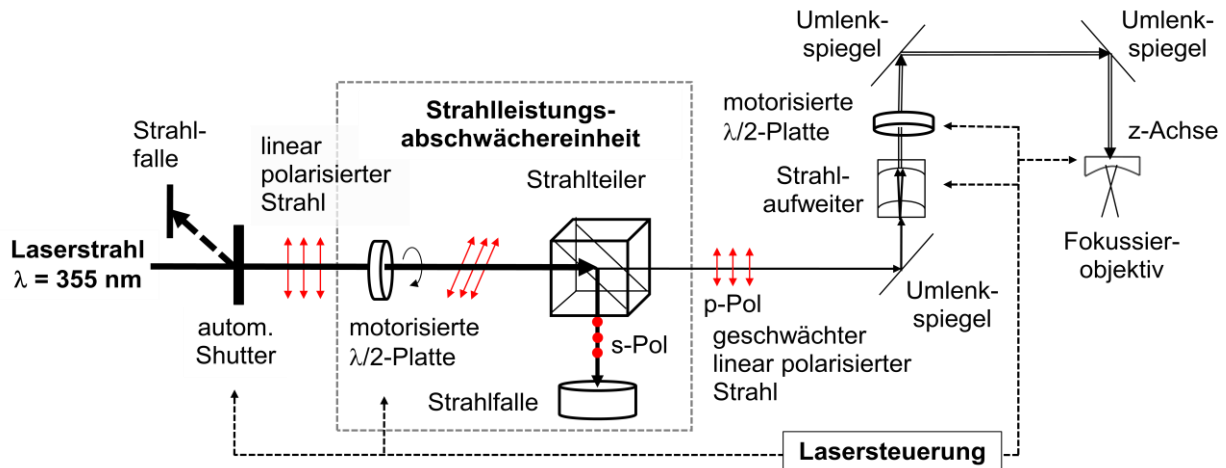


Abbildung 4-2: Laserstrahlengang und dessen Komponenten

Anschließend wird der Strahl in einem motorisierten Strahlaufler der Firma Sill Optics GmbH & Co. KG, mit möglichen Aufweitungsstufen von 2-fach bis 8-fach aufgeweitet. Der motorisierte Strahlaufler wurde so in die Anlage integriert, dass über die CNC-Programmsteuerung die Aufweitung automatisiert manipuliert werden kann. Der Strahlaufler arbeitet nach dem Galilei Prinzip [Hüg-09], dessen Vorteile die kurze Bauweise und die Tatsache sind, dass hier keine Fokussierung zwischen den Linsen stattfindet. Durch die Aufweitung des Strahls werden eine stärkere Fokussierung des Strahls und eine höhere Strahlgüte erreicht, die für die Mikrobearbeitung von immenser Bedeutung sind. Weitere Umlenkspiegel leiten den Laserstrahl in ein Objektiv der Firma Sill Optics GmbH & Co. KG mit der Brennweite  $f = 60 \text{ mm}$ . Je nach Aufweitung kann der Fokusbereich bis auf wenige Mikrometer in der Fokustaille eingestellt werden.

Die Fokussierlinse ist so auf der z-Achse befestigt, dass durch Verfahren der z-Spindelachse die z-Position der Fokustaille verschoben werden kann. Das Werkstück wird unterhalb des senkrecht einfallenden Laserstrahls in x- und y-Richtung mittels zweier Linearachsen LMS 180 der Firma PI miCos GmbH mit einer Maximalgeschwindigkeit von  $500 \text{ mm/s}$  bei einer statischen Positioniergenauigkeit von  $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$  verfahren (Abbildung 4-3).

Auf der y-Achse sind zwei Goniometerachsen montiert, die eine Verkippung des Werkstücks bis zu  $45^\circ$  mit einer unidirektionalen Wiederholgenauigkeit von  $0,004^\circ$  zulassen. Die Bewegungssteuerung erfolgt durch das softwarebasierte NC-System A3200 der Firma Aerotech Inc. Die Positionsregelung erfolgt jeweils dezentral in digitalen Servoverstärkern. Der Versuchsaufbau befindet sich in einer Klimazelle, deren Temperatur auf  $22,4^\circ\text{C}$  geregelt wird.

Zur Beobachtung und lateralen Positionierung des Laserfokus auf der Probenoberfläche ist ein senkrecht zu der x-/y-Achse ausgerichtetes Kamerasystem der Firma Cognex Corporation an der z-Achse befestigt (Abbildung 4-3). Mit Hilfe eines eingebledeten Kamerakreuzes in die Steuerungssoftware wird mittels Verfahren der Achsen die Positionierung des Laserfokus in der x-/y-Ebene vor der eigentlichen Fertigung vorgenommen.

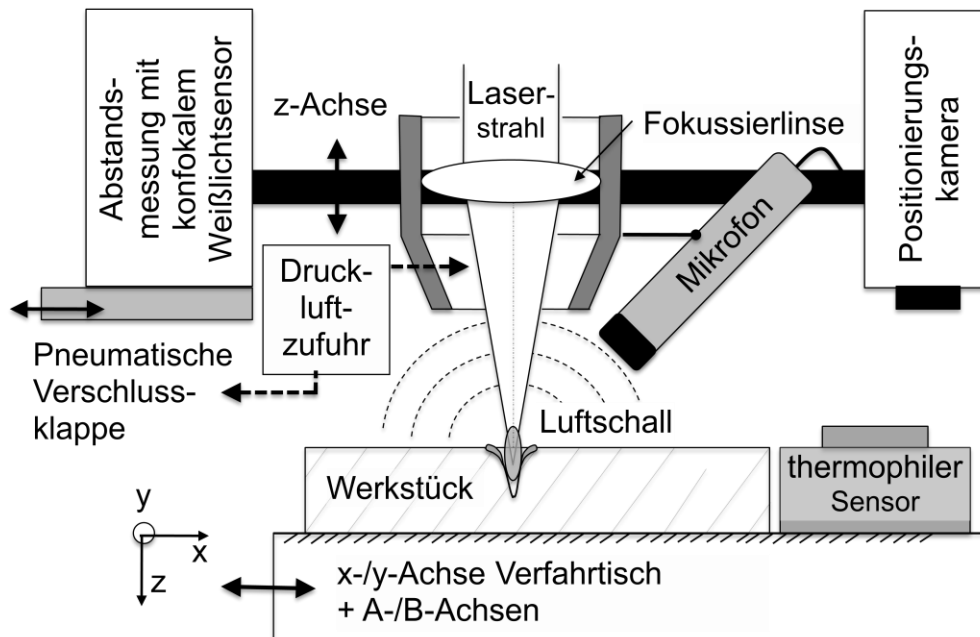


Abbildung 4-3: Schematischer Versuchsaufbau und Anordnung der integrierten Sensortechnik

Ein zusätzlich integrierter hochauflösender chromatischer Sensorkopf FRT CWL F der Firma Fries Research & Technology GmbH dient zur berührungslosen, konfokalen Abstandsmessung zwischen der Laserfokussierlinse (z-Achse) und der Probenoberfläche. Der Messbereich beträgt 10 mm bei einer lateralen Auflösung von 12  $\mu\text{m}$  und einer Messgenauigkeit von 300 nm. Über eine Lichtleiterfaser wird Licht der Wellenlänge 400 - 700 nm in den Sensorkopf eingespeist und über eine spezielle Optik zu verschiedenen Brennweiten fokussiert (Abbildung 4-4). Die Wellenlänge, die sich auf der zu messenden Werkstückoberfläche befindet, wird am stärksten zurückreflektiert. In der Auswerteeinheit wird diese mittels eines Spektrometers analysiert und in einen Abstandswert umgerechnet. Dieser Wert wird auf einer Anzeige visualisiert und zugleich der Lasersteuerung übergeben. Abbildung 4-4 (rechts) zeigt ein gemessenes 3D-Oberflächenprofil, welches mittels speziell programmierten Makros in MS Excel dargestellt werden kann. Der Sensorkopf ist an der z-Achse montiert und wird parallel mit der Fokussieroptik des Laserstrahls verfahren.

Durch eine pneumatisch steuerbare Verschlussklappe wird die Sensoroptik außerhalb der Messzyklen vor Verschmutzungen aus der Umgebung und dem Ablationsprozess geschützt (Abbildung 4-3). Mit dem Sensor ist es möglich ortsauflösend die Abstände zwischen der Laserfokussierlinse und Werkstückoberfläche zu messen. Anwendung findet die Abstandsmessung zur senkrechten Ausrichtung des Werkstücks zum Laserstrahl, zur Tiefenmessung der abgetragenen Kavitäten und zur Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit im Profilschnitt [Sch-09a].

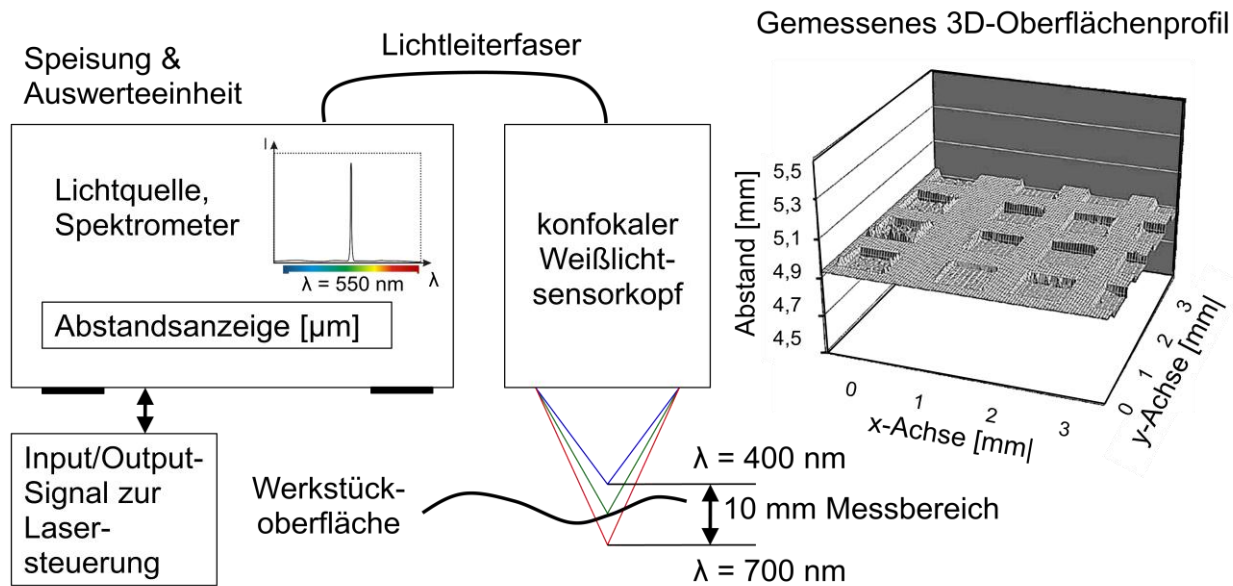


Abbildung 4-4: Schema des Aufbaus des konfokalen Weißlichtsensors (links) und Darstellung des gemessenen 3D-Oberflächenprofils (rechts)

Abbildung 4-5 zeigt die Darstellung eines ausgewerteten Profilschnitts durch drei Kavitäten. An den Kanten der Kavität kommt es zu Messfehlern, weshalb diese gefiltert werden und in die Bewertung der Tiefe einer Kavität nicht einfließen.

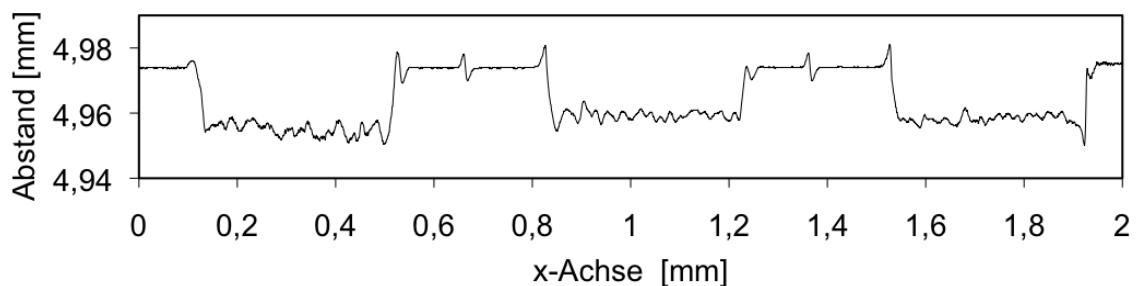


Abbildung 4-5: Profilschnitt durch drei Kavitäten, Auswertung der durch den konfokalen Weißlichtsensor erfassten Abstandswerte in MS Excel



Des Weiteren wurde ein Leistungsmessgerät (thermophiler Sensor) der Firma Coherent Inc. im Arbeitsraum auf die y-Achse montiert (Abbildung 4-3). Dieser Leistungsmesskopf arbeitet nach dem thermoelektrischen Prinzip, d.h. die durch die auftreffende Strahlung erzeugte Wärme wird direkt in eine Spannung umgewandelt. Damit ist es möglich, den Messkopf unter den Laserstrahl zu verfahren und die Laserleistung gemäß ISO 11554 hinter der Fokussieroptik in der Strahltaile zu messen. Eine alternative Messung der Laserleistung im Strahlengang weit vor der Fokussieroptik ermöglicht zwar eine Onlinemessung im Prozess, jedoch erfährt der Strahl bis zur Wirkzone Leistungsverluste durch Absorption der Strahlung an optischen Komponenten, welche somit die Leistungsmessung verfälschen. Nur die Leistungsmessung hinter der Fokussieroptik erfasst die tatsächliche Leistung in der Wirkstelle und wird deshalb in dieser Arbeit eingesetzt.

## 4.2 Verwendete Werkstoffe

In der zugrunde liegenden Arbeit wird der Fokus auf die Bearbeitung von Hartmetall WC-12Co (TSF44) und Keramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  (SN80) gelegt. Auf weiteren Werkstoffen werden Untersuchungen zu Vergleichszwecken und zur Unterstreichung der Allgemeingültigkeit von Aussagen zu bestimmten Materialgruppen durchgeführt.

Das Ultrafeinstkornhartmetall WC-12Co (TSF44, Firma Plansee Tizit) besteht aus 86,65 Vol.-% Wolframcarbid, 12,0 Vol.-% Kobalt als Bindephase, und 1,35 Vol.-% Mischkarbiden ((W, Ti, Ta, Nb) C) [Kie-11]. Die mittlere Korngröße beträgt 0,4  $\mu\text{m}$  bei einer Dichte von 14,10  $\text{g/cm}^3$ . Die Schmelztemperatur liegt bei ca. 3073 °C und die Sublimationstemperatur bei ca. 4055 °C. Die Härte nach Vickers wurde aus fünf Messpunkten zu 1800 HV1 bestimmt. Aufgrund der hohen Biegebruchfestigkeit von 4600 MPa wird dieses Hartmetall besonders für das Stanzen von dünnen Blechen und Folien mit extrem dünnwandigen Stempeln eingesetzt.

Die ionisch gebundene Mischkeramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  (SN80) des Herstellers CeramTec besteht aus 90 Vol.-%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $T_{\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Schmelz}} \sim 2050 \text{ °C}$ ,  $T_{\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Subl}} \sim 3000 \text{ °C}$ ) und 10 Vol.-%  $\text{ZrO}_2$  ( $T_{\text{ZrO}_2, \text{Schmelz}} \sim 2690 \text{ °C}$ ,  $T_{\text{ZrO}_2, \text{Subl}} \sim 5000 \text{ °C}$ ) [Ash-06]. Die Härte wurde aus fünf Messpunkten zu 1700 HV1 bestimmt. Bei dieser Mischkeramik handelt es sich um einen weißen und elektrisch nicht leitfähigen Werkstoff.

Die folgenden Materialien dienen als Vergleichswerkstoffe. Der im Formenbau eingesetzte niedriglegierte, gehärtete und vergütete Werkzeugstahl 30CrMo6 (Toolox 44, SSAB Oxelösund) mit erhöhten Mn- und Si-Gehalt findet zu

Vergleichszwecken seinen Einsatz als Probenmaterial [Kie-11]. Die Härte beträgt 450 HV1.

Des Weiteren wird der Warmarbeitsstahl (1.2343) X38CrMoV5-1 verwendet. Seine Bestandteile sind 0,38 Vol.-% C, 1,1 Vol.-% Si, 0,4 Vol.-% Mn, 5,0 Vol.-% Cr, 1,3 Vol.-% Mo und 0,4 Vol.-% V. Dieser Stahl besitzt eine hohe Zähigkeit, gute Anlassbeständigkeit und Warmverschleißfestigkeit. Er wurde bei einer Temperatur von 990 °C gehärtet und anschließend auf 520 °C angelassen. Die Vickers-Härte beträgt 600 HV1.

Das verwendete Halbleitersilizium in Form eines Wafers ist ein defektfreier Einkristall aus 99,9 % Si (P/Bor dotiert, Kristallorientierung  $\langle 111 \rangle$ ). Die Schmelztemperatur liegt bei 1414 °C und die Siedetemperatur bei 3260 °C. Die Dichte beträgt 2,336 g/cm<sup>3</sup>. Die Vickers-Härte wurde zu 1117 HV0,2 bestimmt.

Bei den hier verwendeten Proben aus Kalknatronglas ( $\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) handelt es sich um ein Trägerglas bestehend aus 72,2 %  $\text{SiO}_2$ , 1,2 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,03 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  der Firma Carl Roth GmbH + Co. KG.

Ekasic Siliziumcarbid (SiC) F der Firma ESK ist ein gesintertes Siliziumcarbid mit einer mittleren Korngröße von  $< 5 \mu\text{m}$ . Seine Porosität liegt bei kleiner 3 % bei einer Dichte von  $> 3,1 \text{ g/cm}^3$ . Es ist besonders abrieb-, verschleißfest sowie extrem temperaturstabil und universell korrosionsbeständig, weshalb es beispielsweise für Mikroreaktoren eingesetzt wird. Die Vickers-Härte beträgt 24,5 HV1 mit einer Druckfestigkeit von  $> 2500 \text{ MPa}$ . Die Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur liegt bei ungefähr 2300 °C.

Des Weiteren kommt eine Titanlegierung (Ti-6Al-4V) besteht aus 86 % Titan, 6 % Aluminium, 2 % Zinn, 4 % Zirkonium und 2 % Molybdän zum Einsatz. Mit einer Dichte von  $4,51 \text{ g/cm}^3$  ist Titan fast um die Hälfte leichter als Stahl. Die Schmelztemperatur liegt bei 1664 °C. Im Vergleich zu den anderen Werkstoffen besitzt die Titanlegierung eine verhältnismäßig geringe Härte mit 349 HV. Titan findet Verwendung als Werkstoff in der Raumfahrt, Rüstungsindustrie, Luftfahrt und Medizintechnik.

### 4.3 Probentopographie und Absorptionseigenschaften

Material und Topographie der Probenoberflächen haben einen Einfluss auf die Absorption der Laserstrahlung [Sei-06] und das Abtragbild nach der Strukturierung. Aus diesem Grund werden diese Größen hier näher betrachtet.

Die Oberflächentopographie wird mit einem Konfokalmikroskop  $\mu\text{s}$ urf der NanoFocus AG bestimmt. Es handelt sich dabei um ein berührungsloses optisches 3D-Oberflächenmesssystem basierend auf der konfokalen Multi-

Phinole-Technik, welches unterstützt durch einen Piezoaktor nanometergenau die Oberflächentopographie erfasst. In der Analysesoftware  $\mu$ soft analysis werden Abtragprofile und dreidimensionale Messungen graphisch dargestellt und die Auswertung von 2D- (R-Werte) und 3D-Rauheits- (S-Werte) und Höhenparametern vorgenommen (Abbildung 4-6, rechts) [Bro-08].

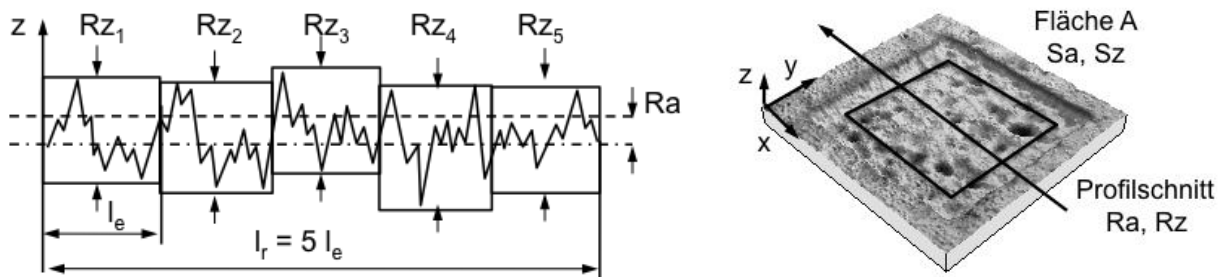


Abbildung 4-6: Darstellung zur Berechnung des Mittenrauheitswertes  $Ra$  und der Rautiefe  $Rz$  im Profilschnitt (links), Flächenrauheit  $Sa/Sz$  (rechts)

Die Welligkeit der Profile wird mit einer Grenzwellenlänge (cutt-off) gemäß ISO 11562 von  $\lambda_c = 0,08$  mm gefiltert. Tabelle 4-1 fasst die Einstellgrößen der Grenzwellenlänge, Taststrecke und Messstrecke nach DIN EN ISO 4288:1998 und DIN EN ISO 3274:1998 zusammen.

Tabelle 4-1: Zusammenhang zwischen der Grenzwellenlänge und der Messstrecke nach DIN EN ISO 4288:1998 und DIN EN ISO 3274:1998 [Rai-05]

Grenzwellenlänge $\lambda_c$ [mm] = Einzelmessstrecke $l_e$	Gesamtmessstrecke $l_r$ [mm] = $5 \times l_e$	Taststrecke $l_t$ [mm] = $6 \times l_e$
0,08	0,4	0,48

Der arithmetische Mittenrauwert  $Ra$  ist das arithmetische Mittel der Beträge der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils innerhalb der Messstrecke. Er stellt die mittlere Abweichung des Profils von der mittleren Linie dar.

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad \text{Formel 4-1}$$

Die gemittelte Rautiefe  $Rz$  ist das arithmetische Mittel der Differenz der Höhe der größten Profilsitzen und der Tiefe des größten Profiltals innerhalb der fünf Einzelmessstrecken  $l_e$ .

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rz(i) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\max(\text{Profilpunkt}) - \min(\text{Profilpunkt})) \quad \text{Formel 4-2}$$

Insgesamt reagiert Rz empfindlicher auf die Veränderung von Oberflächenstrukturen als Ra [Rai-05]. Die Vermessung von Nuten bzw. Bahnen in Form von Profilschnitten erfolgt an fünf Stellen längs der einzelnen Bahnen. Die Nuttiefe und Schmelzeauswurfhöhe werden hier jeweils gemessen. Im Profilschnitt werden anschließend die Nutfläche und die Schmelzeaufwurfhöhe errechnet.

Für visuelle Eindrücke und die Bestätigung von gemessenen Ausreißern an Kanten oder Defekten werden elektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt. Die Untersuchungen finden mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM), Typ Zeiss am Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) statt. Die nicht-metallischen Materialien  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  und Glas werden vor der REM-Untersuchung mit einer ca. 5 nm starken Platinschicht besputtert. Mit dem FEI Quanta 650 FEG ESEM ist es möglich, auch ohne Beschichtung in einer Wasseratmosphäre Aufnahmen durchzuführen. Wenn die rasterelektronenmikroskopischen Abbildungen in dieser Arbeit nicht explizit mit ESEM gekennzeichnet sind, handelt es sich bei den nichtleitfähigen Materialien um besputterte Proben. Andernfalls sind die Oberflächen unbeschichtet.

Zusätzlich wurden am LEM Schnitte durch Strukturen mit Hilfe einer Ionenfeinstrahlanlage (FIB, Focused Ion Beam) vom Typ Zeiss 1540ESB erstellt. Des Weiteren kommt ein Lichtmikroskop vom Typ Zeiss mit integrierter Digitalkamera und Auswertesoftware Axiovision zum Einsatz. Hier wurden mit Hilfe der Software geometrische Größen der Lichtmikroskopaufnahme gemessen.

Eine raue Oberfläche mit Schleifriefen, wie sie bei geschliffenen Oberflächen vorliegt, führt dazu, dass der Laserstrahl sich der rauen Kontur anschmiegt und vorhandene tiefe Riefen selbst nach mehrschichtigem Abtrag bis in den Grund der Kavität abbildet. Abbildung 4-7 zeigt eine 10  $\mu\text{m}$  tiefe Riefe auf der Probenoberfläche (links) vor und (rechts) nach der Bearbeitung im Grund der Kavität nach 20-facher Überfahrt. Die Riefe wird durch mehrfaches Abtragen nicht geglättet, sondern bei jeder Überfahrt mit abgebildet. Kleine Riefen, die quer zur stark ausgeprägten Riefe verlaufen sind nach 20 Ebenen kaum noch zu detektieren. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Probenoberfläche so homogen wie möglich zu präparieren. Um negative Einflüsse von Schleifriefen etc. zu vermeiden, werden die verwendeten Probenoberflächen zunächst geschliffen und anschließend poliert.

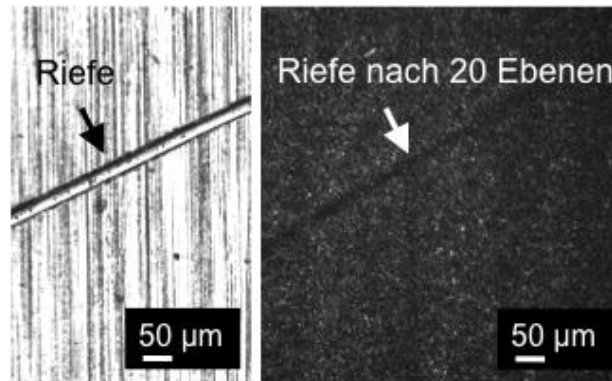


Abbildung 4-7: 10 µm tiefe Riefe auf der Probenoberfläche (links), 8 µm tiefe Riefe im Grund der bearbeiteten Kavität nach 20-facher Überfahrt (rechts), X38CrMoV5-1

Des Weiteren werden einige Probenoberflächen für die Prozessvorbereitung (Probenausrichtung, Fokussuche etc.) beschichtet, da eine Bewertung der Breite der ablatierten Strukturen mit dem Lichtmikroskop bei weißen Keramiken (wie  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ) oder transparentem Glas auf Grund von mangelndem Kontrast erschwert ist. Auch bei der senkrechten Ausrichtung des Werkstücks zum Abstandssensor wird ein großer Anteil des Messstrahls in die unbeschichtete Probe transmittiert und führt zu Messfehlern. Eine partielle schwarze Oberflächenbeschichtung sorgt bei der Charakterisierung von transparentem Glas und weißer  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Keramik für ausreichend Absorption und Kontrast für die optische Einkopplung des Messstrahls des konfokalen Weißlichtsensors und des Lichtmikroskops. Die Rauheit und die Absorption der schwarz beschichteten Probenoberflächenbereiche wird ebenfalls charakterisiert.

Die verwendeten WC-12Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Proben sind mindestens 5 mm dick, so dass die Transmission  $T$  der Strahlung zu null angenommen werden kann. Die Reflexionsmessung erfolgt am Lichttechnischen Institut (LTI) des KIT mit einem Spektrophotometer der Firma Perkin Elmer (Lambda 1050, UV/Vis/NIR) mit einer Wellenlängengenauigkeit von  $\pm 0,080$  nm.

Die Probenoberflächen werden geschliffen und anschließend spiegelnd poliert. Abbildung 4-8 zeigt das Absorptionsverhalten  $A$  ( $A = 1 - R$  bei  $T = 0$ ) von WC-12Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Probenoberflächen in Abhängigkeit von der Topographie bei senkrecht einfallendem linear polarisierten Strahl. Die in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Laserwellenlänge ( $\lambda = 355$  nm) wird in den Absorptionsspektren hervorgehoben.

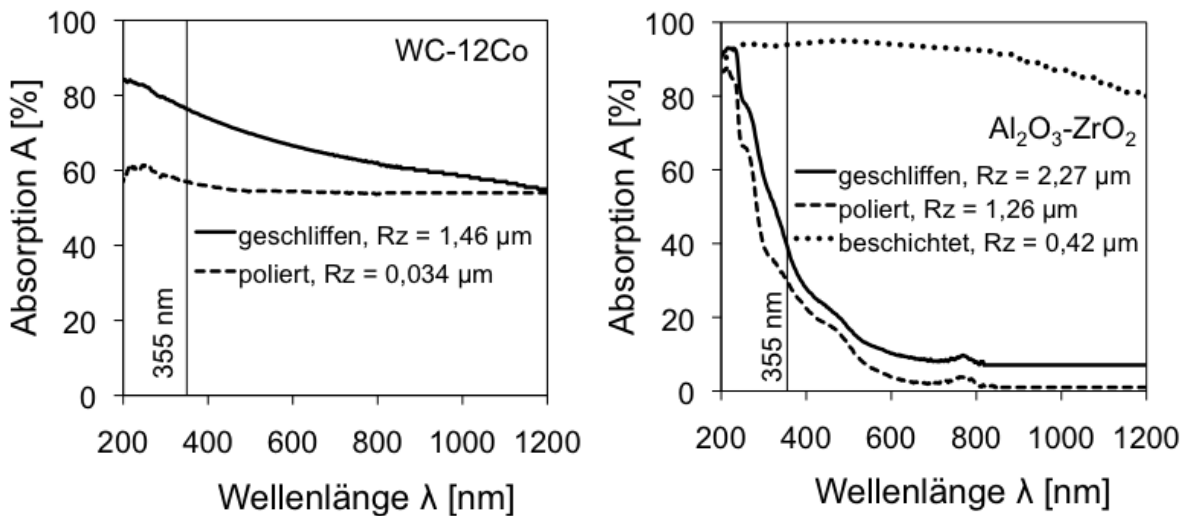


Abbildung 4-8: Absorptionsspektrum in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit Rz für Hartmetall WC-12Co (links) und Keramik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> (rechts)

Wie in Abbildung 4-8 (links) visualisiert, wird die Strahlung der Wellenlänge 355 nm auf der spiegelnd glatten Oberfläche der WC-12Co Probe stärker reflektiert, als auf der geschliffenen Oberfläche. Die Absorption der geschliffenen WC-12Co Probenoberfläche ( $R_z = 1,46 \mu\text{m}$ ) ist 20 % höher als bei der polierten Oberfläche ( $R_z = 0,034 \mu\text{m}$ ). Es kann festgehalten werden, dass mit steigender Oberflächenrauheit die Absorption der Wellenlänge von 355 nm auf WC-12Co ebenfalls steigt. Bei der Wellenlänge  $\lambda = 1200 \text{ nm}$  hingegen ist die Absorption für beide Oberflächen nahezu identisch. Hier spielt die Topographie (geschliffen oder poliert) für die Absorption der betrachteten Wellenlänge von 1200 nm keine wesentliche Rolle.

Die Absorption der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Probe zeigt den in Abbildung 4-8 (rechts) dargestellten Verlauf. Hier ist die Absorption für den schwarz beschichteten Probenoberflächenbereich ( $R_z = 0,42 \mu\text{m}$ ) 50 % höher als für die geschliffene Oberfläche ( $R_z = 2,27 \mu\text{m}$ ). Die geschliffene und anschließend schwarz beschichtete Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Oberfläche weist zwar eine geringere Oberflächenrauheit auf als ohne Beschichtung, absorbiert die Strahlung jedoch um bis zu 60 % stärker auf Grund der geringeren optischen Eindringtiefe der dunklen Oberfläche. Die geschliffene weiße Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Oberfläche ( $R_z = 2,27 \mu\text{m}$ ) absorbiert 5 % stärker als die polierte Oberfläche ( $R_z = 1,26 \mu\text{m}$ ). Für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> kann festgehalten werden, dass mit steigender Oberflächenrauheit die Absorption der Wellenlänge von 355 nm geringfügig steigt.

Um Einflüsse von Schleifriefen aus der Oberflächenpräparation auf das Abtragergebnis zu minimieren werden polierte Oberflächen eingesetzt und eine

geringfügig niedrigere Absorption in Kauf genommen. Abbildung 4-9 fasst die Absorptionsspektren für die verwendeten polierten Werkstoffoberflächen zusammen. Die Laserwellenlänge von 355 nm zeigt für die Bearbeitung von Hartmetall, Stahl, Keramik und Silizium eine Absorption im Bereich von 30 bis 60 %, die für eine Strukturierung der ausgewählten Materialien geeignet ist.

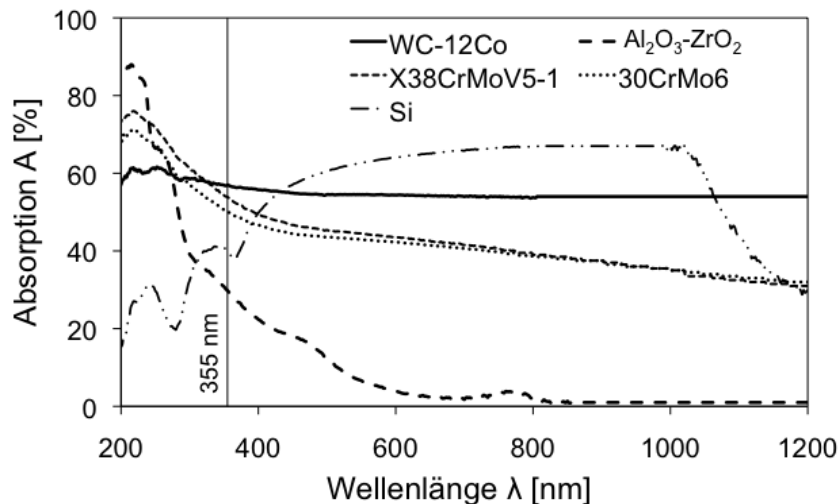


Abbildung 4-9: Absorption verschiedener polierter Materialoberflächen für den Wellenlängenbereich 200 - 1200 nm

#### 4.4 Strahldiagnostik und Werkzeugcharakterisierung

Die Laserstrahltaile und die darin verteilte Intensität bildet das Werkzeug für den Materialabtrag. Daher ist es von großer Bedeutung, diese Strahltaile und ihr Strahlprofil zu kennen. Ideal wird der Laserstrahl mittels fehlerfreier Optiken geführt und fokussiert. Dabei gilt die Annahme, dass die Intensitätsverteilung einer Gauß'schen Glockenkurve folgt. In der Realität weicht das Strahlprofil oft davon ab, weshalb eine Messung der tatsächlichen Größen für die Einhaltung der Toleranzen in der Mikromaterialbearbeitung unumgänglich ist. Für die Fokusanalyse und die Vermessung des Strahlprofils wird das kamerabasierte Strahldiagnostiksystem MicroSpotMonitor der Firma Primes GmbH gewählt. Der MicroSpotMonitor eignet sich zur Vermessung von Strahldurchmessern im Mikrometerbereich bei gepulsten Lasern. Durch eine geeignete Abschwächung ist dies auch bei sehr hohen Leistungsdichten im Fokus möglich. Zur Vermessung der räumlichen Strahlverteilung und Strahlkaustik wird mit einer Sammellinse schrittweise die Strahltaile abgerastert und mit einer speziellen Kamertechnik erfasst. Die Strahlparameter werden bei der Fokusanalyse normenkonform zu ISO 11146 mittels der 86 %-Methode bestimmt [Bah-00, Eic-

04]. Abbildung 4-10 visualisiert den gemessenen Strahlradius  $w$  entlang seiner Strahlachse. Der Divergenzwinkel  $\theta$  beträgt  $210,1^\circ$  und die Rayleighlänge  $z_R$  liegt bei  $27\ \mu\text{m}$ . Der minimale Fokusradius in der Strahltaile (Position  $z = 0\ \text{mm}$ ) wurde mit  $d_F = 5,64\ \mu\text{m}$  ermittelt.

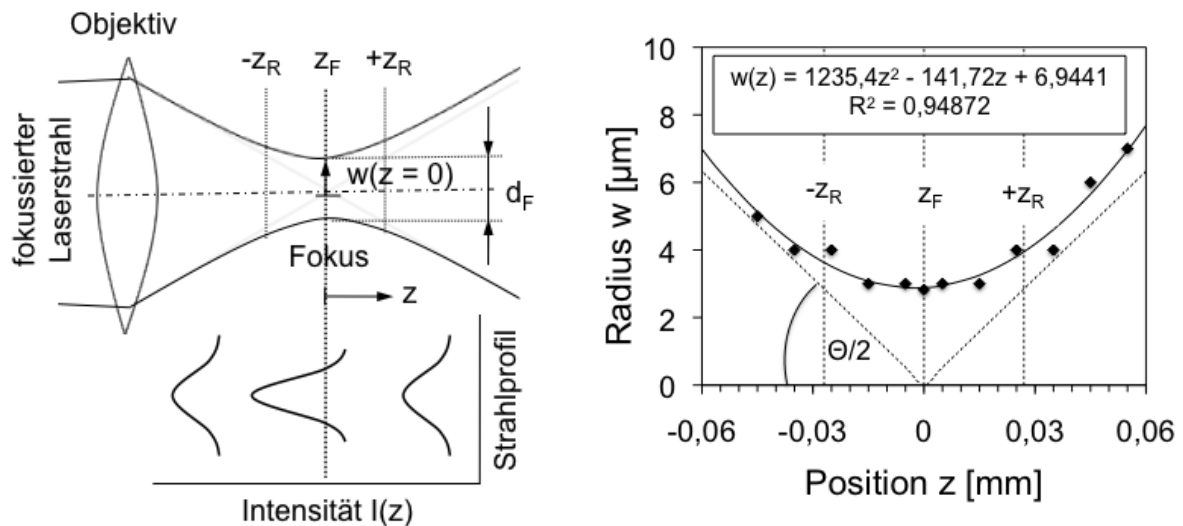


Abbildung 4-10: Strahlkaustik und -profil in Abhängigkeit von der  $z$ -Position bei konstanter mittlerer Leistung  $P_{av}$  (links), gemessener Fokusradius entlang der Strahlachse mit Primes MicroSpotMonitor, 86 %-Methode (rechts)

Des Weiteren wird die Verteilung der Intensität im Strahlquerschnitt charakterisiert. Abbildung 4-11 zeigt die Strahlprofilmessung entlang der Laserachse  $z$  gemäß Abbildung 4-10 (links). Deutlich zu erkennen ist, dass außerhalb des Fokusbereichs das Strahlprofil keine Gauß'sche Verteilung aufweist. Solche Unregelmäßigkeiten können im Laser selbst entstehen, im nachgeschalteten Strahlengang oder durch Justagefehler. Es kommt so zum Beispiel zu Astigmatismen und Beugungsfehlern. Die Korrektur ist bei Aufbauten mit vielen Optiken sehr aufwändig und führt oft bestenfalls zu einer Verbesserung der Verteilung aber nicht zur idealen Gaußverteilung. Oberhalb des Fokusbereichs  $z = 0\ \text{mm}$  weist das Strahlprofil größere Abweichungen von der Gaußverteilung auf als unterhalb. Daraus lässt sich für den verwendeten Aufbau ableiten, dass eine Fokuspositionierung oberhalb oder auf der Oberfläche eine Fokuseinstellung mit nahezu Gauß'schem Strahlprofil begünstigt.



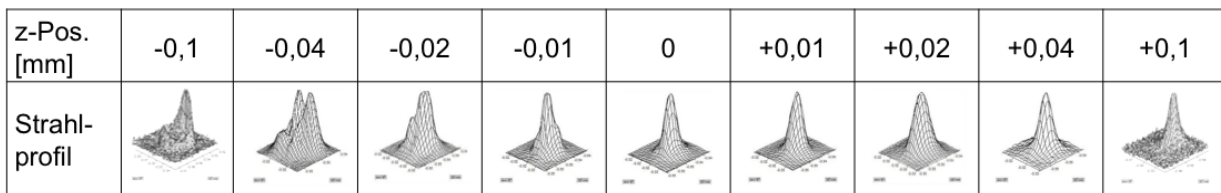


Abbildung 4-11: Gemessenes Strahlprofil an var. Strahlpositionen entlang der Laserachse z (86 %-Methode, LaserDiagnoseSoftware PRIMES), Intensitätsverteilung für  $P_{av} = 40 \text{ mW}$

Abbildung 4-12 fasst die nach der 86 %-Methode gemessenen Strahlparametergrößen zusammen und verdeutlicht die Strahlsymmetrie ausgehend von der gemessenen Fokusposition  $z_F = 0 \text{ mm}$ . Der Arbeitsbereich  $z_A$  liegt demzufolge bei  $z_A \leq z_F \pm 20 \mu\text{m}$  im nahezu parallelen Strahlverlauf in der Strahltaile.

Strahlparameter		
Divergenzwinkel $\Theta$	[°]	210,1
Beugungsmaßzahl $M^2$		2,62
Fokusbereich $d_F$	[ $\mu\text{m}$ ]	5,64
Rayleighlänge $z_R$	[ $\mu\text{m}$ ]	27,0

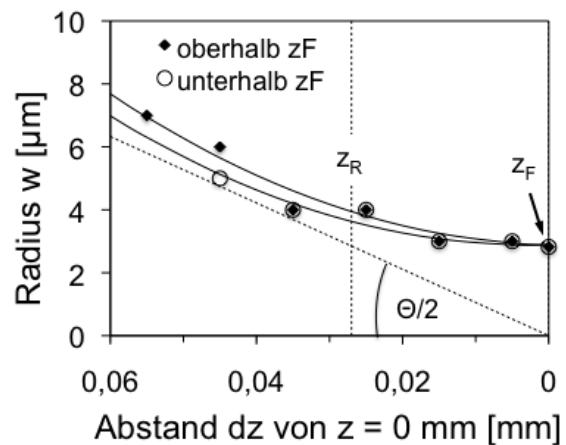


Abbildung 4-12: Veranschaulichung der Strahlsymmetrie des vermessenen Strahlprofils ausgehend von der ermittelten Fokusposition  $z = 0 \text{ mm} = z_F$

## 4.5 Statistischen Versuchsplanung - Design of Experiment (DoE)

Die Methode der systematischen Versuchsplanung ermöglicht eine Reduzierung von Aufwand und Kosten, ohne dabei die Qualität der Versuche zu schmälern. Klein [Kle-04] fasst das Design of Experiments (DoE) Konzept in fünf Stufen von der Problemanalyse bis hin zum Bestätigungsexperiment gemäß Abbildung 4-13 zusammen. Dabei nimmt die Versuchsplanung mit der Wahl eines geeigneten Versuchsplans und die statistische Auswertung eine zentrale Rolle ein.

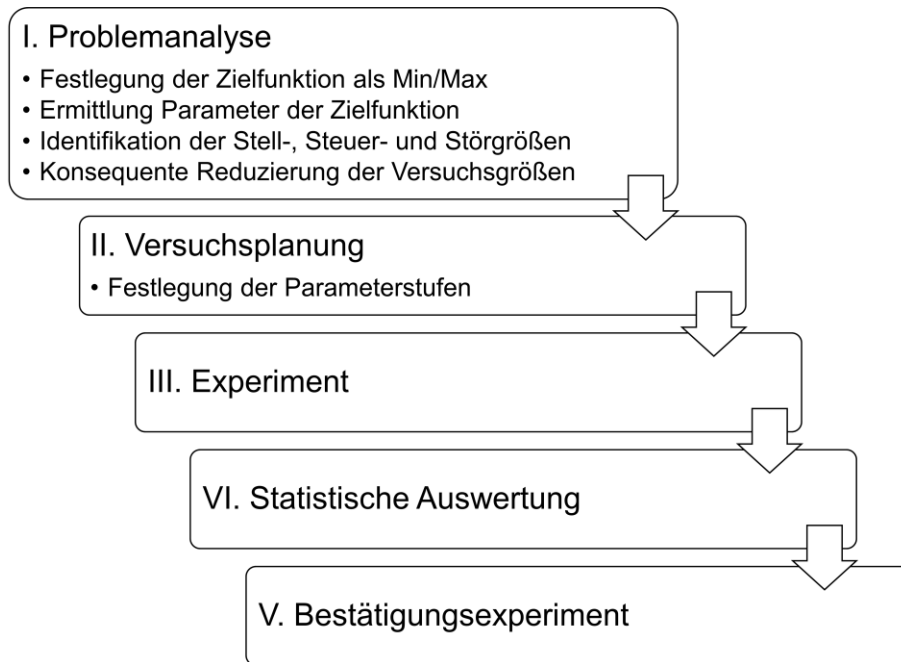


Abbildung 4-13: Design of Experiment (DoE) Konzept in 5 Stufen [Kle-04]

#### 4.5.1 Auswahl der Versuchspläne

Um bei vergleichsweise geringem Versuchsaufwand für nichtlineare Zusammenhänge dennoch einen möglichst hohen Erkenntnisgewinn zu erhalten, kommt das Response Surface Design (RSD), das auf einem zentral zusammengesetzten Versuchsplan basiert, zum Einsatz. Damit wird die qualitative Abhängigkeit einer oder mehrerer Zielgrößen von einigen wenigen Faktoren im Detail bestimmt. Für drei Faktoren entspricht der Versuchsplan einem Würfel, dem ein Zentrumspunkt und jeweils 2 Sternpunkte pro Faktor hinzugefügt werden (Abbildung 4-14). Damit ergibt sich ein Versuchsplan mit jeweils 5 Stufen pro Faktor:  $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+\alpha$  [Kle-06].

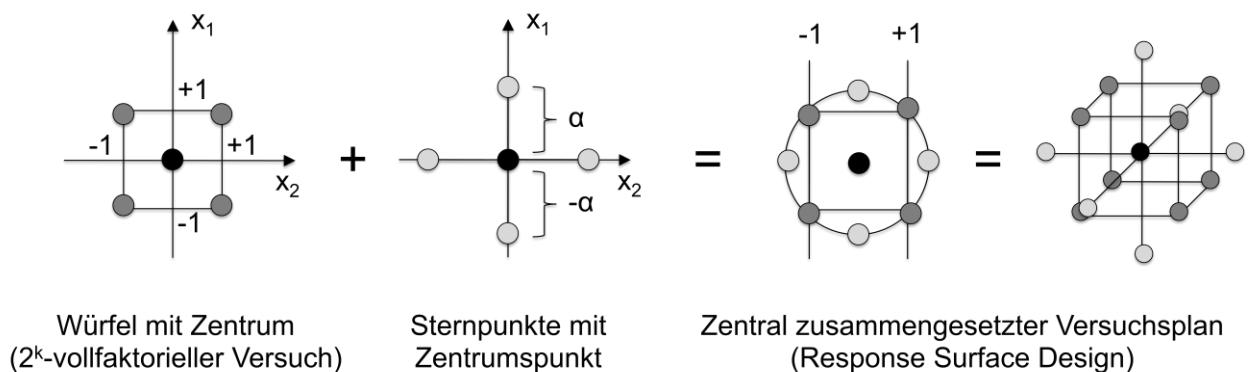


Abbildung 4-14: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan [Fra-10]

Während die faktoriellen Punkte im Abstand von  $\pm 1$  vom Zentrum liegen, werden die Sternpunkte im Abstand  $\alpha$  vom Zentrum wie folgt festgelegt:

Drehbar: 
$$\alpha^2 = \sqrt{2^k} \Rightarrow \alpha = \sqrt{\sqrt{2^k}}$$
 Formel 4-3

Für  $\alpha = 1,682$  ist der Versuchsplan drehbar. Damit sich die Schätzwerte der Koeffizienten im Modell nicht gegenseitig beeinflussen wird ergänzend der Einsatz orthogonaler Versuchspläne angestrebt. Für einen drehbaren und näherungsweise orthogonalen Versuchsplan gilt folgende Gleichung zur Ermittlung der Anzahl N der Einzelversuche:

Versuchsanzahl: 
$$N = 2^k + 2 \cdot k + 2 \cdot n_0$$
 Formel 4-4

Der Versuchsumfang N errechnet sich zu  $N = 18$  für  $k = 3$  Faktoren und  $n_0 = 4$  Realisierungen des Zentrums. Tabelle 4-2 stellt den Aufbau dieses zentral zusammengesetzten Versuchsplans dar.

*Tabelle 4-2: Aufbau des zentral zusammengesetzten Versuchsplans (RSD) für  $k = 3$  Faktoren,  $n_0 = 4$  Realisierungen des Zentrums [Kle-06]*

sys. Nr.	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Erläuterungen
1	-1	-1	-1	„Würfel“ vollständig faktoriell
2	-1	-1	1	
3	-1	1	-1	
4	-1	1	1	
5	1	-1	-1	
6	1	-1	1	
7	1	1	-1	
8	1	1	1	
9	- $\alpha$	0	0	„Stern“ jeder Faktor getrennt
10	+ $\alpha$	0	0	
11	0	- $\alpha$	0	
12	0	+ $\alpha$	0	
13	0	0	- $\alpha$	
14	0	0	+ $\alpha$	
15	0	0	0	Zentrum $n_0$ mal (hier $n_0 = 4$ )
16	0	0	0	
17	0	0	0	
18	0	0	0	

### 4.5.2 Statistische Datenanalyse

Die Regressionsanalyse hält quantitativ Beziehungen zwischen Variablen fest. Dabei wird zu einer Datenpunkt Wolke eine Regressionskurve gesucht, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft. Die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten soll hier minimal sein. Die Gleichung der multiplen Regression lautet:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \beta_6 x_1 x_3 + \beta_7 x_2^2 + \beta_8 x_2 x_3 + \beta_9 x_3^2 \quad \text{Formel 4-5}$$

Die Koeffizienten  $\beta_i$  der linearen Terme  $x_1, x_2$  bis  $x_k$  stehen für die Effekte der Faktoren A, B bis K. Die Koeffizienten der quadratischen Terme beschreiben einerseits den quadratischen Effekt der Faktoren aber auch die Wechselwirkung der einzelnen Faktoren [Kle-06].

Um die Güte der Anpassung zu untersuchen, wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ermittelt. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{adj}$  berücksichtigt zusätzlich die Anzahl der Effekte und Wechselwirkungen [Kle-06]. Mittels einer Signifikanzanalyse wird die tatsächliche Erfassung der Wirkungen im Modell untersucht. Die Modelluntersuchung (linear, linear inklusive Wechselwirkung oder quadratisch) wird mit Unterstützung der Software STATGRAPHICS® Centurion durchgeführt und das Modell, welches die Versuchspunkte mit den gemessenen Rauheiten  $R_z$  am besten beschreibt, ausgewählt. Der sogenannte F-Test ermittelt, ob der berechnete Zusammenhang in der Grundgesamtheit gültig ist. In der Praxis wird der empirische F-Wert betrachtet. Wenn der F-Wert größer 10 ist (Faustformel), so bedeutet das, dass der spezifizierte Modellzusammenhang verwendbar ist und nicht nur zufällige Zusammenhänge vorliegen [Fhj-13]. Wie genau sich Rauheitswerte voraussagen lassen, beschreibt zudem der Faktor PRESS, der hier minimal sein soll.

### 4.5.3 Response Surface Methode (RSM)

Die Response Surface Methode (RSM) ist eine Sammlung statistischer und mathematischer Methoden zur Entwicklung, Verbesserung und Optimierung von Prozessen. Mit ihrer Hilfe wird der Zusammenhang zwischen der Zielgröße eines zu untersuchenden Prozesses und deren Einflussgrößen untersucht und Effekte und Wechselwirkungen berechnet [Mye-95]. Die RSM bedient sich der statistischen Versuchsplanung (DoE), der statistischen Datenanalyse, der Regressionsmethoden und der Operations Research Methoden (OR), die wie in Abbildung 4-15 schematisch dargestellt nacheinander durchlaufen werden.

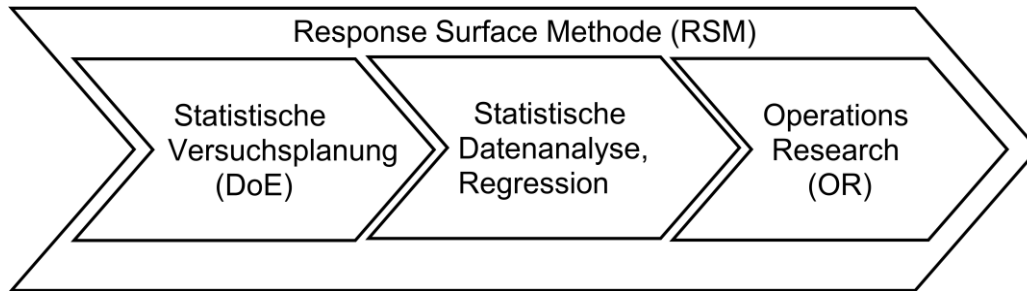


Abbildung 4-15: Vorgehensschema der Response Surface Methode (RSM)

Die Versuchspläne werden systematisch mittels DoE erarbeitet. Die Auswertung erfolgt mittels der Regressionsmethode, die die Beziehung zwischen der Zielgröße und den Einflussfaktoren aus den Ergebnissen berechnet. Die OR Methode wird abschließend eingesetzt, um die optimalen Einstellungen unter Beachtung aller Nebenbedingungen für den Prozess zu finden. Dabei werden die lokalen Minima dieser Funktion mittels der nichtlinearen Optimierung, Lagrange Multiplikatoren und Kuhn Tucker Bedingungen für die zu untersuchenden Parameter berechnet [Sch-13].

#### 4.6 Optische Methode zur Ermittlung der Fokuslage mittels „line test“

Um die Fokuslage auf der Oberfläche zu bestimmen, werden Bahnen mit variierenden z-Positionen der Fokuslage von oberhalb zu unterhalb der Materialoberfläche abgetragen (sogenannter „line test“). So entsteht ein symmetrisches Abtragbild, welches optisch mit einem Lichtmikroskop und einer Kamera bewertet wird. Abbildung 4-16 zeigt in der Mitte schematisch die abgetragenen Bahnen zur Ermittlung des Arbeitsbereichs und rechts das tatsächliche Abtragbild für WC-12Co. Die mit dieser Methode optisch gefundene Fokuslage  $z_{OF}$ , zu der das Abtragbild symmetrisch ist, wird im weiteren Verlauf als Fokuslage  $z = 0$  definiert.

Diese Methode der Fokusbestimmung ist besonders für Oberflächen, wie die der weißen  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  Proben oder transparenter Glasproben erschwert, da die Linien nicht ausreichend Kontrast zur umliegenden Oberfläche aufweisen und mit dem Lichtmikroskop nicht detektiert werden können. Eine partielle Beschichtung der Oberfläche bietet hier Abhilfe zur optischen Fokusermittlung mit dieser Methode.

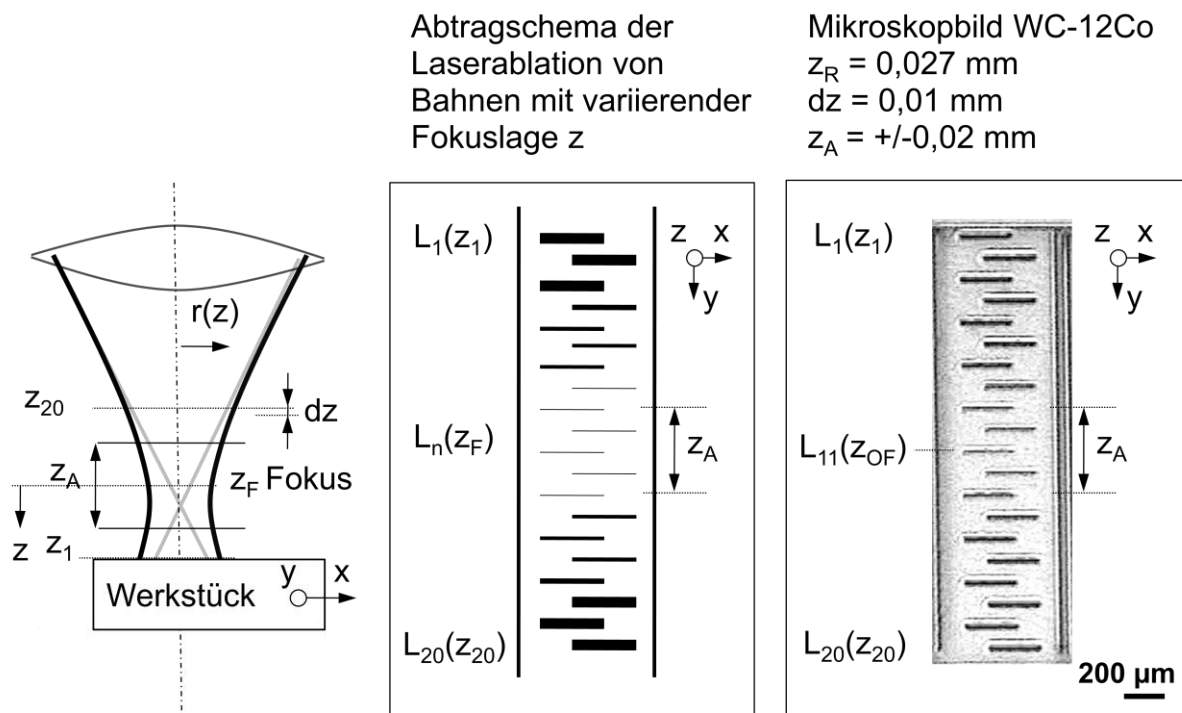


Abbildung 4-16: Schema zur Bestimmung der Fokusslage  $z_F = z_{OF}$  und des Arbeitsbereichs  $z_A$  (links), Lichtmikroskopaufnahme ablatierter Bahnen mit var.  $z$ -Position zur Fokussuche für WC-12Co,  $P_{av} = 40$  mW,  $PA = 5$   $\mu$ m (rechts)

## 4.7 Prozessentwicklung zur Mikrolaserablation

Die qualitativ hochwertige Fertigung von Kavitäten mittels Mikrolaserablation ist nur in sehr kleinen Toleranzgrenzen möglich, die in der Prozessentwicklung berücksichtigt werden müssen. Bestandteil ist die präzise Werkstücksausrichtung zum einfallenden Laserstrahl, die präzise Fokuspositionierung auf der Werkstückoberfläche, die Analyse optimaler Parameterkombinationen und Bearbeitungsstrategien sowie die Qualitätskontrolle und idealerweise die Prozessautomatisierung und -regelung. Die Mikrolaserablation von Kavitäten mit defektfreien, glatten Oberflächen, ist mittels Sublimationsabtrag nur für bestimmte Parameterkombinationen erzielbar, die für jedes Material individuell gefunden werden müssen. Um das Abtragen mittels Sublimation zu garantieren, muss zunächst eine Prozessfensteranalyse erfolgen, welche die Prozessvorbereitung und Prozessparameterfindung beinhaltet. Die Prozessvorbereitung beschäftigt sich mit dem Werkstück (Probentopographie, Absorptionseigenschaften), dem Werkzeug (Strahldiagnostik) und der Fokusslage für den anzustrebenden Arbeitsbereich. Anschließend werden die Prozessparameter, die einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenqualität (Zielgröße) zeigen, ermittelt. Für den Formenbau aus WC-12Co wird eine

Parameterkombination gesucht, die eine Oberflächenrauheit  $R_z < 1 \mu\text{m}$  in der Kavität ermöglicht.

Die entwickelte Methode zur Bestimmung von optimalen Prozessparameterkombinationen unterteilt sich in 4 Teilschritte. Von Schritt zu Schritt wird ein zu variierender Parameter hinzugezogen und zwischen den Schritten die Ergebnisgröße festgehalten um sinnvolle Ableitungen der weiteren Parameterfenster vorzunehmen (Abbildung 4-17). Dadurch wird schrittweise der Einfluss der Parameter erfasst.

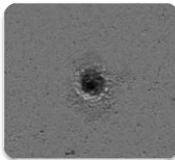
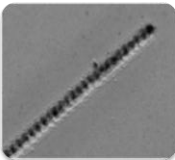
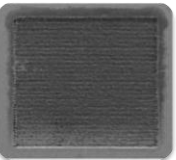
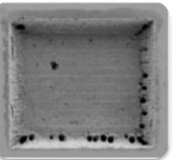
Schritt	1	2	3	4
Struktur	Einzelimpuls	Bahn	Fläche	3D
REM-Aufnahme				
Parameter	- Material	- Material	- Material	- Material
	- $P_{av}$	- $P_{av}$	- $P_{av}$	- $P_{av}$
	- z	- z	- z	- z
		- PA	- PA	- PA
			- BA	- BA
				- dz
				- n
Ergebnis	$d_{eff}$	Bahnbreite	Ebenentiefe	Gesamttiefe

Abbildung 4-17: Fertigungsparametersuche und prinzipieller Ablauf in vier Teilschritten zur Parameterfindung beim Abtragprozess

Zunächst wird im ersten Schritt der Einzelimpulsabtrag untersucht. Der Einzelimpulsabtragsdurchmesser und das Schmelzeverhalten des Materials um den Einzelimpakt herum werden für variierende mittlere Leistungen und Fokusabstände zur Oberfläche festgehalten. Mit dieser Erkenntnis wird für eine mittlere Leistung, die über der materialspezifischen Schwellleistung für die Sublimation liegt, der Pulsabstand und -überlapp für die Bahnablation abgeleitet. Im zweiten Schritt werden die Pulsabstände und die Fokusslage variiert und die Bahnbreite und -tiefe vermessen. Ziel ist hier, einen gleichmäßigen Abtrag innerhalb einer gleichmäßig ausgebildeten Nut zu erreichen. Im dritten Schritt wird der Bahnabstand bzw. -überlapp für die Generierung eines flächigen Abtrags hinzugezogen. Die erzielten minimalen Oberflächenrauheiten bei maximalen Abtragtiefen pro Fläche werden abschließend für die Bearbeitung

tieferer Strukturen und Kavitäten genutzt und die Nachführung der Fokusposition auf den Grund der Kavität erarbeitet.

Die signifikanten Prozessparameter Laserleistung  $P_{av}$ , Puls- PA und Bahnabstand BA werden kombiniert und gemäß der Zielgrößen bewertet. Die wirtschaftliche Fertigung fordert hier die maximale Oberflächenqualität (Defektfreiheit bei minimaler Oberflächenrauheit) bei maximaler Abtragtiefe und minimaler Bearbeitungszeit. Um das Abtragverhalten neuer Materialien mit unbekanntem Laser-Material-Wechselwirkungsverhalten zu untersuchen wird ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgestellt, mit dem Ziel jede Parameterkombination zu untersuchen. Für ein neues Material wird ein besonders großes Prozessfenster untersucht, um mehrere Optima und Nebenoptima zu lokalisieren. Die drei Faktoren werden wie in Tabelle 4-3 dargestellt in bis zu 10 Stufen variiert.

*Tabelle 4-3: Steuergrößen und ihre Stufenzuordnung für DoE*

Faktor	Steuergröße	Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	$P_{av}$ [mW]		20	40	60							
B	PA [ $\mu\text{m}$ ]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C	BA [ $\mu\text{m}$ ]		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Wird die Optimierung mehrerer Zielgrößen angestrebt, wie beispielsweise der besten Rauheit Rz und der größten Abtragrate, so werden mittels Operations Research (OR) zwei Zielfunktionen nacheinander bearbeitet. Zwei Ziele können zueinander komplementär, konkurrierend (konträr) oder neutral sein. In diesem Fall handelt es sich um konkurrierende Ziele, bei welchen ein Zielkonflikt vorliegt, indem mit der Verbesserung des Zielerreichungsgrades des einen Ziels (Rauheit Rz) sich derjenige des anderen Ziels (Abtragtiefe c) verschlechtert oder umgekehrt. Das bedeutet, dass es für gewöhnlich keine Lösung gibt, die für beide Zielgrößen gleichzeitig ein Optimum darstellt. Eine mögliche Vorgehensweise ist hier die lexikographische Ordnung von Zielen. Dabei werden die Ziele nach dem wichtigsten, zweitwichtigsten etc. geordnet. Die Vorgehensweise sieht zunächst die Optimierung des Problems ausschließlich nach dem ersten Ziel (minimiere Rz). Anschließend wird ausschließlich das zweite Ziel optimiert (maximiere c). Die Vorgehensweise berücksichtigt untergeordnete Ziele nur dann, wenn für die übergeordneten Ziele Lösungen vorliegen [Mye-95, Kle-06].

Für jede einstellbare mittlere Leistung wird eine Versuchsmatrix, wie in Abbildung 4-18 abgebildet, gefertigt und hinsichtlich Rauheit und Tiefe ausgewertet. Bei



kleinen Puls- und Bahnabständen steigt der Energieeintrag pro Fläche deutlich an.

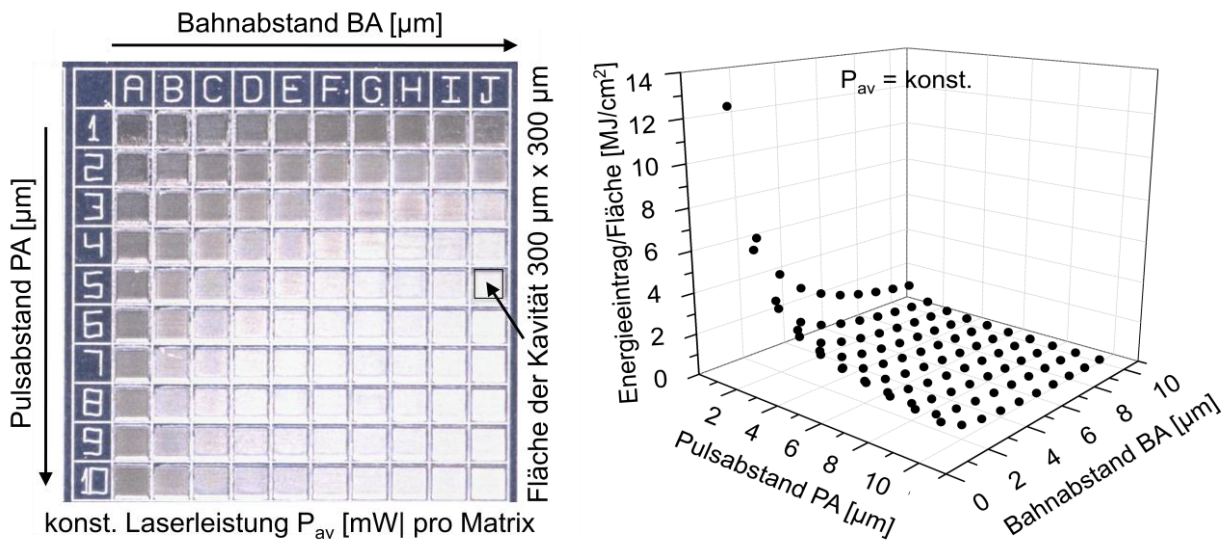


Abbildung 4-18: Mikroskopaufnahme einer WC-12Co Versuchsmatrix für  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$  (links), Energieeintrag pro Fläche in Abhängigkeit von PA und BA bei konst.  $P_{av}$  (rechts)

Die Selektion der optimalen Parameterkombinationen erfolgt anschließend in drei Schritten (Abbildung 4-19).

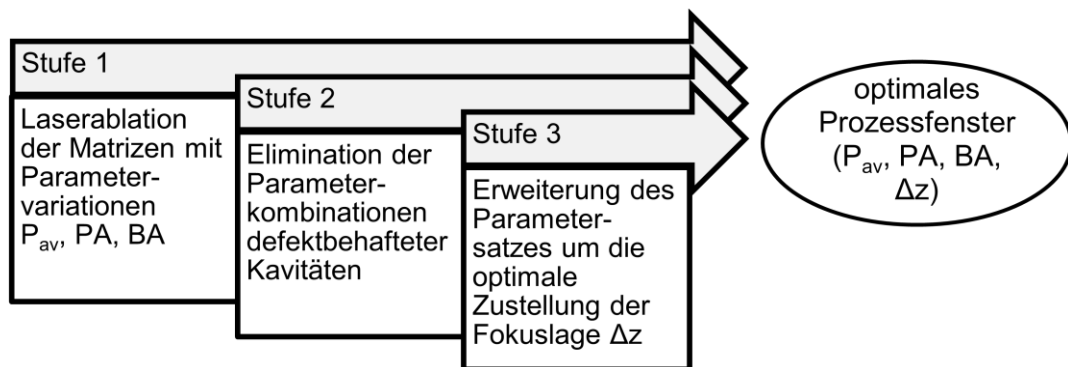


Abbildung 4-19: Lexikographische Ordnung von Zielen zur Bestimmung des optimalen Prozessfensters

Im ersten Schritt wird die Parametermatrix ablatiert und zur statistischen Absicherung der Versuchsergebnisse mindestens zwei Mal auf der selben Probe wiederholt. Anschließend werden die Oberflächenrauheit und die Abtragtiefe mit dem Konfokalmikroskop Nanofocus  $\mu$ surf analysiert. Parameterkombinationen die zu defektbehafteten Kavitäten mit Löchern im Grund der Kavität führen, werden in Stufe 2 eliminiert. Die Parameterkombinationen, die im Fall der WC-12Co Proben eine Oberflächenqualität  $Rz < 1 \text{ }\mu\text{m}$  für die Bearbeitung nur einer

Ebene erreichen, werden anschließend in einem dritten Schritt mit  $n$  Ebenen in die Tiefe gearbeitet, indem die Fokuszustellung  $dz$  mittels einer Abstandsmessung ermittelt wird. So wird schrittweise ein Verständnis für das materialspezifische Abtragverhalten aufgebaut.

Alternativ kann mit deutlich geringerem Versuchsaufwand die statistische Versuchsplanung schnell zu geeigneten Fertigungsparameterkombinationen führen, weshalb zusätzlich eine Parameterfindung im Schnelltest mittels der Response Surface Methode (RSM) entwickelt wird.

Anschließend widmet sich die Arbeit der Untersuchung von Entstehungsmechanismen unerwünschter Löcher. In einer Einflussanalyse werden signifikante Größen hervorgehoben und näher untersucht. Zusammenfassend werden Maßnahmen zur Vorbeugung der Entstehung von Löchern abgeleitet.

#### **4.8 Vorgehen bei der Entwicklung der akustischen Prozesskontrolle**

Der Laserabtragsprozess kann nur einwandfrei durchgeführt werden, wenn die Fokusposition vor der Bearbeitung präzise ermittelt wurde. Beim Laserabtragen sollen Prozessemissionen genutzt werden, um Rückschlüsse aus dem Prozess zu ziehen. Einstellungen der Prozessparameter können so überwacht oder geregelt werden. Die optische Fokussuche, welche eine optische Bewertung des Abtraggildes vorsieht, gerät bei der Anwendung auf stark variierenden Materialspektren mit verschiedensten Oberflächeneigenschaften (reflektierend, absorbierend, transmittierend) an ihre Grenzen. Der optische Messstrahl wird gerade bei transparenten Proben transmittiert und generiert Messfehler. Bei stark variierenden Oberflächenbeschaffenheiten muss die Beleuchtung stets angepasst werden. Des Weiteren birgt die subjektive Beurteilung des Abtraggildes ein hohes Fehlerpotenzial.

Die Erfassung des Verhaltens des Prozessleuchtens und/oder der akustischen Emission bietet zusätzliche Entscheidungshilfen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein geeigneter Versuchsstand zur Erfassung der Prozessemissionen aufgebaut und das Verhalten der Emissionen analysiert. Um eine subjektive Bewertung der Emissionen zu erzielen werden die erfassten Daten automatisiert ausgewertet und prozessrelevante einheitliche Kriterien identifiziert. Anschließend wird nach klaren Definitionen und Kriterien eine automatisierte Fokuspositionierung und Leistungsregelung mit Hilfe der AE entwickelt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Prozessfensteranalyse

#### 5.1.1 Einzelpulsabtrag

Jedes Material besitzt seine ganz spezifische Material-Laser-Wechselwirkung, die sich im unterschiedlichen Abtragverhalten niederschlägt. Das Abtragverhalten bezüglich Schmelzebildung wird empirisch anhand von ablatierten Einzelpulsabträgen bei einer Fluenz  $H$  von  $160,1 \text{ J/cm}^2$  im Fokus  $z_F$  untersucht. Eine ausgeprägte Schmelzezone bei dieser Fluenz dient als Indikator für die spätere Wahl der Laserleistungseinstellungen. Ist die Schmelze stark ausgeprägt, so wird mit kleineren mittleren Leistungen gearbeitet, um diese zu minimieren. Gerade im Werkzeugbau sind solche Schmelzebereiche unerwünscht, da diese eine geringere Festigkeit aufweisen und zur Abplatzung neigen. Abbildung 5-1 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Einzelpulsabtrags unterschiedlicher Materialien. Das Abtragsbild der  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Keramik basiert auf fünf Pulsen, da hier der Einzelpulsabtrag keine deutlichen Ausprägungen aufweist. Die Stähle X38CrMoV5-1, 30CrMoV6, das Hartmetall WC-12Co, das Kalknatronglas  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  und das Silizium zeigen in den REM-Aufnahmen eine erstarrte Schmelzezone. Nur die Mischkeramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  bildet keine ausgeprägte Schmelzezone aus.

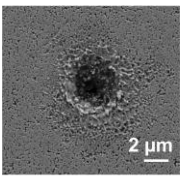
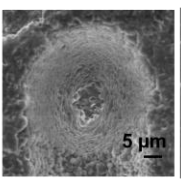
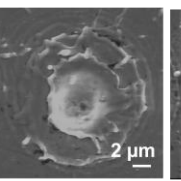
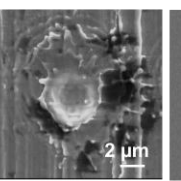
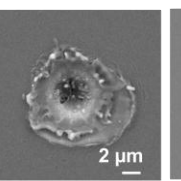
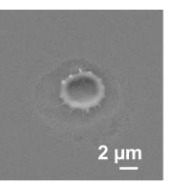
Material	WC-12Co	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	30CrMo6	X38CrMoV5-1	Si	Glas
						
Abtrag	Einzelpuls	5 Pulse	Einzelpuls	Einzelpuls	Einzelpuls	Einzelpuls

Abbildung 5-1: REM-Aufnahmen des Einzelpulsabtrags für verschiedene Materialien bei einer Fluenz  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $d_F = 5,64 \mu\text{m}$  in  $z_F$

Die materialspezifische Schwellintensität ( $I_S$ ) wird empirisch ermittelt, indem Einzelpulsabträge für steigende mittlere Leistungen bewertet werden. Nach Überschreiten von  $I_S$  sind deutliche Abtragkrater zu erkennen. In Abbildung 5-2 sind REM-Aufnahmen vom Einzelpulsabtrag bei variierender mittlerer Laserleistung  $P_{av}$  in der Fokusposition  $z = 0 \text{ mm} = z_F$  dargestellt.

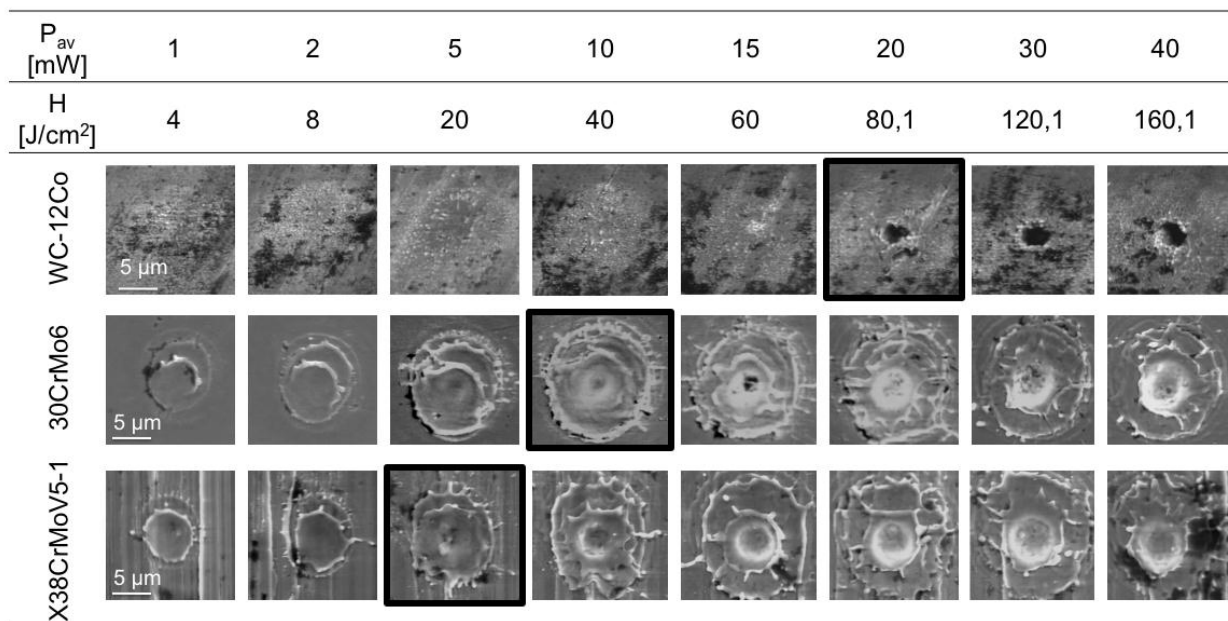


Abbildung 5-2: REM-Aufnahmen des Einzelpulsabtrags bei var. mittlerer Laserleistung  $P_{av}$  und konst. Fokusposition  $z = 0 \text{ mm} = z_F$ ; Empirische Ermittlung des materialspezifischen effektiven Bearbeitungsdurchmessers  $d_{eff}$  und der Schwellintensität für das Abtragen  $I_S$  (schwarz markiert)

Deutlich zu erkennen ist die ausgeprägte Schmelzkrone bei der Bearbeitung der Stähle. Das Hartmetall WC-12Co weist einen erheblich kleineren Schmelzerand auf.  $I_S$  wird für die Bearbeitung im Fokus auf WC-12Co bei 20 mW ( $H = 80,1 \text{ J/cm}^2$ ), auf 30CrMo6 bei 10 mW ( $H = 40 \text{ J/cm}^2$ ) und auf X38CrMoV5-1 bei 5 mW ( $H = 20 \text{ J/cm}^2$ ) überschritten. Tabelle 5-1 fasst die materialspezifischen Schwellintensitäten und effektiven Abtragdurchmesser zusammen.

Tabelle 5-1: Materialspezifische Schwellintensität  $I_S$  für  $z = 0 = z_F$

Material	$P_{av}$ [mW]	H [J/cm <sup>2</sup> ]	$d_{eff}$ [μm]	$I_0$ [mW/μm <sup>2</sup> ]	$I_S$ [mW/μm <sup>2</sup> ]
WC-12Co	20	80,1	3,84	1,6	0,63
30CrMo6	10	40	1,98	0,8	0,63
X38CrMoV5-1	5	20	1,72	0,4	0,33

In Abbildung 5-3 sind die empirisch ermittelten effektiven Abtragdurchmesser  $d_{eff}$  für variierende mittlere Leistungen aufgetragen. Mit steigender mittlerer Leistung bis zu 30 mW nimmt der Abtragdurchmesser zu und steigt bis 60 mW nicht mehr maßgeblich an.

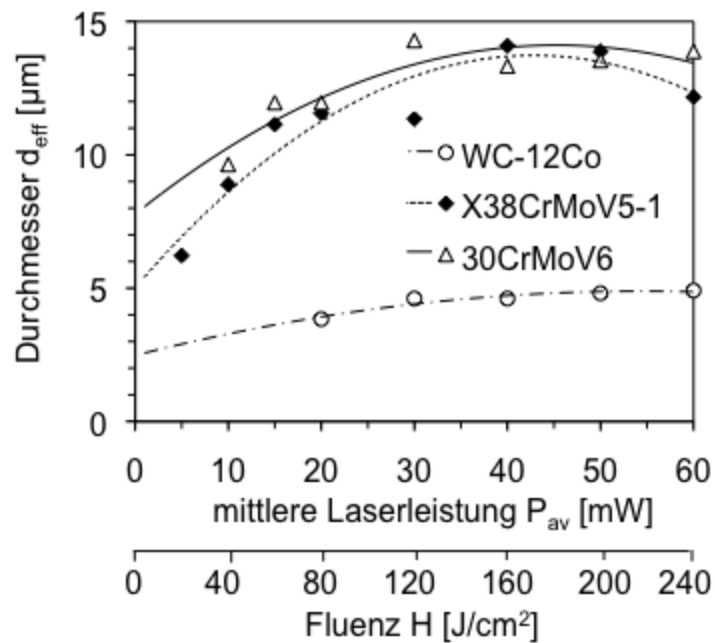


Abbildung 5-3: Empirisch ermittelter effektiver Bearbeitungsdurchmesser  $d_{eff}$  in Abhängigkeit von der mittleren Laserleistung  $P_{av}$  bzw. Fluenz  $H$ , Laserstrahlfokusposition auf der Oberfläche  $z = 0$  mm

Oberhalb der materialspezifischen Schwellintensität wird anschließend das Einzelpulsabtragverhalten bei Variation der Fokusslage untersucht. Abbildung 5-4 verdeutlicht den Zusammenhang der effektiven Abtragradien in Abhängigkeit von der Fokusposition relativ zur Oberfläche. Für alle untersuchten Materialien nimmt der Abtradius bei einer defokussierten Bearbeitung mit  $z > z_F + 20 \mu m$  bzw.  $z < z_F - 20 \mu m$  deutlich zu.

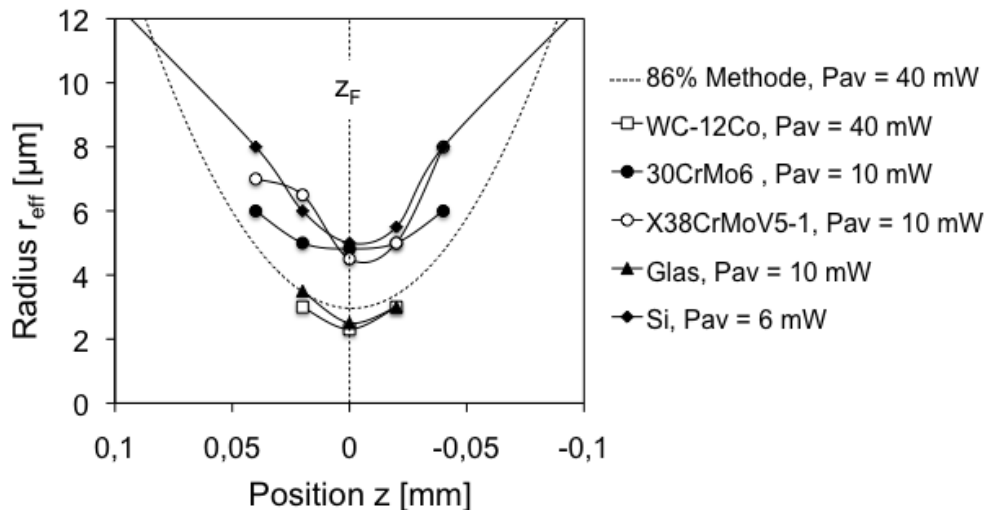


Abbildung 5-4: Gemessene effektive Abtragradien  $r_{\text{eff}}$  in Abhängigkeit von der z-Position der Fokusebene zur Materialoberfläche

Abbildung 5-5 zeigt die REM-Aufnahmen für das Abtragverhalten der Einzelpulse für variierende z-Positionen. Am Beispiel von WC-12Co wird in der z-Position  $z = +0,04$  mm (Strahlradius  $w(z = +0,04 \text{ mm}) = 3,9 \mu\text{m}$ ) bei einer eingestellten mittleren Leistung  $P_{\text{av}} = 40$  mW die Energiedichte von  $H = 83,7 \text{ J/cm}^2$  erreicht, so dass hier die Abtragschwelle für WC-12Co ( $H = 80,1 \text{ J/cm}^2$ ) überschritten wird und ein Einzelpulsabtrag zu erkennen ist. Im Fall von X38CrMoV5-1 wird in der z-Position  $z = +0,04$  mm bei einer eingestellten mittleren Leistung  $P_{\text{av}} = 10$  mW die Energiedichte von  $H = 20,9 \text{ J/cm}^2$  erreicht, so dass die Abtragschwelle für X38CrMoV5-1 ( $H = 20 \text{ J/cm}^2$ ) überschritten wird und ein Einzelpulsabtrag zu erkennen ist. Außerhalb des Arbeitsbereichs  $z_A = z_F \pm 20 \mu\text{m}$  reichen die Energiedichten für einen Abtrag nicht aus und die Oberfläche wird verstärkt geschmolzen. Bei der Mischkeramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  ist der Einzelpulsabtrag nicht nachweisbar. Zur Generierung einer Bahn, wird als nächster Schritt basierend auf dem Einzelpulsdurchmesser der Pulsabstand bzw. -überlapp ermittelt.

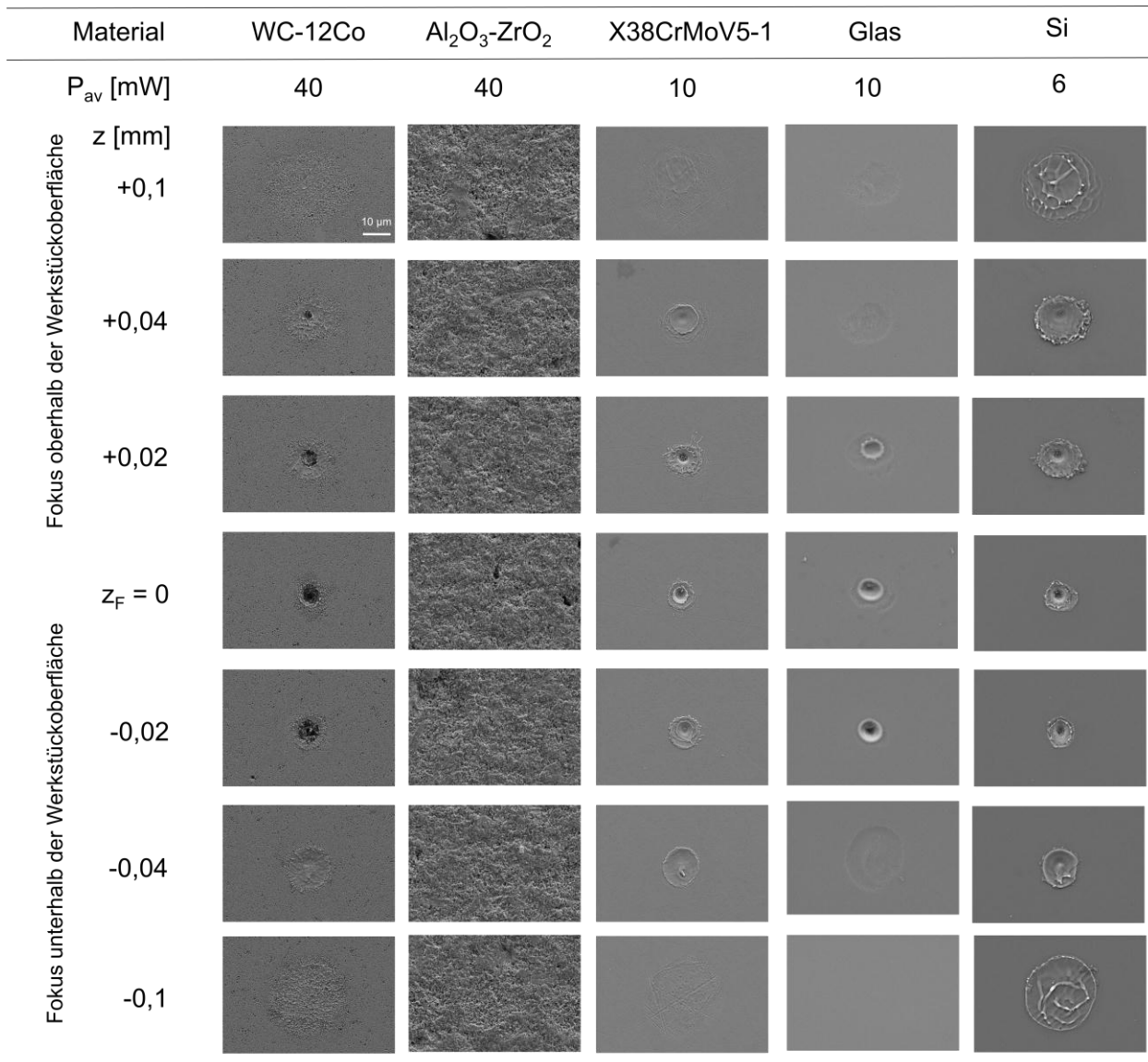


Abbildung 5-5: REM-Aufnahmen des Einzelpulsabtrags bei variierender Fokuslage und materialspezifisch gewählter mittlerer Laserleistung  $P_{av}$

## Fazit

Die geeignete Wahl der Laserleistungseinstellung lässt sich aus dem Einzelpulsabtrag ableiten. Für die Bearbeitung von Stählen, Glas und Silizium werden mittlere Leistungen zwischen 5 mW und 10 mW ( $H = 20 - 40 \text{ J/cm}^2$ ) empfohlen, da sich für höhere Leistungen eine ausgeprägte Schmelzkrone bildet. Das Hartmetall WC-12Co zeigt auch für deutlich höhere Leistungen ( $P_{av} = 60 \text{ mW}$  bzw.  $H = 305,6 \text{ J/cm}^2$ ) nahezu keine Schmelzzone.

Im Arbeitsbereich  $z_A \leq z_F \pm 20 \mu\text{m}$  zeigen die untersuchten Materialien die tiefsten Abtragkrater und kleinsten effektiven Abtragdurchmesser bei minimaler Schmelzebildung und erfüllen somit die Anforderungen zur Wahl der

Parametereinstellungen. Deshalb wird der Bereich  $z \leq z_F \pm 20 \mu\text{m}$  als Zielgröße für die Fokuspositionierung herangezogen.

### 5.1.2 Bahnabtrag

Für die Bearbeitung von Bahnen muss ein geeigneter Pulsüberlapp gefunden werden. Der Einzelpulsabtrag von WC-12Co weist einen sehr geringen Schmelzbereich um den Impakt auf. Abbildung 5-6 (rechts) zeigt einen Einzelpulsabtrag in WC-12Co bei  $P_{av} = 40 \text{ mW}$  ( $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ) mit den Durchmessern  $d_{eff} = 4,61 \mu\text{m}$  und  $d_w = 7,1 \mu\text{m}$ . Wird mit einem Pulsabstand von  $5 \mu\text{m}$  eine Bahn abgetragen, so ergibt sich eine Bahnbreite  $b = 7 \mu\text{m}$ . Die Überlagerung des Einzelpulsabtrags und der generierten Bahn zeigt deutlich, dass der Abtragsdurchmesser des Einzelpulses, der den wärmebeeinflussten Schmelzbereich mit einbezieht, in der Größenordnung der Bahnbreite liegt. Somit kann vom Einzelpulsdurchmesser  $d_w$  die resultierende Bahnbreite  $b$  vorhergesagt werden. Mit der Kenntnis des effektiven Bearbeitungsdurchmessers wird zusätzlich der Pulsüberlapp PÜ berechnet. Bei einem Abtragsdurchmesser  $d_w = 7,1 \mu\text{m}$  für WC-12Co wird der Pulsabstand  $PA = 5 \mu\text{m}$  ablatiert, um im Abtragbild gerade noch die Einzelkrater zu erkennen und deren Überlapp messtechnisch zu verifizieren.

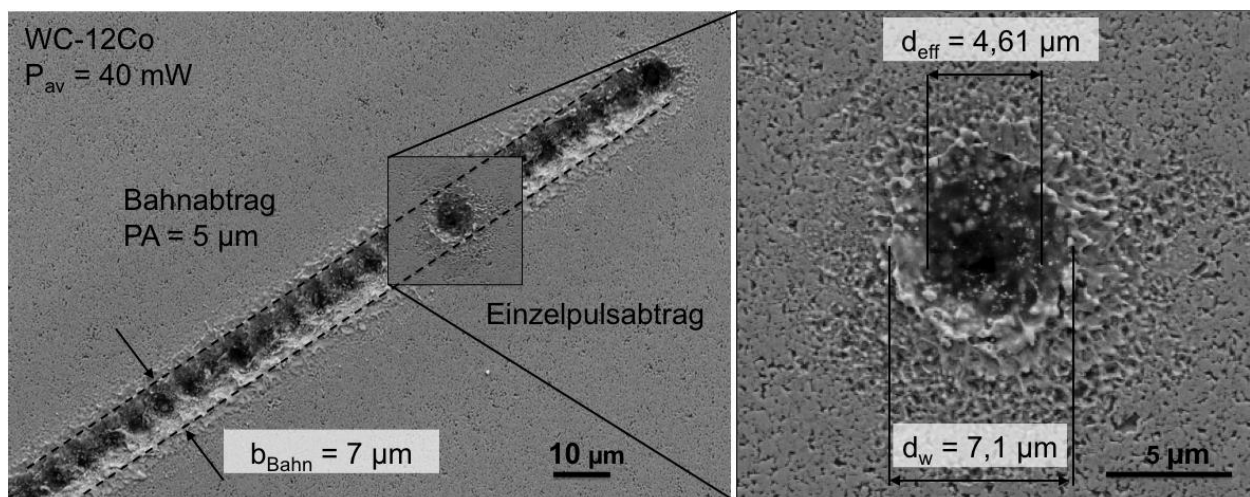


Abbildung 5-6: WC-12Co, dem Bahnabtrag überlagerter Einzelpulsabtrag für  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$

Der Pulsüberlapp ergibt sich rechnerisch zu  $P\ddot{U}_{eff} (d_{eff} = 4,61 \mu\text{m}) = -8,5 \%$ . Das bedeutet, dass der effektive Abtragsdurchmesser gerade nicht überlappt. Der Abstand beträgt zwischen den effektiven Abtragsdurchmessern  $P\ddot{U} \cdot d_{eff} = 0,39 \mu\text{m}$  und ist lediglich als kleiner Steg in der REM-Aufnahme zu erkennen (Abbildung



5-7). Die ebensten Bahnoberflächen im Grund konnten mit einem  $P\ddot{U}_{eff} \approx 0\%$  und  $P\ddot{U}_w \approx 30\%$  erzielt werden.

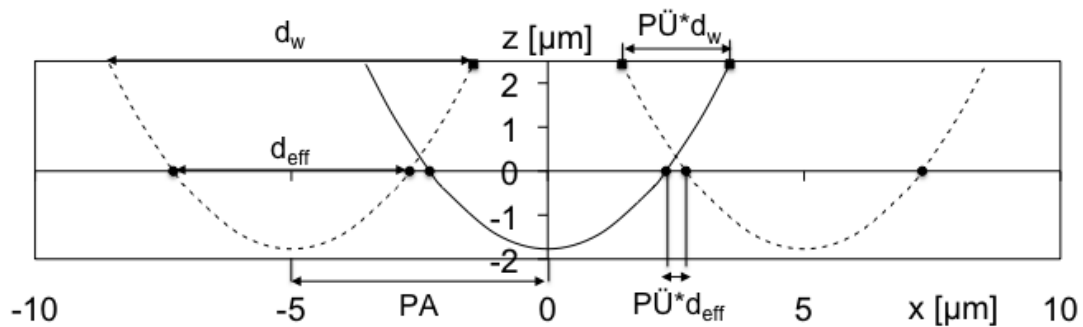


Abbildung 5-7: Pulsüberlappung  $P\ddot{U}$  für  $PA = 5\ \mu\text{m}$ ,  $H = 160,1\ \text{J}/\text{cm}^2$ , Pos.  $z = 0\ \text{mm}$ ,  $P\ddot{U}_{eff} (d_{eff} = 4,61\ \mu\text{m}) = -8,5\%$ ,  $P\ddot{U}_w (d_w = 7,1\ \mu\text{m}) = 29,5\%$ , WC-12Co

Es kann festgehalten werden, dass mit sinkendem Pulsabstand PA und steigender mittlerer Leistung  $P_{av}$  bzw. Fluenz die Nuttiefe ansteigt (Abbildung 5-8, rechts). Gerade bei den stark Schmelze bildenden Stählen werden bei kleinen Pulsabständen gehäuft Ablagerungen von Schmelzefäden in der Nut beobachtet (Abbildung 5-8, links).

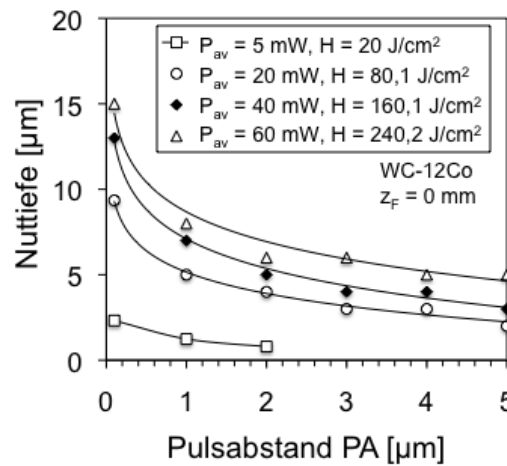
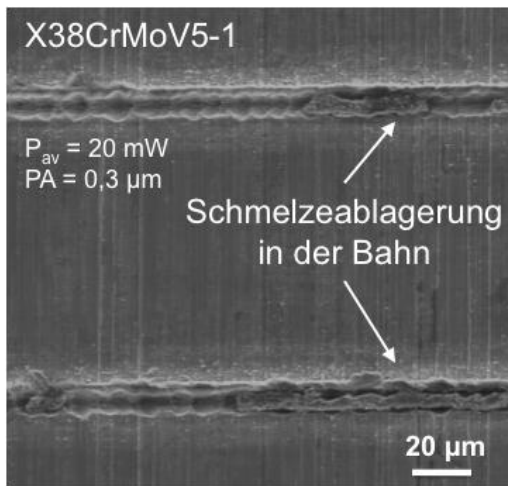


Abbildung 5-8: X38CrMoV5-1 Schmelzeablagerung in Bahnen bei  $H = 80,1\ \text{J}/\text{cm}^2$ , Prozessgas 2 bar Druckluft (links), Nuttiefe WC-12Co bei variierendem PA und  $P_{av}$  bzw. H, Fokusposition  $z = 0\ \text{mm}$  (rechts)

Auch Meiners [Mei-95] beobachtet in seiner Arbeit ein solches Verhalten. Er beschreibt, dass beim Bohren durch die zylindrische Kapillare der Dampfdruck wie ein Kolben die Schmelze wirkungsvoll austreiben kann, dies beim Abtragen anderer Geometrien jedoch nicht möglich ist. Die Schmelze wird durch den Dampfdruck nach oben gedrückt und lagert sich teilweise an der bereits

bearbeiteten Fläche ab. Für WC-12Co sind solche Ablagerungen nicht beobachtet worden.

Für die Ermittlung der Fokusslage und des Arbeitsbereichs wird die Symmetrie des fokussierten Laserstrahls, das heißt deren Aufweitung vor und nach der Strahltaile des Laserstrahls, untersucht. Befindet sich die Strahltaile auf der Probenoberfläche ( $z = 0$  mm), so sieht das Abtragbild vor und nach diesem Bereich ähnlich aus, da auf Grund der Flächenaufweitung die Energiedichte in diesen Bereichen abnimmt. Die Breite und Tiefe der Bahnen wird mit dem Nanofocus  $\mu$ surf vermessen. Befindet sich die Strahltaile auf der Oberfläche, so bilden sich für WC-12Co schmale und tiefe Nuten, wie Abbildung 5-9 zeigt.

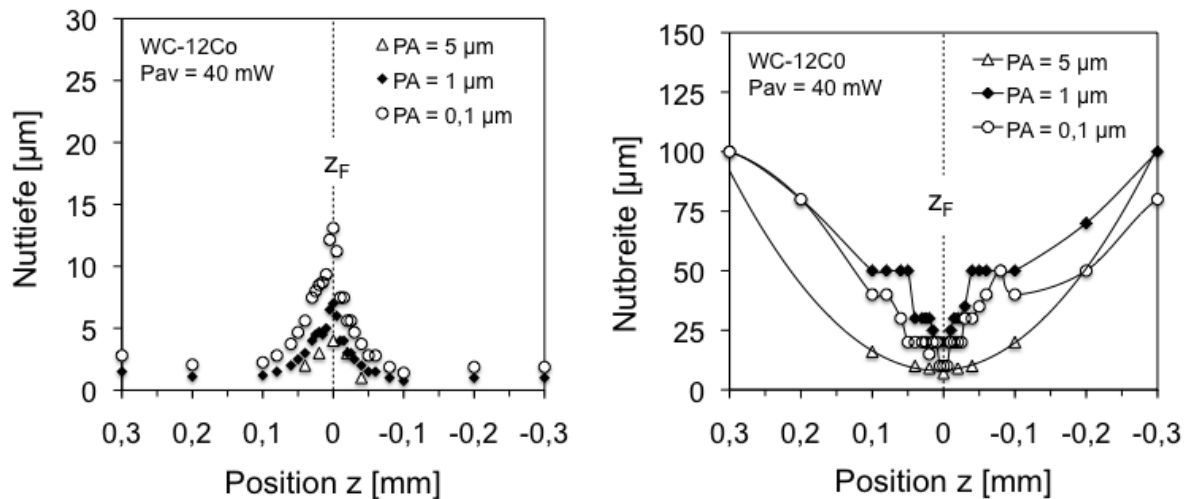


Abbildung 5-9: Tiefe (links), Breite (rechts) der Nuten in Abhängigkeit vom Pulsabstand und der Fokusposition  $z$ , WC-12Co

Abbildung 5-10 fasst die REM-Aufnahmen ablatierter Bahnen mit verschiedenen  $z$ -Positionen auf unterschiedlichen Materialien zusammen. Dabei wird die Symmetrie des Abtragbildes in axialer Richtung des fokussierten Laserstrahls verdeutlicht. Die Bahnen im Bereich  $z = 0$  mm  $\pm$  0,02 mm zeigen ein ähnliches Abtragergebnis. Weiter defokussiert ( $|z| > 0,02$  mm), weiten sich die Bahnbreiten auf und die Nuttiefe nimmt ab. Für die Fokusposition  $\pm 0,1$  mm ist bereits kaum ein Abtrag mehr zu erkennen. Die Bahnstrukturierung von  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  mit einem Pulsabstand von 5  $\mu$ m erweist sich als suboptimal, da hier kaum eine Ausprägung zu erkennen ist. Defokussiert mit  $z = \pm 100$   $\mu$ m sind die Bahnen breiter und anders als bei WC-12Co auch tiefer als bei der Bearbeitung mit  $z = 0$  mm. Die defokussierten Bahnen auf X38CrMoV5-1, Si und WC-12Co weisen einen deutlichen Schmelzeaufwurf am Rand auf. Für Hartmetall WC-12Co kann festgehalten werden, dass die Bahnen, die mit den in der Strahltaile

befindlichen z-Positionen abgetragen werden, im Verhältnis zu defokussiert ablatierten Bahnen schmal sind. Der Arbeitsbereich  $z_A$  ist so definiert, dass die in der Strahltaile ablatierten Linien nahezu gleich aussehen. Der Arbeitsbereich wird zu  $z_A \leq z_F \pm 20 \mu\text{m}$  bestimmt und gilt als Zielgröße für die Fokussierung für die Laserstrahlsublimationsablation.

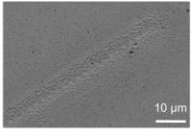
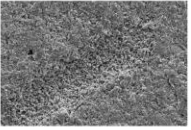
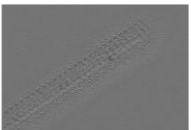

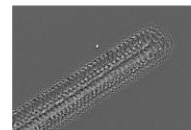
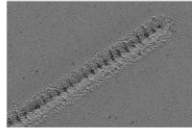
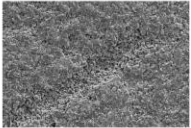
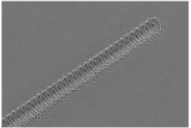


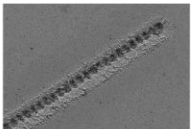
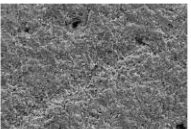

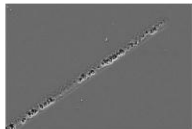
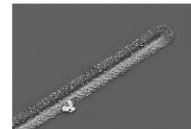
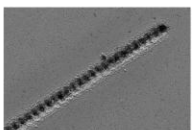
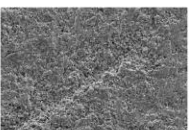
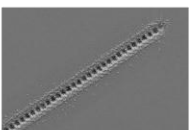
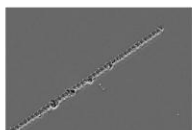
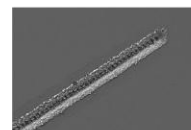
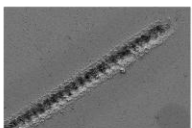
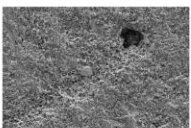
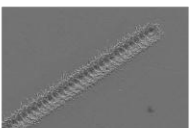
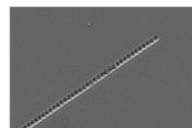
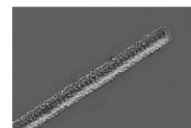
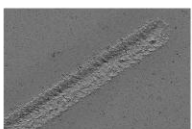
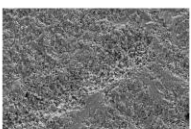
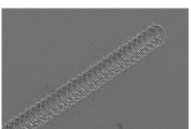
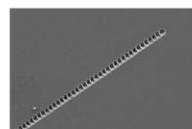
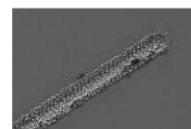
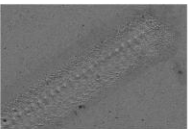
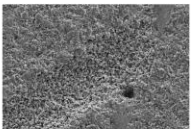
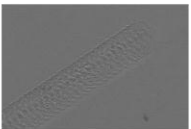
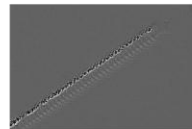
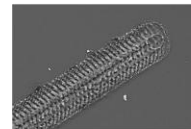
Material	WC-12Co	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	X38CrMoV5-1	Glas	Si
$P_{av}$ [mW]	40	40	10	10	6
PA [ $\mu\text{m}$ ]	5	5	4	3	3
z [mm]					
+0,1					
+0,04					
+0,02					
$z_F = 0$					
-0,02					
-0,04					
-0,1					

Abbildung 5-10: REM-Aufnahmen des Bahnabtrags bei variierender Fokusslage und materialspezifisch gewählter mittlerer Laserleistung  $P_{av}$

## Fazit

Es kann festgehalten werden, dass mit sinkendem Pulsabstand PA (steigendem Pulsüberlapp) und steigender mittlerer Leistung  $P_{av}$  die Nuttiefe ansteigt. Die

ebensten Bahnoberflächen im Grund werden bei einer Bearbeitung im Fokus mit einem  $P\ddot{U}_{\text{eff}} \approx 0\%$  und  $P\ddot{U}_w \approx 30\%$  erzielt.

Das Abtragbild der Aneinanderreihung der Einzelpulse (Bahn) ist im Gegensatz zum Einzelpulsabtragdurchmesser mit einem Lichtmikroskop zu erkennen und für die manuelle optische Ermittlung des Arbeitsbereichs und der anfänglichen Fokusslage  $z_F$  grundlegend. Bei Variation der Fokusslage zeigen die ablatierten Bahnen im Bereich  $z = 0 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  ein ähnliches Abtragergebnis. Defokussiert ( $|z| > 0,02 \text{ mm}$ ) erstellte Bahnen, weisen höhere Bahnbreiten auf und die Nuttiefe nimmt ab. Für die Ermittlung der anfänglichen Fokusslage  $z_F$  ist lediglich die Symmetrie im Abtragbild von Bedeutung. Ist diese bekannt, so kann zunächst die Fokusslage in  $z_F = z = 0 \text{ mm}$  eingestellt werden und anschließend im angestrebten Inkrement auch defokussiert gearbeitet werden, um möglicherweise höhere Abtragraten zu erzielen.

### 5.1.3 Ermittlung des Abtragverhaltens von WC-12Co zur Flächenablation ( $2\frac{1}{2}D$ )

Abbildung 5-11 zeigt das erarbeitete Abtragverhalten für WC-12Co bei variierenden Parametern  $P_{\text{av}}$ , PA und BA. Für einen Pulsabstand von 5 - 9  $\mu\text{m}$  und einen Bahnabstand von 3 - 9  $\mu\text{m}$  stellen sich ähnliche Abtragtiefen ein, die nahezu unbeeinflusst von der Variation der mittleren Laserleistung  $P_{\text{av}}$  bleiben. Der Übersichtlichkeit halber wird die Rauheit  $R_z$  in Abbildung 5-12 (links) über dem Pulsabstand PA für ausgewählte Bahnabstände (BA = 1, 3, 5 und 7  $\mu\text{m}$ ) dargestellt. Der Bahnabstand von 5  $\mu\text{m}$ , zeigt für alle Pulsabstände ein gleichbleibend gutes Ergebnis der Oberflächenrauheit und wird daher für weitere Untersuchungen ausgewählt. Die Parameterkombinationen für PA < 5  $\mu\text{m}$  und BA = 1  $\mu\text{m}$  führen zu Rauheitswerten  $R_z \gg 1 \mu\text{m}$  und können somit als Bearbeitungsparameter ausgeschlossen werden.

Bei symmetrischer Wahl von PA und BA wird deutlich, dass eine maximale Tiefe bei minimaler Rauheit  $R_z$  für PA = BA = 3 - 7  $\mu\text{m}$  erreicht werden kann (Abbildung 5-12, rechts). Festgehalten werden kann zudem, dass mit kleiner werdenden Puls- und Bahnabständen und größer werdenden mittleren Leistungen die Tiefe der Kavitäten zunimmt.

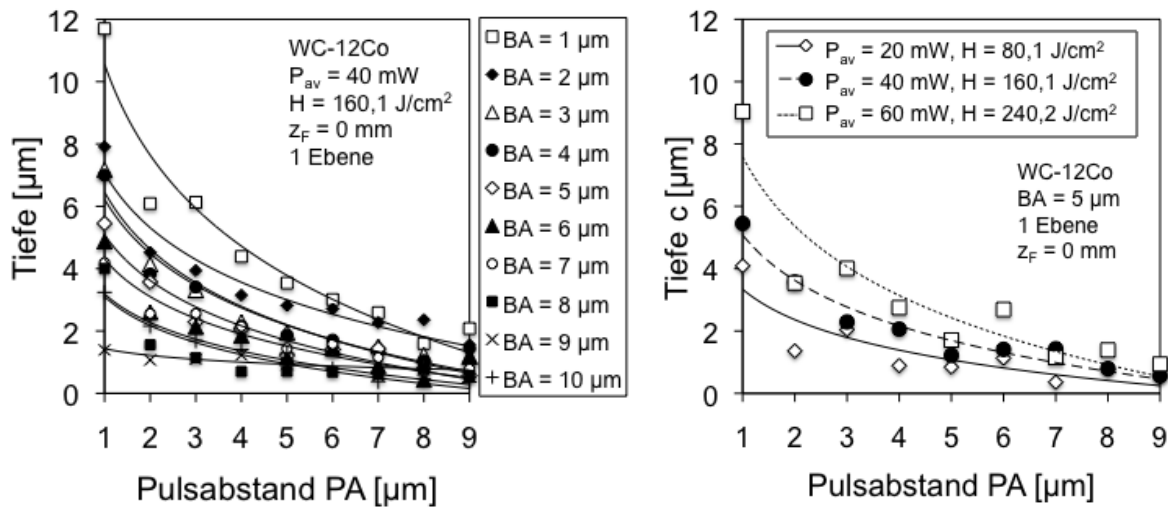


Abbildung 5-11: WC-12Co, Abtragtiefe  $c$  in Abhängigkeit von Puls- und Bahnabstand bei konst. Laserleistung  $P_{av}$  bzw. Fluenz (links), Abtragtiefe  $c$  in Abhängigkeit von PA und  $P_{av}$  bzw.  $H$  bei konst. BA (rechts)

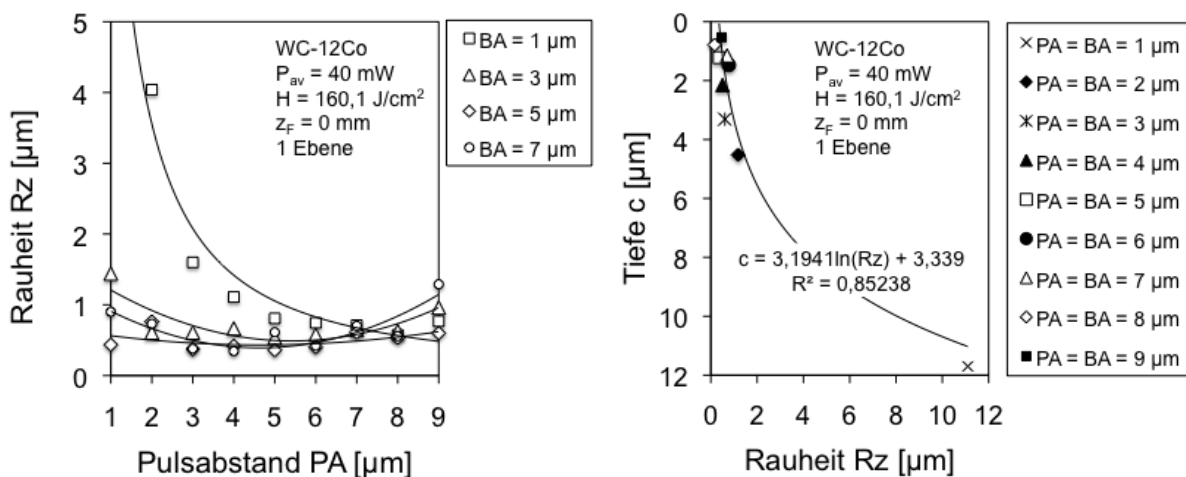


Abbildung 5-12: Erzielte Rauheiten  $Rz$  im Grund der Kavitäten (links) und Tiefen (rechts) nach der Ablation einer Ebene, WC-12Co,  $z_F = 0 \text{ mm}$

Ausgewählt werden abschließend nach der lexikographischen Ordnung maximal zehn Parametersätze, die die Auswahlkriterien einer maximalen Oberflächenqualität (Defektfreiheit bei minimaler Oberflächenrauheit und  $Rz < 1 \text{ µm}$ ) bei maximaler Abtragtiefe erfüllen. Die ausgewählten Parameterkombinationen sind in Tabelle 5-2 aufgelistet. Ebenfalls dargestellt sind die Flächenparameter  $Sz$  und  $Sa$ .

*Tabelle 5-2: Ermittelte Parameteroptima für WC-12Co, Parameterliste bei Ebenenanzahl  $n = 1$*

#	$P_{av}$ [mW]	H [J/cm <sup>2</sup> ]	PA [ $\mu$ m]	BA [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]	Ra [ $\mu$ m]	Sz [ $\mu$ m]	Sa [ $\mu$ m]	Tiefe [ $\mu$ m]
1	20	80,1	5	4	0,35	0,0695	1,53	0,18	0,89
2	20	80,1	5	6	0,355	0,0606	1,79	0,25	1,13
3	40	160,1	5	4	0,535	0,1	1,96	0,16	2,06
4	40	160,1	5	6	0,606	0,606	1,69	0,168	1,41
5	40	160,1	5	3	0,617	0,104	2,04	0,267	2,89
6	60	240,2	5	5	0,318	0,0655	1,67	0,15	1,71
7	60	240,2	5	6	0,369	0,0749	1,98	0,175	2,69
8	60	240,2	5	4	0,445	0,0921	2,61	0,29	2,75
9	60	240,2	5	7	0,465	0,0957	2,09	0,182	1,15
10	60	240,2	5	3	0,516	0,0935	2,56	0,216	4,01

Zur Herstellung dreidimensionaler tiefer Kavitäten ist es in einem dritten Schritt notwendig, die gefundenen Flächenparameterkombinationen in die Tiefe zu arbeiten, wofür der Fokus ebenenweise auf der Oberfläche im Grund der Kavität um  $dz$  nachgeführt wird. Die Oberflächenbeschaffenheit und damit die Absorption und Einkoppelungsbedingung des Laserstrahls auf der ersten Ebene unterscheidet sich von denen nach der Ablation von  $n$  Ebenen. Aus diesem Grund kann nicht die erzielte Tiefe nach der ersten Ebene als Zustellung  $dz$  für die gesamte Bearbeitung herangezogen werden.

Eine selbstregelnde Zustellung erfolgt mit Hilfe des integrierten konfokalen Weißlichtsensors. Nach jeder ablatierten Ebene wird das Werkstück automatisch unter den Sensorstrahl verfahren. Der Abstand zum Grund der Kavität wird in mindestens fünf Punkten gemessen und der Mittelwert an die Lasersteuerung übergeben. Der Abstand zur Werkstückoberfläche wird anschließend mit dem Abstand zum Grund der Kavität verrechnet und die Differenz als Zustellung  $dz$  der Fokusposition ausgeführt.

Die erste ablatierte Ebene ist mit ca. 3  $\mu$ m Tiefe tiefer, als die darauf folgenden. Bei den folgenden Abtragebenen ist die erreichte Abtragtiefe nahezu konstant bei 1  $\mu$ m pro Ebene. Wird nur die Tiefe der ersten Ebene zur Bestimmung von  $dz$  berücksichtigt und als Zustellungsinkrement gewählt, so entstehen schlechtere Oberflächenrauheiten, als wenn die Abtragtiefen von mindestens 20 Ebenen berücksichtigt werden. Abbildung 5-13 zeigt das Verhalten der Abtragtiefe pro Ebene in Abhängigkeit von der Zustellung  $dz$  (links) und der erzielten Oberflächen in Form von REM-Aufnahmen der Kavitäten (rechts). Mit der konstanten Zustellung  $dz = 3 \mu$ m wird eine Kavität der Tiefe  $c = 62 \mu$ m und der

Oberflächenrauheit  $R_z = 1,7 \mu\text{m}$  im Grund erreicht. Bei einer konstanten Zustellung von  $dz = 1 \mu\text{m}$  wird eine Oberflächenrauheit  $R_z = 0,6 \mu\text{m}$  im Grund einer Kavität der Tiefe  $c = 19 \mu\text{m}$  erzielt. Die Verbesserung der Oberflächenqualität bringt den Nachteil der Erhöhung der Bearbeitungszeit mit sich, da hier mit dreifach geringerer Abtragrate gearbeitet wird. Die gemittelte Zustellung über alle Ebenen ergibt hier  $dz = 0,995 \mu\text{m}$ . Um Nebenzeiten durch die Mess- und Regelungszyklen zu verkürzen, wird nur für die Parameterfindung die Regelung eingesetzt. Für weitere Bearbeitungsschritte wird eine konstante Zustellung  $dz$  gewählt.

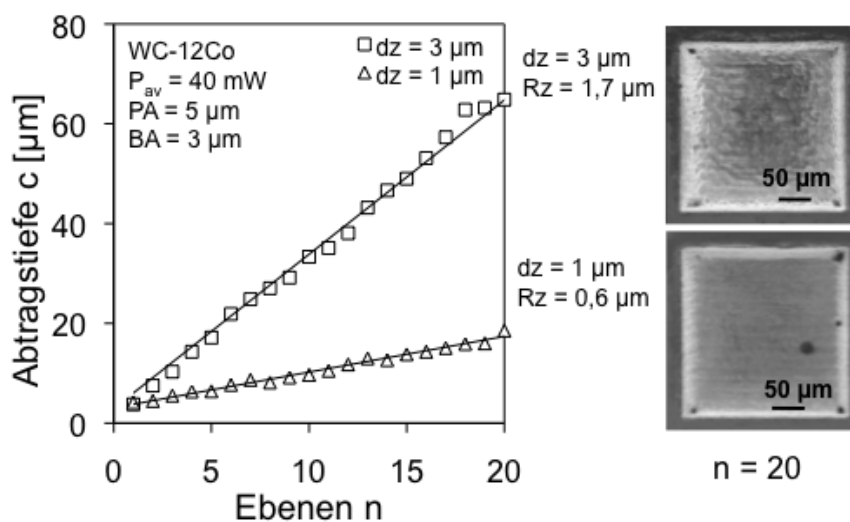


Abbildung 5-13: WC-12Co, Abtragtiefe pro Ebene mit  $dz = 1 \mu\text{m}$  und  $3 \mu\text{m}$  (links), REM-Aufnahmen von Kavitäten nach 20 Ebenen mit  $dz = 3 \mu\text{m}$  (rechts, oben) und mit  $dz = 1 \mu\text{m}$  (rechts, unten),  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$

## Fazit

Für WC-12Co konnten zehn Parameterkombinationen gefunden werden, die zu einer Oberflächenrauheit von  $R_z \leq 1 \mu\text{m}$  führen. Die ebensten Oberflächen im Grund werden bei einer Bearbeitung im Fokus mit einem  $P\ddot{U} \approx 0 \%$  und  $P\ddot{U}_w \approx 30 \%$  erzielt. Der Pulsabstand von  $5 \mu\text{m}$  zeigt für die Bahnabstände  $BA = 3 - 7 \mu\text{m}$  ein gleichbleibend gutes Ergebnis und wird daher für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Bei symmetrischer Wahl des  $PA$  und  $BA$  wird deutlich, dass die maximale Tiefe bei minimaler Rauheit  $R_z$  für  $PA = BA = 3 - 7 \mu\text{m}$  erreicht werden kann. Mittels automatisierter Abtragregelung wird die Zustellung für die Bearbeitung tieferer Kavitäten ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass die Tiefe der ersten Ebene nicht der idealen Zustelltiefe entspricht. Die erzielte Oberflächenqualität liegt bei  $R_z = 1,7 \mu\text{m}$ . Für WC-12Co werden deshalb die erzielten Abtragtiefen über 20 Ebenen gemittelt und so eine Zustellung  $dz$  von  $1 \mu\text{m}$  errechnet. Mit diesem Inkrement wurde zwar eine

geringere Abtragrate aber eine deutlich bessere Oberflächenqualität von  $R_z = 0,6 \mu\text{m}$  erzielt.

Um den Versuchsaufwand zu minimieren, wird alternativ mit der Response Surface Methode ein Schnelltest für die Parameterfindung anhand von WC-12Co entwickelt und anschließend auf weitere Materialien übertragen.

## 5.2 Prozessparameterfindung im Schnelltest mittels RSM

Die Strukturierung neuer Materialien fordert eine möglichst schnelle Parameterfindung [Dub-08]. Um den Versuchsumfang zu reduzieren und damit schneller zu einem Ergebnis zu gelangen, wird die optimale Parameterfindung mittels Response Surface Methode als Schnelltest entwickelt. Das Abtragverhalten und die optimalen Parameter für WC-12Co sind in Kapitel 5.1 detailliert erarbeitet worden und dienen nun der Entwicklung des Schnelltests anhand von WC-12Co.

### 5.2.1 Definition des Versuchsraums mit DoE

Zunächst werden die Größen und Nebenbedingungen des Versuchsraums in Tabelle 5-3 festgelegt. Es wird die Rauheit  $R_z$  als Funktion der signifikanten Parameter mittlere Leistung  $P_{av}$ , Pulsabstand PA und Bahnabstand BA dargestellt.

$$R_z = f(P_{av}, PA, BA) + \varepsilon \quad \text{Formel 5-1}$$

Als  $\varepsilon$  werden alle Messfehler und weiteren Fehler, die eine Streuung bewirken, bezeichnet.  $\varepsilon$  soll als statistischer Fehler angesehen werden, der normalverteilt ist mit dem Mittelwert 0 und der Varianz  $\sigma^2$ .

Es wird ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan (Response Surface Design) mit 5 Faktorstufen gewählt. Eine mögliche Nichtlinearität der Funktion wird mit dem sogenannten Zentrumspunkt überprüft. Die sogenannten Sternpunkte stellen die niedrigsten und höchsten Werte der Faktorstufen dar und werden durch Wahl des normierten Wertes  $\alpha$  berechnet. Die Drehbarkeit des Versuchsplans für  $k = 3$  Faktoren ergibt sich gemäß Formel 4-3 für  $\alpha = 1,682$ .



Tabelle 5-3: Festlegung des Versuchsraums

Versuchsdurchführung	Versuchsfestlegung
Ziel der Parametersuche	Minimierung der Rauheit Rz
Material	WC-12Co, polierte Oberfläche
Signifikante Einflussfaktoren	mittlere Leistung $P_{av}$ (A), Pulsabstand PA (B), Bahnabstand BA (C)
Grenzen des Experimentierraums	A: 5 - 55 mW B: 0,5 - 5,5 $\mu\text{m}$ C: 0,5 - 5,5 $\mu\text{m}$
Geometrie	Tasche: 400 $\mu\text{m}$ x 400 $\mu\text{m}$ x 20 $\mu\text{m}$ Tiefe: selbstgeregelt mit Sensor
Konstant gehaltene Parameter:	Prozessgas: Druckluft Druck: 2 bar

Für die Versuchsmatrix werden anschließend die einzustellenden Werte der Parameter errechnet. Die Werte für die mittlere Leistung  $P_{av}$  errechnen sich z.B. wie folgt:

$$x_{-\alpha} = x_0 - (\bar{x}_{0,-1}) \cdot \alpha = 30 - (30 - 15) \cdot 1,682 = 4,77 \approx 5 \quad \text{Formel 5-2}$$

$$x_{+\alpha} = x_0 + (\bar{x}_{0,+1}) \cdot \alpha = 30 + (45 - 30) \cdot 1,682 = 55,23 \approx 55 \quad \text{Formel 5-3}$$

Der hier verwendete zentral zusammengesetzte Versuchsplan ist allgemein in Kapitel 4.5.1 (Tabelle 4-2) dargestellt. Die in den Versuchsplan einzufügenden errechneten Faktorstufen beinhaltet Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Festlegung der Faktoren und Stufen des Versuchsplans

Faktor	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
Pulsleistung $P_{av}$ [mW]	5	15	30	45	55
Pulsabstand PA [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	1,5	3,0	4,5	5,5
Bahnabstand BA [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	1,5	3,0	4,5	5,5

## 5.2.2 Ergebnis der Bearbeitung (WC-12Co)

Der vollständig faktorielle Versuchsplan (Würfel) umfasst gemäß Formel 4-4  $N = 18$  Versuche pro Stichprobe. Für die statistische Absicherung werden mindestens vier Stichproben bearbeitet. Dieser Versuchsplan wird mittels Ablation von  $n$  Ebenen abgearbeitet. Die Nachführungsinckremente des Fokus  $dz$  werden mittels der Abstandsmessung mit dem konfokalen Weißlichtsensor ermittelt und automatisiert nachgeregelt, bis eine Tiefe von  $20 \mu\text{m}$  erzielt wird.

Abbildung 5-14 zeigt graphisch die erzielten Rauheiten  $Rz$  für WC-12Co bei vierfacher Ausführung der Ablation des zentral zusammengesetzten Versuchsplans anhand von vier Stichproben. Folgende drei Parameterkombinationen zeigen eine starke Streuung der erzielten Rauheit  $Rz$  über die vier Stichproben auf Grund zu klein gewählter PA und/oder BA.

Syst. Nr. 5:  $P_{av} = 45 \text{ mW}$ ,  $PA = 1,5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 1,5 \mu\text{m}$

Syst. Nr. 11:  $P_{av} = 30 \text{ mW}$ ,  $PA = 0,5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$

Syst. Nr. 13:  $P_{av} = 30 \text{ mW}$ ,  $PA = 3 \mu\text{m}$ ,  $BA = 0,5 \mu\text{m}$

Einige der untersuchten Parameterkombinationen führen zum gewünschten  $Rz \leq 1 \mu\text{m}$ . Die Daten werden nun der statistischen Analyse und Modelluntersuchung zugeführt.

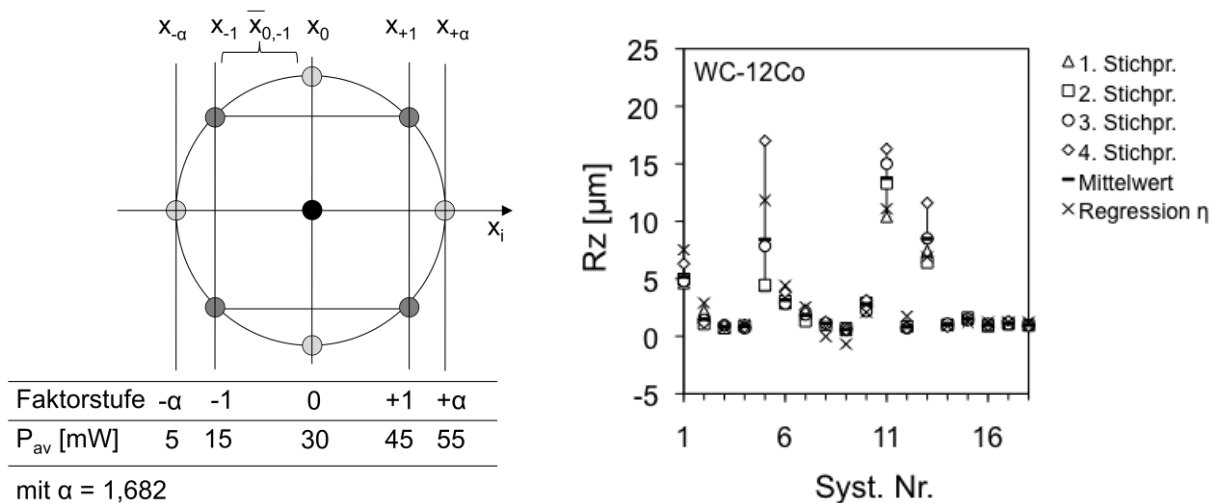


Abbildung 5-14: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan, Response Surface Design (links), Streuung der Rauheitsmesswerte  $Rz$  über vier Stichproben, Mittelwert und ermittelte Regression, WC-12Co (rechts)

### 5.2.3 Statistische Datenanalyse, Regression und Modelluntersuchung

Mit Unterstützung der Software STATGRAPHICS® Centurion wird eine Modelluntersuchung (linear, linear inklusive Wechselwirkung oder quadratisch) durchgeführt und jenes, welches die Versuchspunkte mit den gemessenen Rauheiten Rz am besten beschreibt, ausgewählt. Für die quadratische Funktion sind die geforderten Bedingungen erfüllt. Das Bestimmtheitsmaß ist maximal bei minimalem PRESS und der F-Wert ist größer 10 (Tabelle 5-5).

*Tabelle 5-5: Statistische Auswertung und Überprüfung der Güte der Modellanpassung, WC-12Co*

Modell	F-Wert	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	PRESS
Linear	30.49	0,5097	0,4929	718,34
Gemischte Wechselwirkungen	16193	0,5886	0,5596	646,15
Quadratisch	28.50	0,7986	0,7765	373,69

Aus den ermittelten Rauheiten Rz für die einzelnen Versuchspunkte wird mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LS) eine Funktion aufgestellt und die Regressionskoeffizienten werden so geschätzt, dass die Summe der quadrierten Abweichung zwischen dem Schätzwert  $\hat{y}_i$  und dem Mittelwert der Messwerte  $y_i$  minimal ist.

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \text{Minimum}$$

Formel 5-4

Die in Tabelle 5-6 aufgelisteten Schätzwerte erfüllen die Gleichung der multiplen Regression  $\eta$  gemäß Formel 4-5. Die Koeffizienten  $\beta_i$  der linearen Terme  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  stehen für die Haupteffekte der Faktoren A (Pulsleistung  $P_{av}$ ), B (Pulsabstand PA) und C (Bahnabstand BA). Die Koeffizienten der quadratischen Terme beschreiben den quadratischen Effekt der Faktoren (AA = WW\_  $P_{av}$   $P_{av}$ , BB = WW\_ PA\_ PA, CC = WW\_ BA\_ BA) aber auch die Wechselwirkung (AB = WW\_  $P_{av}$ \_ PA, AC = WW\_  $P_{av}$ \_ BA, BC = WW\_ PA\_ BA) der einzelnen Faktoren.

Die resultierenden Werte der Gleichung sind in Abbildung 5-14 als Regression  $\eta$  eingezeichnet und machen deutlich, dass die erzielten Rauheiten durch diese geeignet abgebildet werden. Die drei streuungsbehafteten Parameterkombination spielen für die Modellbildung nur eine untergeordnete Rolle.

*Tabelle 5-6: Errechnete Regressionskoeffizienten für WC-12Co*

Faktor	Koeffizient	errechneter Schätzwert
Konstante	$\beta_0$	18,8399
A (Pulsleistung $x_1$ )	$\beta_1$	0,283132
B (Pulsabstand $x_2$ )	$\beta_2$	-7,61592
C (Bahnabstand $x_3$ )	$\beta_3$	-4,43886
AA	$\beta_4$	-0,000850684
AB	$\beta_5$	-0,0278958
AC	$\beta_6$	-0,0310292
BB	$\beta_7$	0,828277
BC	$\beta_8$	0,538625
CC	$\beta_9$	0,425772

#### 5.2.4 Operations Research (OR) und Ergebnis des Schnelltests

Die Optimierung mittels Operations Research (OR) sieht anschließend die Verwendung mathematischer Modelle zur Optimierung vor. Die lokalen Minima dieser Funktion werden dabei mittels nichtlinearer Optimierung, Lagrange Multiplikatoren und Kuhn Tucker Bedingungen für mittlere Leistungen von 15 mW, 20 mW, 40 mW und 55 mW berechnet. Es wird die Optimierungsaufgabe betrachtet, die dadurch charakterisiert ist, dass die Zielfunktion unter nichtlinearen Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen minimiert wird. Die resultierenden Parameterkombinationen (PK) werden anschließend zur Bearbeitung einer Ebene eingesetzt und die erzielte Oberflächenrauheit bewertet. In Tabelle 5-7 sind die berechneten PK und die damit erzielten Rauheiten  $R_z$ , die das Kriterium  $R_z < 1 \mu\text{m}$  erfüllen, aufgelistet. Anschließend werden diese PK zur Bearbeitung einer Kavität der Tiefe 20  $\mu\text{m}$  genutzt. Die Zustellung von Ebene zu Ebene erfolgt selbstgeregelt mittels der Abstandmessung mit dem konfokalen Weißlichtsensor.

Tabelle 5-7: Ermittelte Parametersätze für WC-12Co mittels Schnelltest (RSM)

PK	mittlere Pulsleistung $P_{av}$ [mW]	Fluenz $H$ [J/cm <sup>2</sup> ]	Pulsabstand PA [ $\mu$ m]	Bahnabstand BA [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]
1	15	60	4,2	2,5	0,62
2	15	60	3,7	3,4	0,74
3	15	60	4,1	3,2	0,72
4	20	80,1	4,2	2,5	0,69
5	20	80,1	3,4	2	0,73
6	20	80,1	3,8	3,5	0,75
7	30	120,1	4,2	2,5	0,59
8	40	160,1	4,2	2,5	0,67
9	40	160,1	5	3	0,62
10	55	220,2	4,2	2,5	0,67
11	55	220,2	5	3	0,66

Abbildung 5-15 zeigt die erzielten Abtragtiefen pro Ebene für unterschiedliche PK für WC-12Co. Deutlich wird, dass die erreichte Abtragtiefe pro Ebene je nach PK sehr unterschiedlich ausfällt.

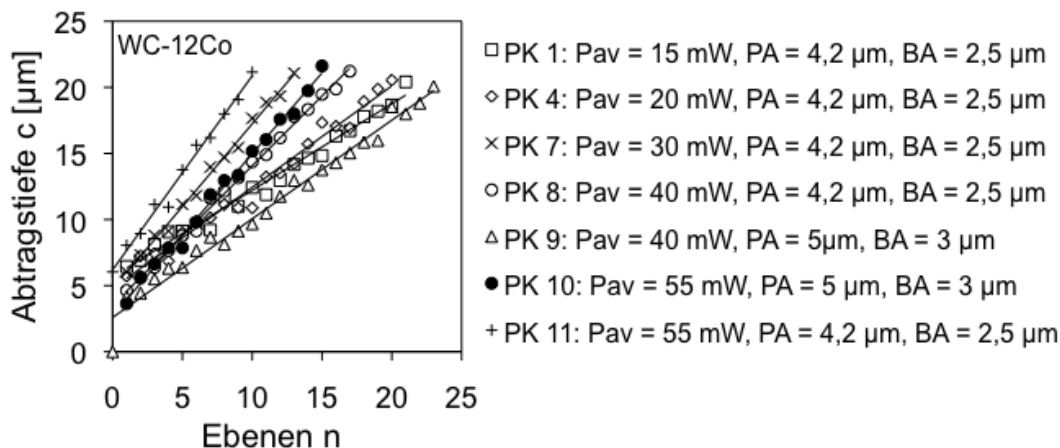


Abbildung 5-15: Abtragtiefe  $c$  pro Ebene für gefundene Parameterkombinationen PK aus Tabelle 5-7 mittels Schnelltest für WC-12Co

PK 8 und PK 9 scheinen sehr ähnliche Parametereinstellungen zu sein mit einem Unterschied von  $0,7 \mu\text{m}$  für den PA und  $0,5 \mu\text{m}$  Abweichung für den BA. Diese kleine Abweichung zeigt bereits ihre Wirkung in der Abtrage. Die Abtragtiefe  $c = 20 \mu\text{m}$  wird für PK 8 bereits nach 17 Ebenen erreicht, wohingegen mit der PK 9 insgesamt 24 Ebenen erforderlich sind.

Auch PK 10 und PK 11 scheinen sehr ähnliche Parametereinstellungen zu sein mit einem Unterschied von  $0,8 \mu\text{m}$  für den PA und  $0,5 \mu\text{m}$  Abweichung für den

BA. Die Abtragtiefe  $c = 20 \mu\text{m}$  wird für PK 11 bereits nach 10 Ebenen erreicht, wohingegen mit der PK 11 fünf weitere Ebenen erforderlich sind. Es wird deutlich, dass kleine Änderungen der Parameterkombinationen bereits zu signifikanten Abweichungen im Ablationsprozess führen. Aus diesem Grund werden die Haupt- und Wechselwirkungen näher betrachtet.

### 5.2.5 Diskussion der Haupt- und Wechselwirkungseffekte

Abbildung 5-16 visualisiert die geschätzten Haupteffekte der drei Parameter mittlere Pulsleistung, Pulsabstand und Bahnabstand. Die Linien geben die geschätzte Änderung für die Rautiefe  $R_z$  an, wenn sich der Faktor von der unteren zur oberen Grenze bewegt, wobei die anderen Faktoren auf dem mittleren Wert konstant gehalten werden.

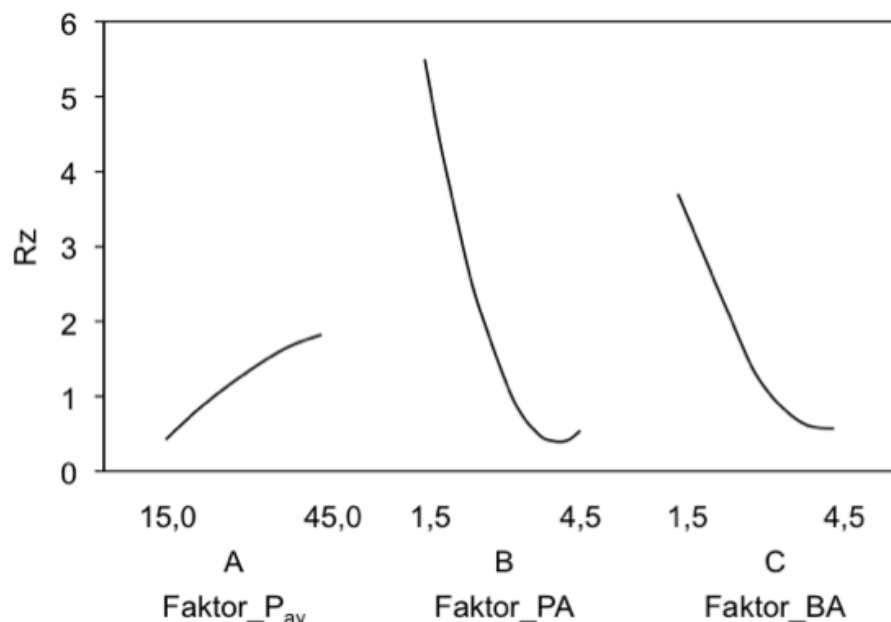


Abbildung 5-16: Haupteffekt-Diagramm für  $R_z$

Werden die Parameter einzeln betrachtet, so kann festgestellt werden, dass sich bei hohen Pulsabständen die Rautiefe verringert. Auch für hohe Bahnabstände verringert sich die Rautiefe. Mit steigender Leistung kann ein Anstieg in der Rautiefe wahrgenommen werden. Es ist wichtig, die Parameter nicht nur für sich, sondern auch die Wechselwirkungen (WW) zwischen den Parametern zu untersuchen, denn die Wahl einer niedrigeren Pulsleistung mit einem hohen Pulsabstand muss nicht zwangsläufig zu einer niedrigeren Rautiefe führen. Das dazugehörige Diagramm ist in Abbildung 5-17 dargestellt und zeigt, dass durch die Wahl eines hohen Pulsabstandes die Rautiefe sowohl bei einer hohen Pulsleistung als auch bei einer niedrigeren sinkt. Es ist auch ersichtlich, dass bei

Variation der Pulsleistung fast kein Unterschied in der Rautiefe besteht. Ähnliches gilt für die Wechselwirkung zwischen Bahnabstand und mittlerer Pulsleistung. Die Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen dem Puls- und Bahnabstand ergeben, dass die Wahl eines hohen Puls- und Bahnabstandes zu einer niedrigeren Rautiefe führt. Allerdings ist zu erkennen, dass das Minimum der Rautiefe nicht bei den höchsten Werten der Puls- und Bahnabstände im Untersuchungsintervall liegt. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den ermittelten Parametersätzen durch die RSM wider. Für jede untersuchte Pulsleistung führt ein PA von  $4,2 \mu\text{m}$  und ein BA von  $2,5 \mu\text{m}$  zu  $R_z < 1 \mu\text{m}$ .

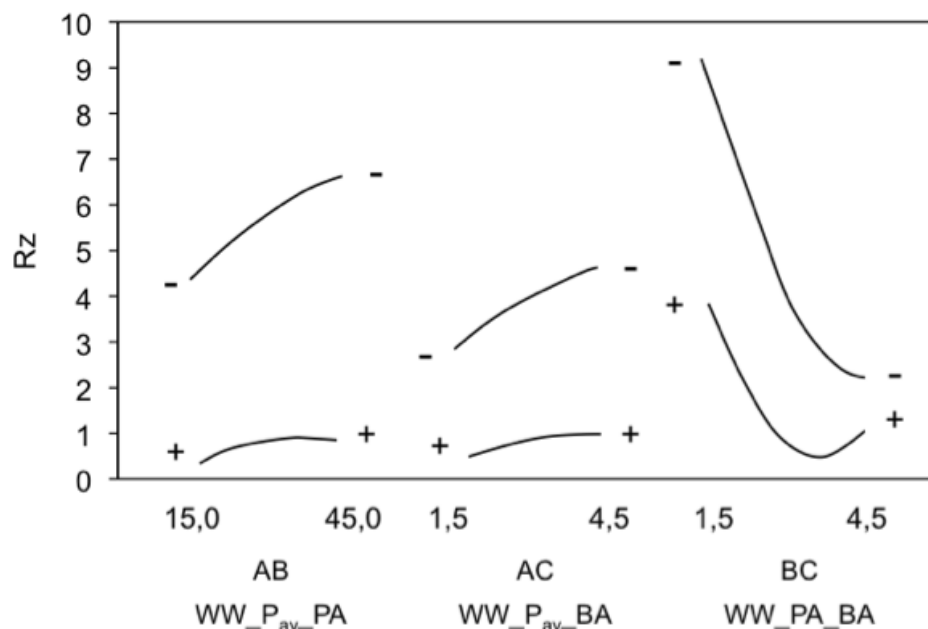


Abbildung 5-17: Wechselwirkungsdiagramm für  $R_z$

Ein Pareto-Diagramm, gibt abschließend den zahlenmäßigen Effekt der einzelnen Komponenten der Funktion wieder (Abbildung 5-18). Alle Effekte, deren Balken über die eingezeichnete Linie beim Standardisierten Effekt von 2 hinausragen, sind signifikant. Die grauen Balken stellen einen positiven Effekt dar, d.h. mit zunehmendem Wert steigt die Rautiefe an. Die weißen Balken stellen einen negativen Effekt dar, d.h. mit zunehmendem Wert sinkt die Rautiefe. Es ist zu erkennen, dass der größte Effekt auf die Zielgröße der Pulsabstand ist, gefolgt von der quadratischen Wechselwirkung des Pulsabstandes und des Bahnabstandes sowie des Haupteffektes Bahnabstand. Dies bedeutet, dass die falsche Wahl des Pulsabstandes schneller zur schlechteren Oberfläche führt als die falsche Wahl der mittleren Pulsleistung.

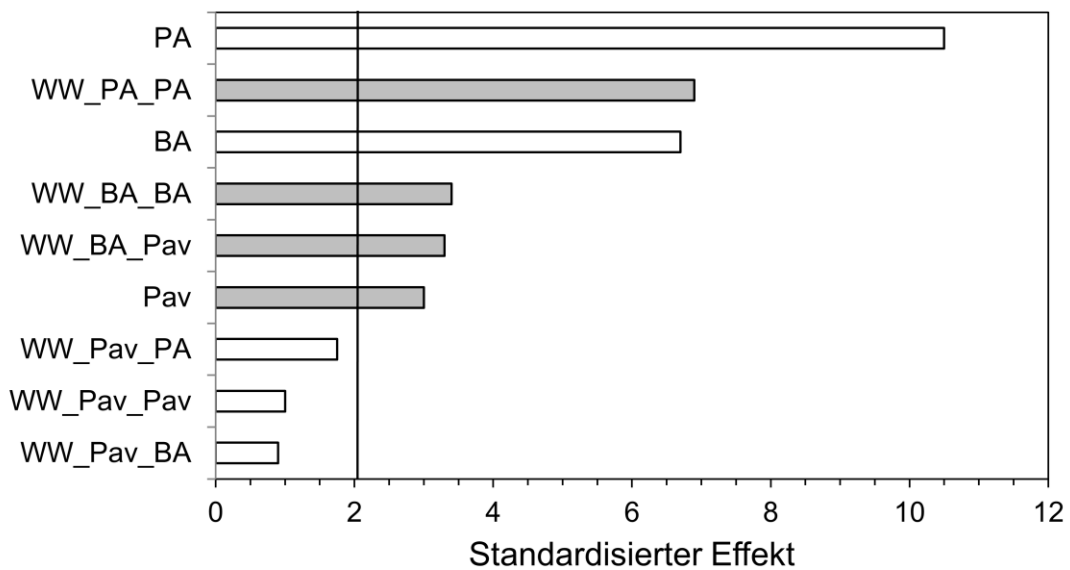


Abbildung 5-18: Standardisiertes Pareto-Diagramm für Rz, (+) grau, (-) weiß, Haupteffekte PA, BA und  $P_{av}$  und deren Wechselwirkung (WW)

Abbildung 5-19 visualisiert die gefundenen Parameterkombinationen und die erzielbare Oberflächenqualität Rz in Relation zu den zuvor in Kapitel 5.1 ermittelten Rauheiten. Mittels RSM konnten im Schnelltest Parameterkombinationen gefunden werden, die zu  $Rz < 1 \mu\text{m}$  führen (eingezeichnete Pfeile in Abbildung 5-19).

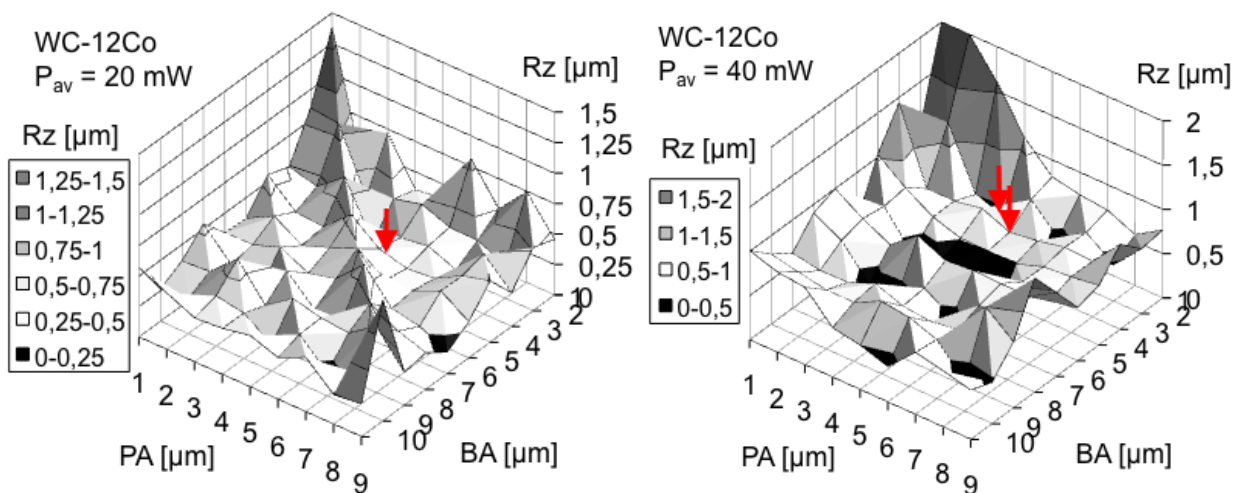


Abbildung 5-19: WC-12Co, ermittelte Rz aus Kapitel 5.1 mit eingezeichneten Parametersätzen aus Schnelltest:  $P_{av} = 20 \text{ mW}$ ,  $H = 80,1 \text{ J/cm}^2$  (links),  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$  (rechts)

Am Beispiel des WC-12Co beträgt der Versuchsumfang der konventionellen Vorgehensweise zur Parametersuche für die Flächenablation  $N_{\text{min, konv.}} = 300 \times m$



(zzgl. statistischer Absicherung durch  $m$  Wiederholungen). Der Schnelltest hingegen kommt mit nur  $N_{\min, RSM} = 18 \times m$  Versuchen (zzgl. statistischer Absicherung durch  $m$  Wiederholungen) aus. Das Ergebnis ist eine deutliche Aufwandreduktion für die Fertigung und die Auswertung der Versuchsmatrizen. Die Aufwandreduktion unterteilt sich in eine immense Zeit- und somit Kosteneinsparung bei der Fertigung einer ähnlichen Oberflächenqualität mit  $Rz \leq 1 \mu\text{m}$  auf WC-12Co.

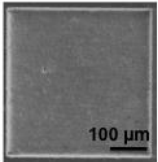
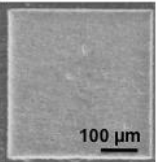
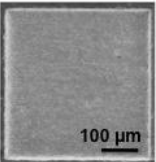
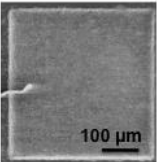
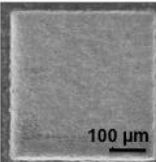
### 5.2.6 Validierung des Schnelltests für weitere Materialien und Diskussion

Abschließend wird die Übertragbarkeit des Schnelltests auf die Prozessparameterfindung für weitere Materialien überprüft. Im Anhang A befinden sich die zugrunde liegenden Daten des Modells für Siliziumcarbid (SiC). Mit dem Versuchsumfang von  $18 \times m$  ( $m = 3$  Wiederholungen) konnten fünf Parametersätze mit  $Rz < 1 \mu\text{m}$  gefunden werden. Tabelle 5-8 fasst die mittels Schnelltest erfolgreich ermittelten Parameterkombinationen für SiC zusammen und zeigt anhand von REM-Aufnahmen die erzielten defektfreien Oberflächen.

*Tabelle 5-8: SiC, Ermittelte Parameterkombinationen (PK) mittels Schnelltest, zugehörige Rauheiten und Abtraggilder in Form von REM-Aufnahmen*

PK	1	2	3	4	5
$P_{av}$ [mW]	5	10	15	20	40
PA [ $\mu\text{m}$ ]	3,7	4,1	4	4	4
BA [ $\mu\text{m}$ ]	3,1	3,5	3,5	3,7	3,8
n	20	13	11	8	4
$\bar{dz}$ [ $\mu\text{m}$ ]	1	1,7	2	3	5,4
c(n) [ $\mu\text{m}$ ]	21,2	21,6	20,0	21,7	20,9
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	0,791	0,817	0,922	0,948	0,975
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,152	0,175	0,169	0,175	0,198

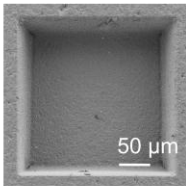
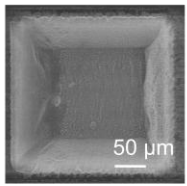
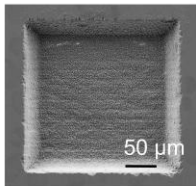
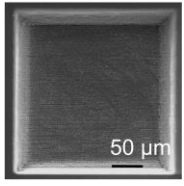
REM Aufnahmen z = 0 mm					
------------------------------	---	---	---	--	---

Für die fünf gefundenen Parameterkombinationen für SiC gilt, dass mit einer steigenden mittleren Leistung die Abtragate steigt. Für eine mittlere Leistung  $P_{av} = 40 \text{ mW}$  wird bereits nach vier Ebenen die Tiefe von  $20,9 \mu\text{m}$  erreicht. Für

$P_{av} = 5$  mW hingegen werden 20 Ebenen benötigt. Gleichzeitig steigt für höhere Leistungen, wie auch bei WC-12Co, die Oberflächenrauheit im Grund der Kavitäten. Dennoch kann  $Rz < 1 \mu\text{m}$  für das Leistungsspektrum von 5 bis 40 mW bei Puls- und Bahnabständen zwischen  $3,1 \mu\text{m}$  und  $4,1 \mu\text{m}$  erzielt werden. Löcher wurden bei der Bearbeitung von SiC nicht detektiert, was wiederum auf den Effekt des schmelzefreien Abtrags bei Keramiken zurückgeführt wird.

Für weitere Werkstoffe ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ , X38CrMoV5-1, Glas und Si) fasst Tabelle 5-9 die mittels Schnelltest gefundenen Parameterkombinationen zusammen und zeigt die besten erzielten Oberflächen anhand von REM-Aufnahmen. Die  $100 \mu\text{m}$  tiefen Kavitäten wurden mit Unterstützung der optischen Abtragregelung gefertigt. Die hier aufgeführten gemittelten Zustellungsinkremente  $\Delta z$  wurden im Anschluss an die selbstgeregeltete Bearbeitung (abzüglich der Tiefe der ersten Ebene) errechnet. Im Fall der deutlich höher porösen  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Keramik wird der Flächenparameter Sz ermittelt, um den Einfluss der Porosität weniger stark zu gewichten.

*Tabelle 5-9: Ermittelte Parameterkombinationen mittels Schnelltest*

Material	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	X38CrMoV5-1	Glas	Si
$P_{av}$ [mW]	40	20	10	6
PA [ $\mu\text{m}$ ]	5	0,8	3	3
BA [ $\mu\text{m}$ ]	5	0,8	3	3
$\Delta z$ [ $\mu\text{m}$ ]	6	7,5	1	3,5
n	50	13	7	50
Abtrag im Fokus $z_F$ , $c(n) \approx 100 \mu\text{m}$				
Qualität	Sz = $6,78 \mu\text{m}$	Rz = $0,94 \mu\text{m}$	Rz = $11,46 \mu\text{m}$	Rz = $2,18 \mu\text{m}$

Für  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  und Silizium konnten Kavitäten der Tiefe  $100 \mu\text{m}$  in 50 Ebenen erreicht werden. Für X38CrMoV5-1 und Glas konnten höhere Abtragraten bei schlechterer Qualität erzielt werden. Die Zielgröße  $Rz < 1 \mu\text{m}$  wurde im untersuchten Versuchsraum nur für X38CrMoV5-1 erzielt. Es haben sich für X38CrMoV5-1 und Glas deutliche Wandschrägen ausgebildet, die auf eine defokussierte Bearbeitung hinweisen. Aufgrund der geringen Oberflächenqualität kam es bei der Bearbeitung dieser zwei Kavitäten zu optischen Messfehlern bei

der automatisierten Bestimmung des Zustellinkrements und somit zu fehlerhaften Zustellungen von Ebene zu Ebene. Beim Glas weist die Kontur der Kavität zudem kleine Ausbrüche auf.

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem Schnelltest der Versuchsumfang deutlich reduziert werden kann. Aus dem Schnelltest resultieren Parameterkombinationen, die zur Strukturierung von dreidimensionalen Geometrien eingesetzt werden können. Meist handelt es sich jedoch bei den mittels Schnelltest gefundenen Parameterkombinationen nicht um die optimal aufeinander abgestimmten Parameter. Es wird davon ausgegangen, dass mit einem höheren Versuchsumfang als den 18 Versuchen aus dem Schnelltest ein deutlich besseres Bearbeitungsergebnis erzielt werden kann. Ausgehend von der gefundenen Parameterkombination kann bei Bedarf eine Parameteroptimierung vorgenommen werden.

Es bleibt also stets abzuwägen, ob der geringere Zeitaufwand oder die höhere Bearbeitungsqualität im Vordergrund der Untersuchungen stehen. Dieses sehr unterschiedliche Abtragverhalten für die hier dargestellten Materialien macht deutlich, welche wichtige Rolle der hier entwickelte Schnelltest für die Parametersuche zur Bearbeitung neuer Materialien einnimmt. Mit diesem ist es möglich effizient Prozessparameterkombinationen für die Bearbeitung neuer Materialien zu finden.

### **5.3 Entstehungsmechanismus unerwünschter Löcher im Bearbeitungsergebnis**

Oft treten beim Laserabtragen unerwünschte Löcher in der bearbeiteten Kavität auf wie bereits im Kenntnisstand beschrieben. Die Ursachen für die Entstehung der Löcher sind bis jetzt in der Literatur nicht hinreichend geklärt. Diese Löcher sind in ihrem Auftreten und in ihrer Lage nicht reproduzierbar, sondern entstehen scheinbar stochastisch bei gleichbleibenden Parametereinstellungen, wie in Abbildung 5-20 anhand von drei Kavitäten in WC-12Co dargestellt.

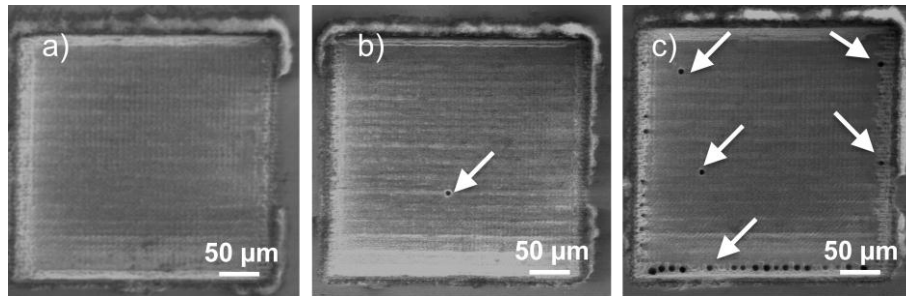


Abbildung 5-20: REM-Aufnahmen, Kavitäten in WC-12Co bei gleichen Parametereinstellungen,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$ ,  $dz = 1 \mu\text{m}$ , Prozessgas Druckluft 2 bar, mit a) keinen Löchern b) einem Loch im Flächengrund c) zahlreichen Löchern im Flächengrund, am Rand und in den Ecken

### 5.3.1 Klassifizierung und Einflussanalyse zur Entstehung von Löchern

Löcher treten im Flächengrund (Typ I), am Rand (Typ II) und in den Ecken (Typ III) von Kavitäten auf. Sie sind stets kreisrund (Abbildung 5-21, oben) und wurden für verschiedene Lasersysteme (unterschiedliche Wellenlängen, Pulsdauern, Repetitionsraten, Fokusburchmesser) sowohl im Scanbetrieb als auch im Achsbetrieb von Laserbearbeitungssystemen mit Fokusburchmessern von  $3 \mu\text{m}$  bis  $30 \mu\text{m}$  beobachtet [Wei-05, Läß-94, Kli-04]. Die Löcher weisen Durchmesser von  $3 \mu\text{m}$  bis  $10 \mu\text{m}$  auf und sind damit zum Teil deutlich kleiner als der Fokusburchmesser des Laserstrahls.

Der Bearbeitungsprozess wird von signifikanten Prozessparametern wie der Pulsleistung, dem Puls- und Bahnabstand, der Fokusbuchlage und der Bearbeitungsstrategie bestimmt. Von besonderem Interesse sind an dieser Stelle einzelne Löcher, die bei optimal aufeinander abgestimmten Pulsabständen, Bahnabständen, Pulsleistungen und Fokusbuchlagen scheinbar stochastisch entstehen oder auch ausbleiben (Abbildung 5-20, rechts) [Sch-10b]. Parameterkombinationen, die eine defektfreie Oberfläche mit einer Rauheit  $Rz \leq 1 \mu\text{m}$  in WC-12Co ermöglichen, werden hier als optimal aufeinander abgestimmte Parameter bezeichnet und eingesetzt.

Die in Abbildung 5-21 (links, oben) abgebildete quaderförmige Kavität weist Löcher auf und wurde durch 34 Ebenen, auf welchen die Fokusbuchlage von Ebene zu Ebene nachgeführt wurde, auf eine Tiefe von  $30 \mu\text{m}$  in das Hartmetall WC-12Co gefertigt. Zur Untersuchung von Form und Tiefe einzelner Löcher wurden hier mit Hilfe eines „Focused Ion Beam“ (FIB)-Systems Querschnitte einzelner Löcher angefertigt. Dafür wurde ein Loch im Flächengrund, am Rand und in der Ecke der Kavität ausgewählt. Die hier betrachteten Löcher unterscheiden sich deutlich in ihrer Tiefe, ihrem Durchmesser und ihrem Tiefenverlauf. Das Loch im

Flächengrund ist mit 40  $\mu\text{m}$  am tiefsten und läuft spitz zu (V-Form). Das Loch am Rand verläuft oben konisch und unten zylindrisch. Das Loch in der Ecke hingegen ist nur 15  $\mu\text{m}$  tief und zeigt eher eine bauchige U-Form (Abbildung 5-21, unten). Das Vorkommen von Löchern wurde bislang bei den Stählen X38CrMoV5-1 (1.2343) [Fle-07], Ck101 (1.1274) [Wei-05], 30CrMo6 (Toolox 44), X5CrNiMo12-9-1 (Corrax) und 100Cr6, dem Hartmetall WC-12Co (TSF44) [Sch-10b], einem Halbleitersilizium und einer Titanlegierung (Ti6Al2Sn4Zr2Mo) beobachtet.

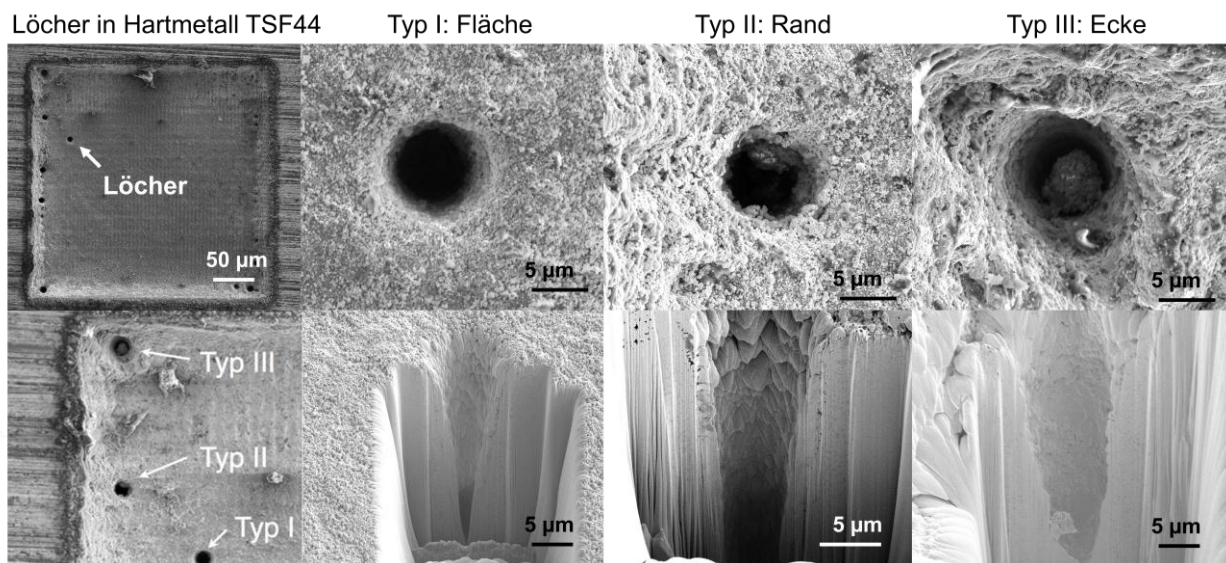


Abbildung 5-21: REM-Aufnahmen von Löchern einer gefertigten Kavität in WC-12Co,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$ ,  $dz = 1 \mu\text{m}$ , Druckluft 2 bar, laterale Großaufnahmen (oben), FIB (Focused Ion Beam)-Querschnittsaufnahmen (unten)

Die Einflussanalyse hat ergeben, dass die Einflussfaktoren zur Lochbildung primär aus den Bereichen der Laserquelle, der Maschine, des Prozesses, des Materials und der Umgebung stammen können (Abbildung 5-22). Die Laserquelle bzw. das Werkzeug wurde zu Beginn der Arbeit charakterisiert, so dass hier Störfaktoren ausgeschlossen werden können. Die zusätzlich genannten signifikanten Einflussfaktoren auf die Lochbildung werden schrittweise untersucht. Für die Versuchsreihe wird das Milieu bestmöglich konstant gehalten, indem der Abtragprozess in einer klimatisierten Umgebung bei gleichbleibender Temperatur erfolgt. So wird der Einfluss des Milieus in Form von Abtragpartikeln und des Prozesses, speziell der Fokusslage und des Materials auf die Entstehung von Löchern dargestellt. Damit können bereits wichtige Mechanismen identifiziert werden.

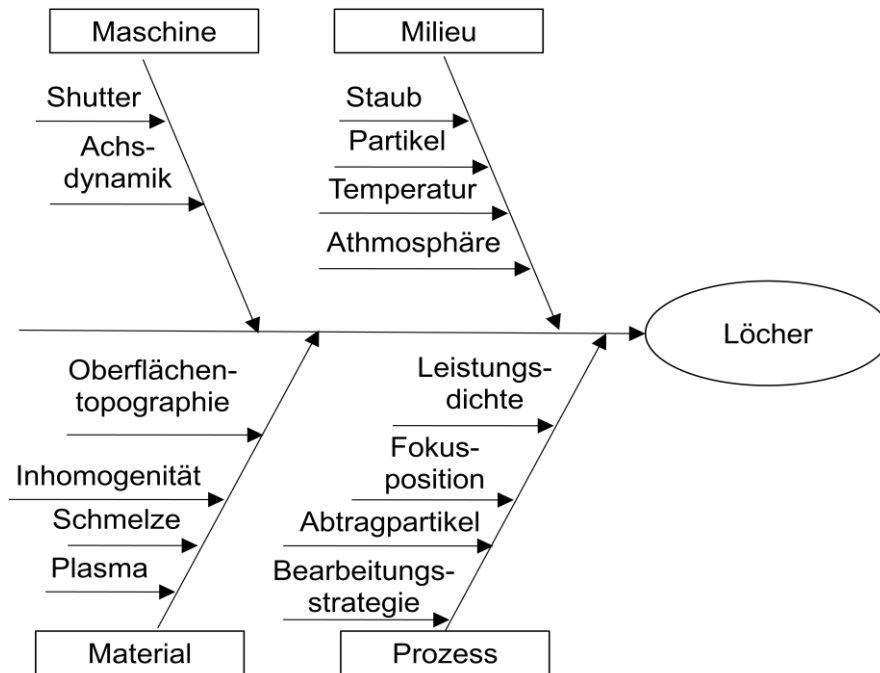


Abbildung 5-22: Ishikawa-Diagramm zu Entstehungsmechanismen von Löchern

### 5.3.2 Ergebnisse der Untersuchung zum Entstehungsmechanismus

Als ersten Schritt wird der Rand von Kavitäten näher betrachtet. Werden Beschleunigungs- und Abbremswege der Achsen durchgeführt ohne zuvor den Shutter zu schließen, so bilden sich tiefe Gräben in diesen Bereichen aus, wie Abbildung 5-23 zeigt.

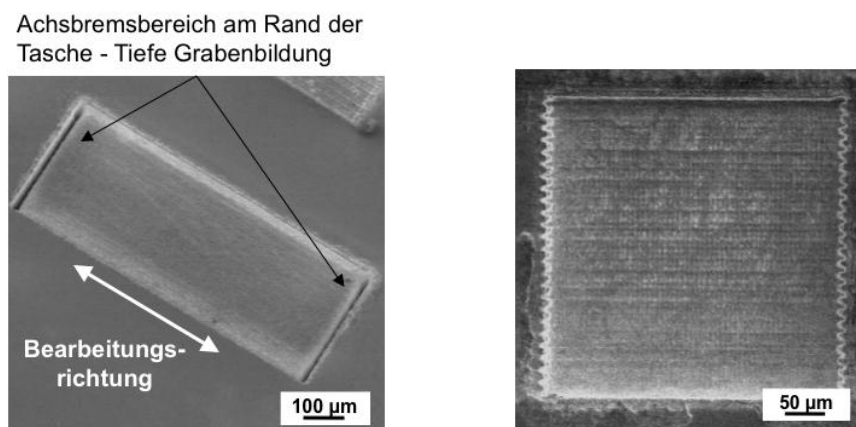


Abbildung 5-23: Abbrems-/Beschleunigungswege resultieren in tiefen Gräben bei der Bearbeitung mit offenem Shutter (links), Zackige Wandausbildung auf Grund von Differenz zwischen Shutter-Öffnungs- und -schließzeit, WC-12Co,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$ ,  $n = 30$ ,  $dz = 0,65 \mu\text{m}$

Das Zusammenspiel aus Achsdynamik und Shutterschließ- und -öffnungszeiten ist besonders für die Präzision bei der Ausbildung scharfer Kanten am Rand von Kavitäten wichtig. Der eingesetzte Shutter, der den Laserstrahl im Arbeitsraum zu- oder abschaltet, bringt unterschiedliche Schließ- (0,8 ms) und Öffnungszeiten (0,7 ms) mit sich, die über die Bearbeitungsstrategie kompensiert werden müssen. Andernfalls entsteht eine zackige Wandoberfläche, welche jedoch, wie in Abbildung 5-23 und Abbildung 5-24 zu sehen ist, nicht zur Ausbildung von Löchern am Rand führt.

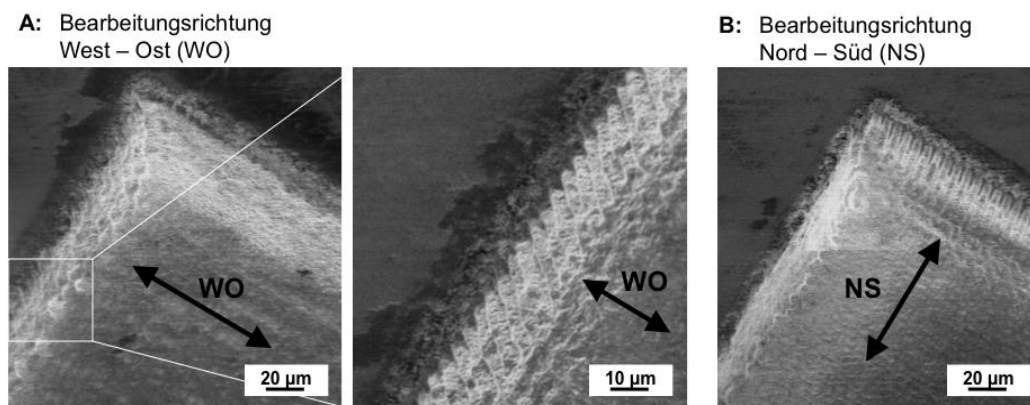
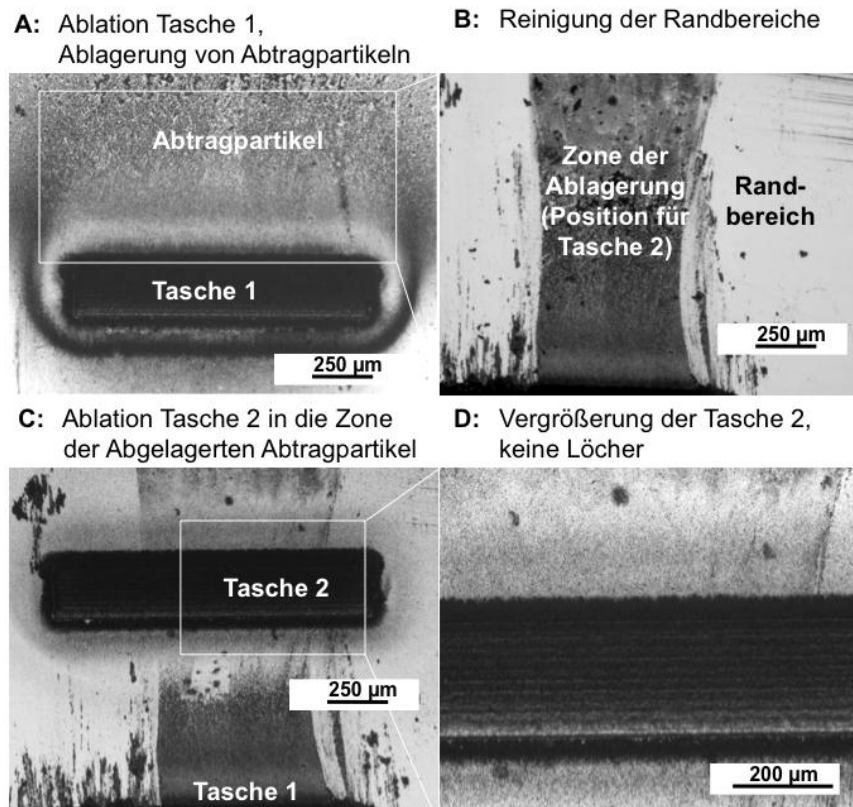


Abbildung 5-24: Einfluss der Bearbeitungsrichtung auf die Wandstruktur von Kavitäten, A: West-Ost (links), B: Nord-Süd (rechts), WC-12Co,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$ ,  $n = 30$ ,  $dz = 0,65 \mu\text{m}$

Anschließend wird der Einfluss von Abtragpartikeln auf die Lochentstehung anhand WC-12Co untersucht, indem zunächst gemäß dem Vorgehen aus Abbildung 5-25 Abtragpartikel auf die umliegende Oberfläche abgelagert werden. Dies erfolgt mittels der Ablation einer ersten Tasche (quadratische Kavität) ohne Prozessgas. In diesem Abtragpartikel vorhandenen Bereich wird anschließend eine zweite Tasche wie gewohnt mit Druckluft als Prozessgas ablatiert. Die Randbereiche der Zone werden zuvor gereinigt, um sicher gehen zu können, dass der Einfluss der Abtragpartikel in der Mitte im Vergleich zum Randbereich deutlich wird. Aus diesem Grund wird diese zweite Tasche über beide Bereiche ablatiert (Abbildung 5-25, C). Wie in Abbildung 5-25 (D) dargestellt, weist die resultierende Oberfläche der zweiten Tasche keine Löcher auf. Ein Einfluss der Abtragpartikel auf die Entstehung von Löchern für WC-12Co konnte in diesem Versuch nicht festgestellt werden.



*Abbildung 5-25: Vorgehen bei der Untersuchung des Einflusses von Abtragpartikeln auf die Lochentstehung, WC-12Co,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n = 20$ ,  $dz = 0,964 \text{ }\mu\text{m}$*

Weitere Versuche zeigen, dass bei der Fertigung tieferer Taschen eine Ablagerung von Abtragpartikeln und/oder Schmelze in den Ecken und an den Rändern der Taschen zu beobachten ist. Abbildung 5-26 (links) visualisiert die Ablagerungen an einer ungereinigten Probe. Hier ist in der oberen rechten Ecke in den Ablagerungen ein Loch entstanden. Abbildung 5-26 (rechts) zeigt die Probe nach der Reinigung im Ultraschallbad (Reinigungsmedium Aceton). Ablagerungen an der umliegenden Oberfläche und in der Tasche können so nach der Bearbeitung beseitigt werden und entstandene Löcher werden oft erst jetzt deutlich sichtbar. Zur Untersuchung des Einflusses von Schmelzeanhäufungen auf die Lochbildung wird gezielt ein Schmelzeaufwurf in den Diagonalen der quadratischen Fläche generiert und das dortige Verhalten der Lochausbildung beobachtet.



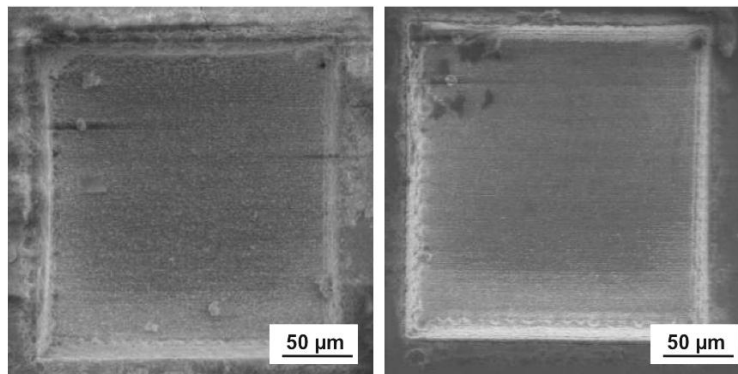


Abbildung 5-26: REM-Aufnahme einer ungereinigten Proben nach der Bearbeitung (links), gereinigte Probe (rechts), WC-12Co,  $H = 240 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $dz = 0,964 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n = 30$

Abbildung 5-27 zeigt die gefertigte Tasche nach  $n = 1, 5, 10, 20$  Ebenen. Der Schmelzeaufwurf wird bereits nach der ersten Überfahrt ausgebildet. Nach der Bearbeitung von zehn Ebenen werden an den Schmelzeaufwürfen, am Rand und in der Ecke erste Löcher detektiert. Nach 20 Ebenen wird zudem ein Anstieg der Löcheranzahl in der Diagonalen, in der Fläche, am Rand und in den Ecken festgestellt.

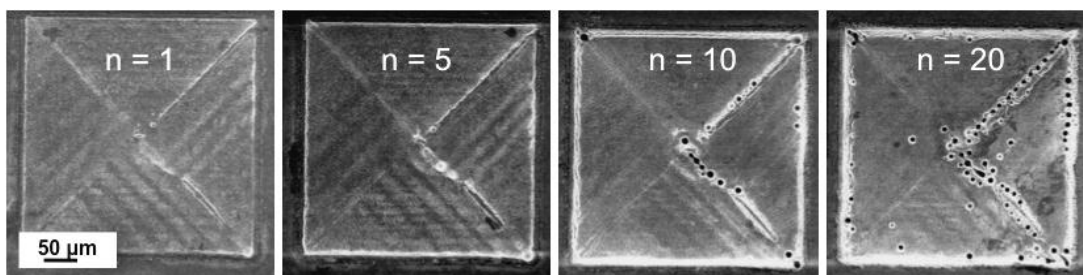


Abbildung 5-27: Entstehung von Löchern im Bereich des Schmelzeaufwurfs, WC-12Co,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $dz = 0,964 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $z_{OF}$

Eine mögliche Ursache kann die Reflexion des Strahls an den Schmelzeanhäufungen sein, da sich die Schmelzaufwürfe bis zu  $10 \text{ }\mu\text{m}$  hoch ausbilden. Damit kann festgehalten werden, dass an deutlich aus der Fläche ragenden Aufwürfen ( $\geq 10 \text{ }\mu\text{m}$ ) Löcher nach mehrfacher Überfahrt entstehen. Dieses Verhalten der Lochentstehung wird insbesondere für die Wandbereiche angenommen, an welchen Ablagerungen verstärkt anhaften. Die Laserstrahlung in diese Ablagerungsbereiche führt zur Entstehung von Löchern.

Eine neue Bearbeitungsstrategie, die das kleiner werden der Flächen von Ebene zu Ebene vorsieht verhindert das Einwirken des Lasers in die Ablagerungen am Rand. Dafür wird die Bahnlänge ( $x$ ) und die -anzahl ( $y$ ) von Ebene zu Ebene verringert. Abbildung 5-28 zeigt das lochfreie Ergebnis der Bearbeitung.

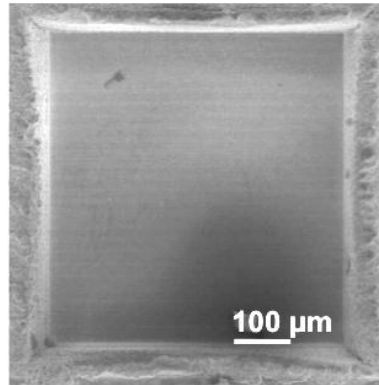


Abbildung 5-28: REM-Aufnahme, WC-12Co,  $H = 240 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \text{ µm}$ ,  $BA = 3 \text{ µm}$ ,  $dz = 0,964 \text{ µm}$ , Bearbeitung in  $z_{OF}$ , Verkleinerung  $x = 1,2 \text{ µm}$  nach jeder Ebene,  $y = 1 \text{ µm}$  nach jeder 2. Ebene

Versuche zur Signifikanz der Wahl der Fokusslage auf die Lochbildung ergaben, dass bei der defokussierten Bearbeitung von WC-12Co bereits bei der ersten Überfahrt kleinste Löcher mit einem mittleren Durchmesser von  $1 \text{ µm}$  entstehen, die bei weiterer defokussierter Bearbeitung in nur wenigen Ebenen deutlich vergrößert werden. Abbildung 5-29 visualisiert die Entstehung von kleinsten Löchern und die Verstärkung durch die defokussierte Bearbeitung mit einer Fokusposition von  $z = +0,13 \text{ mm}$  oberhalb der Werkstückoberfläche.

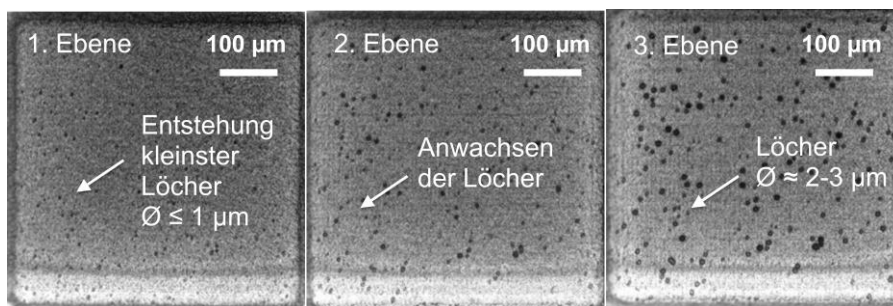


Abbildung 5-29: WC-12Co, Löcherentstehung und -vergrößerung, REM-Aufnahmen von Ebene 1 (links), 2 (Mitte) und 3 (rechts) einer defokussiert bearbeiteten Kavität, Fokus:  $130 \text{ µm}$  oberhalb der Werkstückoberfläche,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ,  $PA = 5 \text{ µm}$ ,  $BA = 3 \text{ µm}$ ,  $dz = 1 \text{ µm}$

Damit sind die Löcher im Anfangsstadium weitaus kleiner als der Fokussdurchmesser. Abbildung 5-30 veranschaulicht anhand von REM-Aufnahmen die Lochausbildung innerhalb der ersten zehn Ebenen der Ablation. Von Ebene zu Ebene wird der Fokus um jeweils  $1 \text{ µm}$  nachgestellt. Bereits nach sieben defokussierten Abtrageebenen beträgt der durchschnittliche Durchmesser der Löcher  $5 \text{ µm}$  und wird bei weiterer Bearbeitung nicht mehr maßgeblich aufgeweitet (Abbildung 5-31).

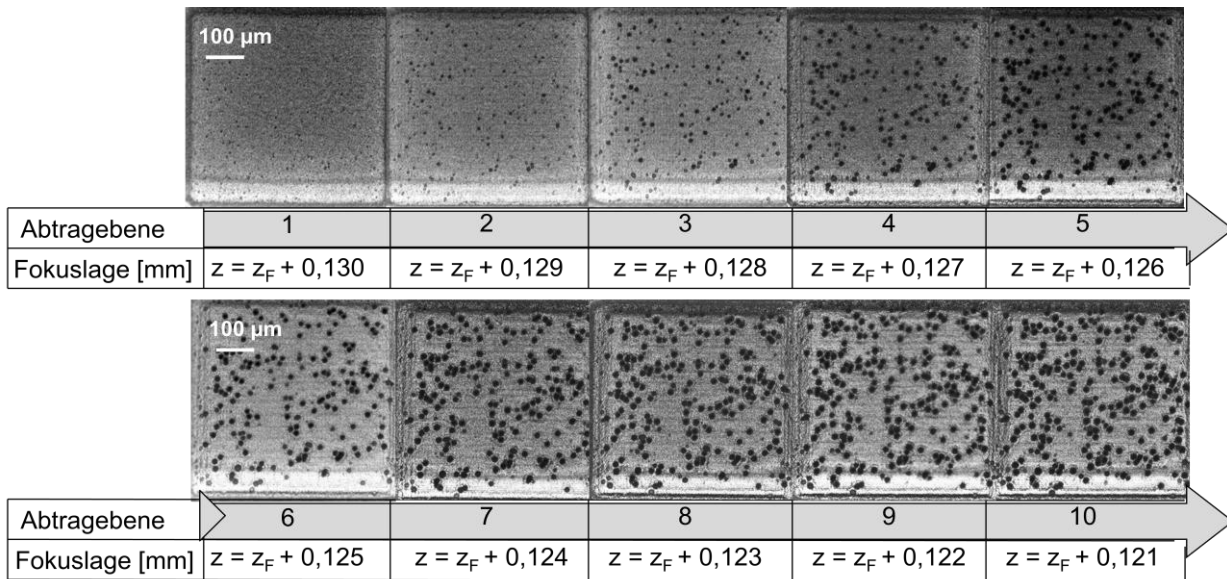


Abbildung 5-30: WC-12Co, Lochausbildung einer defokussiert bearbeiteten Kavität in  $n = 10$  Ebenen, anfängliche Fokusposition  $z(n = 1)$  liegt  $130 \mu\text{m}$  oberhalb der Werkstückoberfläche,  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 3 \mu\text{m}$ ,  $dz = 1 \mu\text{m}$

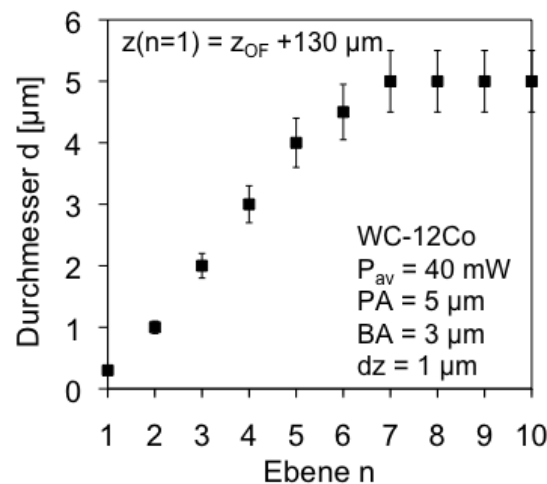


Abbildung 5-31: Lochwachstum bei defokussierter Bearbeitung, Fokus  $130 \mu\text{m}$  oberhalb der Werkstückoberfläche

Zur weiteren Untersuchung des Einflusses der Fokuslage werden Kavitäten, bestehend aus mehreren Ebenen mit ausgehenden Fokuslagen oberhalb, direkt auf und unterhalb der Werkstückoberflächen abgetragen. Die Fokuslage wird für die Versuchsreihen von Ebene zu Ebene mit konstanten Zustellungsinkrementen nachgeführt. Abbildung 5-32 visualisiert das Abtragergebnis bei ausgewählten Parameterkombinationen in Form von REM-Aufnahmen.

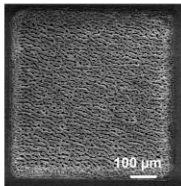
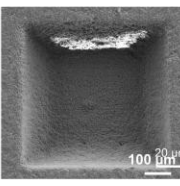
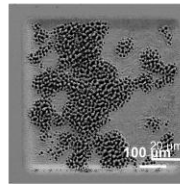
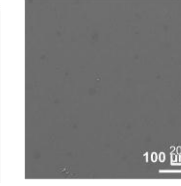
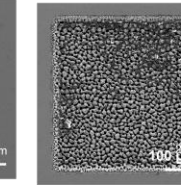
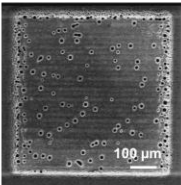
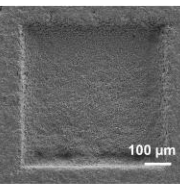
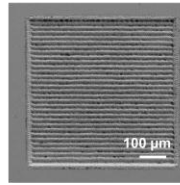
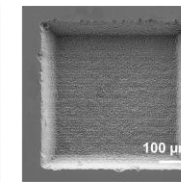
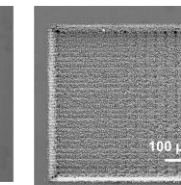
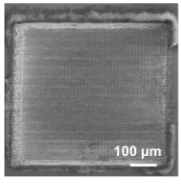
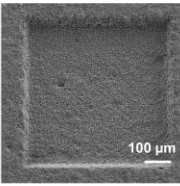
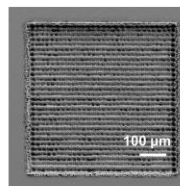
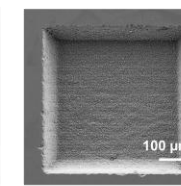
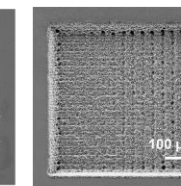
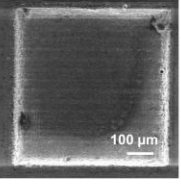
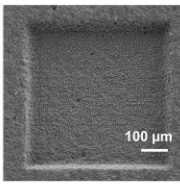
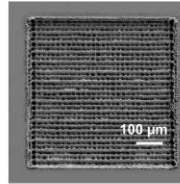
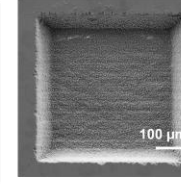
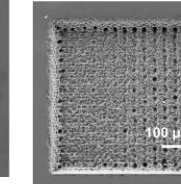
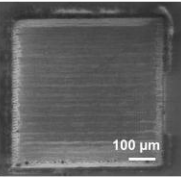
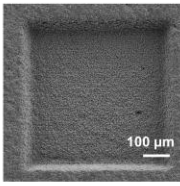
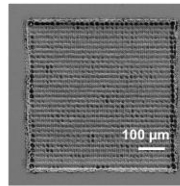
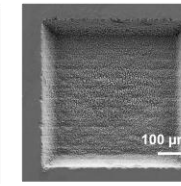
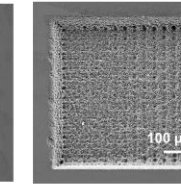
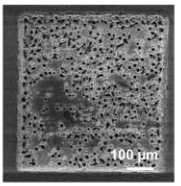
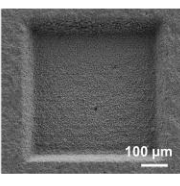
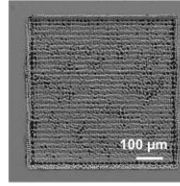
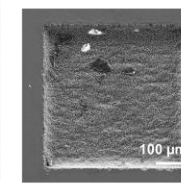
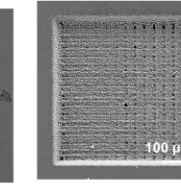
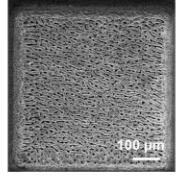
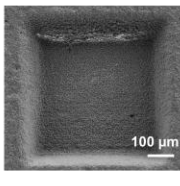
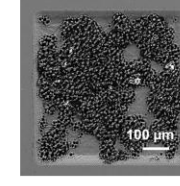
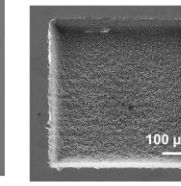
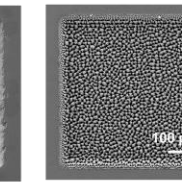
Material	WC-12Co	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>	X38CrMoV5-1	Glas	Si
P <sub>av</sub> [mW]	40	40	10	10	6
PA [μm]	5	5	4	3	3
BA [μm]	3	5	2	3	3
Δz [μm]	1	11	0,6	1	3,5
n	20	6	9	7	9
z [mm]					
+0,1					
+0,04					
+0,02					
z <sub>F</sub> = 0					
-0,02					
-0,04					
-0,1					

Abbildung 5-32: Einfluss der Fokusslage auf das Bearbeitungsergebnis und die Entstehung von Löchern für WC-12Co, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, X38CrMoV5-1, Glas und Si

Die Versuche zeigen, dass bei einer defokussierten Bearbeitung Löcher nur beim Hartmetall WC-12Co, Stahl 1.2343 (X38CrMoV5-1) und Silizium auftreten. Bei der Mischkeramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  wurden dagegen keine Löcher entdeckt. Die Bearbeitungsergebnisse für WC-12Co und den X38CrMoV5-1, bei welchen der Laserfokus  $40\ \mu\text{m}$  oberhalb ( $z = z_F + 40\ \mu\text{m}$ ) der Werkstückoberfläche angeordnet war und für das Silizium bei welchem der Laserfokus  $20\ \mu\text{m}$  oberhalb ( $z = z_F + 20\ \mu\text{m}$ ) der Werkstückoberfläche angeordnet war, zeigen, dass nur stellenweise Löcher aufgetreten sind. In ihrer Umgebung ist eine gute Oberflächenqualität ( $R_z < 1\ \mu\text{m}$ ) zu erkennen, die einen gut abgestimmten Puls- und Bahnabstand belegt.

### 5.3.3 Diskussion zur Entstehung von Löchern

Die Versuche machen deutlich, dass die Fokuslage einen großen Einfluss auf die Lochentstehung hat. Bei defokussierter Bearbeitung treten gehäuft Löcher auf.

Die Löcher treten nur bei der Bearbeitung Schmelze bildender Materialien auf, weshalb hier davon ausgegangen wird, dass für diese Materialien die Pulsspitzenleistung auch defokussiert noch zur Materialschmelzung und zur Bildung kleinster Dampfkapillaren bzw. Löchern ausreicht.

Poprawe [Pop-05] beschreibt zudem, dass ein Dampfplasma das Laserlicht streuen oder Druck auf die Schmelze ausüben kann, was zur Deformation der Schmelzeoberfläche und bis zur Bildung einer Dampfkapillare führen kann, die sogar weit in das Werkstück hineinragt [Pop-05]. Anhaltspunkte für die Entstehung einer Dampfkapillare die schlagartig zu tiefen Löchern führt wurden in dieser Arbeit nicht gefunden. Die Versuche zeigen, dass Löcher erst durch mehrfache Überfahrt verstärkt werden und nicht schlagartig entstehen und somit die Hypothese von Läßiger [Läß-94] und Weikert [Wei-05] unterstreichen, in welcher sie von einer Verstärkung der Löcher durch Mehrfachreflexionen ausgehen.

Der Aspekt, dass das Laserlicht an einem Dampfplasma gestreut werden kann, wird durch die Arbeiten von Breitling [Bre-09] und Steglich [Ste-10], die die Plasma- und Materialdampfwolkeentstehung und Abschirmung während der Bearbeitung mit fs- und ps-Pulsdauern für UV-Strahlung untersuchten, untermauert. Aufbauend auf deren Erkenntnissen ist die Entstehung von kleinsten Löchern durch Streuung durchaus denkbar. Breitling zeigt in seiner Arbeit, dass bis zu  $2\ \text{ms}$  nach dem Auftreffen des Laserpulses auf der Materialoberfläche eine turbulente Materialdampfwolke oberhalb der Einwirkzone detektiert wird. Von diesem Sachverhalt lässt sich ableiten, dass der Laserstrahl an der turbulenten Materialdampfwolke des vorangehenden Pulses gestreut wird

und so zu stochastisch auftretenden Defekten im Abtragergebnis führen kann. In der Turbulenz der auftretenden Materialdampf Wolke wird die Ursache für das stochastische Auftreten der Löcher vermutet.

Steglich [Ste-10] hält zudem fest, dass beim Auftreffen des ersten Pulses auf die Oberfläche ein Plasma mit der höchsten Intensität entsteht, welches sich bei den darauffolgenden Pulsen einem stetigen Wert nähert. Die ersten Pulse befinden sich stets am Rand der Taschen, so dass hier eine Streuung des folgenden Laserpulses am Plasma als Entstehungsmechanismus von Löchern am Rand und in den Ecken vermutet werden kann. Somit ist das Wechselwirken der Laserstrahlung mit dem Plasma und der Materialdampf Wolke als Entstehungsursache denkbar und bedarf weiterführender Forschung auf diesem Gebiet. Abbildung 5-33 hält im Ursache-Wirkungsdiagramm diese Zusammenhänge fest und zeigt weitere Querbeziehungen, die bei der Entstehung von Löchern einen Einfluss haben können.

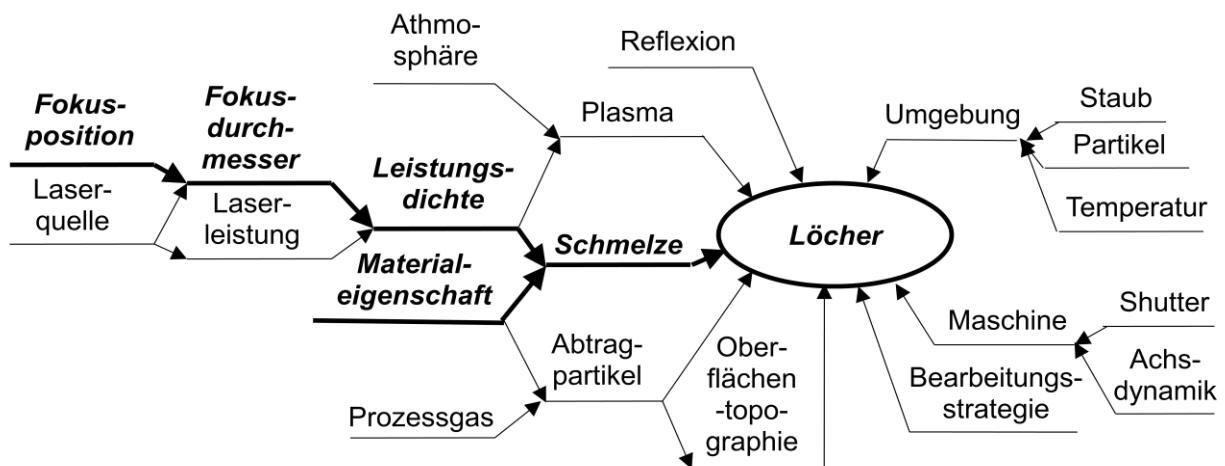


Abbildung 5-33: Ursache-Wirkungs-Diagramm (erweiterte Darstellung mit Querbeziehungen) zu Entstehungsmechanismen von Löchern

Es lässt sich erkennen, dass Löcher nur bei Schmelze bildenden Materialien beobachtet wurden und besonders stark bei defokussierter Bearbeitung. Eine saubere Strahlführung und eine zuverlässige Fokuslagenpositionierung gewinnt dadurch eine umso bedeutendere Rolle. Aus diesen Gründen werden nachstehend neue Ansätze zur Fokuslagenpositionierung und –regelung unter Nutzung optischer und akustischer Prozessemissionen entwickelt.

## 5.4 Analyse akustischer und optischer Emission

Für die Analyse akustischer und optischer Emission wird im ersten Schritt der Versuchstand zur Datenerfassung, Auswertung und Weiterverarbeitung

aufgebaut und darauf basierend das Verhalten der akustischen und optischen Emission in Abhängigkeit von Prozessgrößen erfasst und diskutiert.

#### **5.4.1 Einheit zur Erfassung akustischer (AE) Emissionen**

Die entwickelte Messkette zur Erfassung akustischer Emissionen setzt sich aus einem Sensor (Luftschallmikrofon oder Körperschallsensor), einem Vorverstärker, einem Datenerfassungssystem und einem Auswertesystem zusammen [Kol-06, Ler-09, Vei-05]. Der Sensor erfasst die zu messende akustische Größe und liefert als Ausgangssignal ein der Größe proportionales elektrisches Signal. In der vorliegenden Arbeit wird die elektrische Spannung gemessen. Ein Vorverstärker sorgt für die Versorgung des Sensors, die Signalverstärkung und die Impedanzanpassung an den Eingang des Datenerfassungssystems. Das Datenerfassungssystem ermöglicht eine Signalverstärkung, eine Potentialtrennung, eine Filterung, eine A/D-Wandlung und die Sensorversorgung. Als Auswertesystem dient ein an das Datenerfassungssystem angeschlossener Messrechner mit der Software LabVIEW von National Instruments (NI) [Kol-06]. In der Software LabVIEW wird mit dem Sound and Vibration Toolkit (NI), welches spezielle Module zur Untersuchung von akustischen Signalen bereitstellt, gearbeitet. Hier werden Programme entwickelt, die Messdaten automatisiert speichern, die Datenverarbeitung und Auswertung vornehmen und abschließend das ausgewertete Signal an den Maschinensteuerungsrechner übergeben. Dort wird das Signal in eine Prozessgröße, wie beispielsweise die z-Achsen-Position des Laserfokus gewandelt und zur Steuerung genutzt. Abbildung 5-34 zeigt den schematischen Versuchsaufbau der entwickelten Messkette zur Akquisition akustischer Luft- und Körperschallemissionen bei der Laserablation.

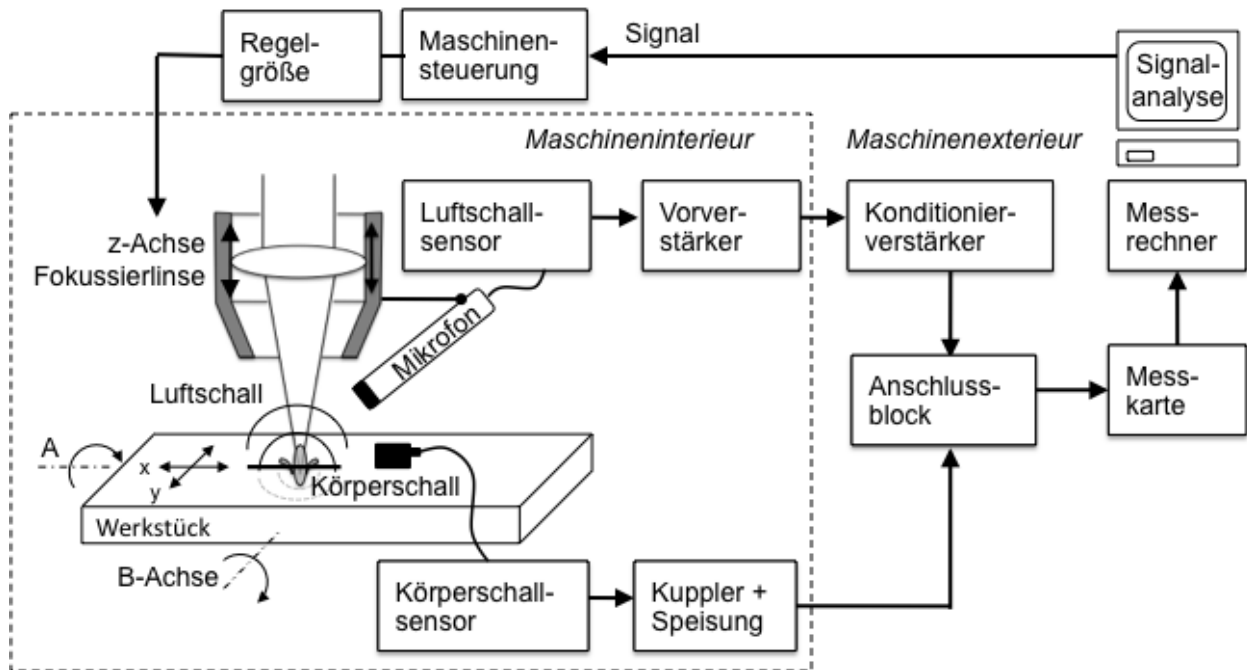


Abbildung 5-34: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und der Messkette zur Akquisition akustischer Emissionen bei der Laserablation

#### 5.4.1.1 Auswahl des Schallsensors

Die Prozessregelung bei der Mikrolaserablation mittels Luft- oder Körperschall birgt Vor- und Nachteile in der jeweiligen Nutzung der AE zur Regelung. In beiden Fällen hat die Entfernung der Schallquelle zum Schallsensor einen Einfluss auf die zu messenden Schallfeldgrößen (Schalldruck etc.). Abbildung 5-35 verdeutlicht die Abstandsänderung der Schallquelle zum Körper- und Luftschallsensor. Die Luftschallemissionen werden berührungslos über das Medium Luft übertragen, wobei die Körperschallerfassung über befestigte Sensoren erfolgt. Bei der Körperschallerfassung breitet sich die Emission primär im festen Medium aus, so dass die Laufzeit des Messsignals signifikant vom Werkstückmaterial abhängt und zunächst in einer Referenzmessung ermittelt werden muss. Bei der Erfassung von Körperschallemissionen ist die Ankopplung (Kleben, Schrauben, Anpressen) des Körperschallsensors an das Werkstück von immenser Bedeutung, um die Körperschallwellen sicher aufzunehmen.

Im hier verwendeten Versuchsaufbau wird das Werkstück auf der x-/y-Achse unterhalb des senkrecht einfallenden Laserstrahls verfahren. Während der Bearbeitung variiert bei der Körperschallerfassung der Abstand  $\Delta x$  bzw.  $\Delta y$  von der Emissionsquelle zu einem fest auf der Werkstückoberfläche angekoppelten Körperschallsensor. Gerade bei der Strukturierung von Mikrobauteilen ist die Ankopplung von relativ großen Körperschallsensoren größenbedingt erschwert oder oft nicht möglich.



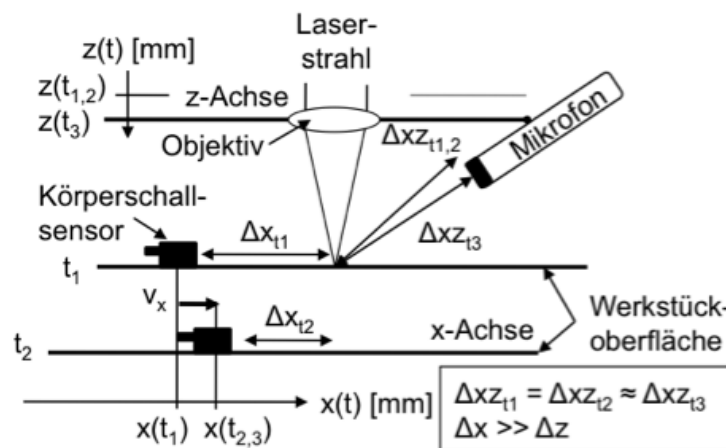


Abbildung 5-35: Verdeutlichung der Distanzänderungen der Schallquelle zum Körper- und Luftschallsensor während der Laserstrukturierung

Luftschallsensoren hingegen arbeiten berührungslos, wie das Laserverfahren selbst auch. Das Laserfokussierobjektiv und das Luftschallmikrofon sind beide fest auf der z-Achse montiert, so dass der Abstand des Mikrofons zur Laserfokustaille stets konstant ist. Die Zustellung der Laserstrahltaile auf den Grund einer Kavität erfolgt dabei in den gleichen Inkrementen wie die des Mikrofons. Damit ist die nahezu konstante Distanz zwischen Schallquelle (Laser) und Mikrofon für die Luftschallerfassung gegeben.

Tabelle 5-10 fasst die Vor- und Nachteile der Erfassung von Luft- oder Körperschall während der Mikrolaserablation zusammen. Das Abwiegen der Vor- und Nachteile der Körper- und Luftschallerfassung ergibt, dass die Luftschallerfassung mehr Vorteile mit sich bringt und deshalb im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht wird.

Tabelle 5-10: Gegenüberstellung und Bewertung von Merkmalen des Laserabtragens, der Körper- und Luftschallaufnahme

Laserabtragen	Körperschall		Luftschall	
Berührungslose Bearbeitung	Körperschallaufnahme durch festen Kontakt des Sensors mit der Probe	-	Berührungslose Luftschallaufnahme	+
Gute Miniaturisierbarkeit der Strukturen	Sensorbefestigung auf Mikrobauteilen oft nicht möglich	-	Flexibel einsetzbar	+
Material	Laufzeitverhalten stark abhängig	-	Laufzeitverhalten konstant da in Luft	+
Akustische Emission	Frequenzaufnahme: Hz - MHz		Frequenzaufnahme: Hz - kHz	

### 5.4.1.2 Spezifischer Versuchsaufbau zur Luftschallerfassung

Abbildung 5-36 visualisiert die spezifische Messkette zur Erfassung von Luftschall, der im Folgenden als AE bezeichnet wird. Die akustischen Luftschallemissionen werden mit einem Brüel & Kjær Freifeldmikrofon (Frequenzspektrum: 6,3 Hz - 20 kHz, Sensitivität: 50 mV/Pa, Dynamik: 14,6 - 146 dB) zuzüglich eines Vorverstärkers und einer Konditionierverstärkereinheit erfasst. Die Signalkonditionierung fungiert als Schnittstelle zwischen Rohsignal, dem Sensorausgang und dem Messgerät. Hier kann die Signalverstärkung und die Filterung eingestellt werden. Die verwendeten Parameter lauten: Hochpassfilter 10 Hz, Tiefpassfilter 22,4 kHz und Ausgangsmessempfindlichkeit 1 V/Pa. Dieser Aufbau ist für hochpräzise Messungen mit hoher Genauigkeit für Frequenzen bis zu 20 kHz ausgelegt. Anschließend werden die Signale über geschirmte Kabel, einen geschirmten Anschlussblock und eine Messkarte an den Messrechner übergeben.

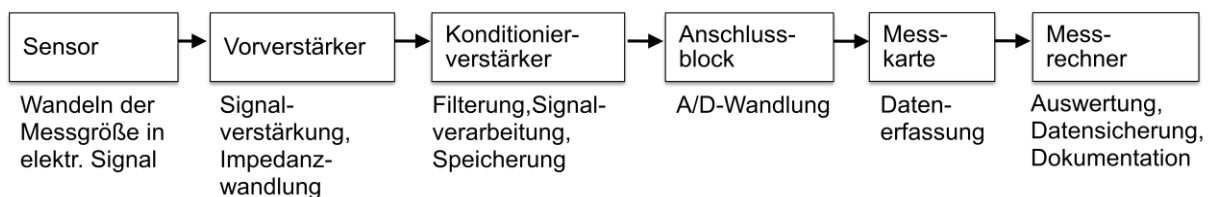


Abbildung 5-36: Blockdiagramm der akustischen Messkette zur AE Erfassung

Das Mikrofon ist im Winkel von 45° bei einem Abstand von 50 mm zur Emissionsquelle positioniert (Abbildung 5-37) unter der Berücksichtigung der Richtcharakteristik des Mikrofons, welche die Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel und der Frequenz des Schalls beinhaltet. Die gewählte Abtastrate beträgt 60 kHz. Dies entspricht dem dreifachen der mit diesem Aufbau maximal messbaren Frequenz von 20 kHz und erfüllt das Nyquist-Shannon Theorem, welches besagt, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch sein muss wie die höchste relevante Frequenzkomponente des Messsignals, um das Signal akkurat und ohne Informationsverlust zu rekonstruieren [Kol-06]. Die gemessene Spannung für das akustische Signal wird über die Messkarte an den Messrechner zur Signalverarbeitung weitergeleitet. Die Datenerfassung, Auswertung und Signalverarbeitung in LabVIEW bietet die Möglichkeit einer automatisierten Regelung durch selbständige Kommunikation und Signalübergabe an den Maschinensteuerungsrechner.

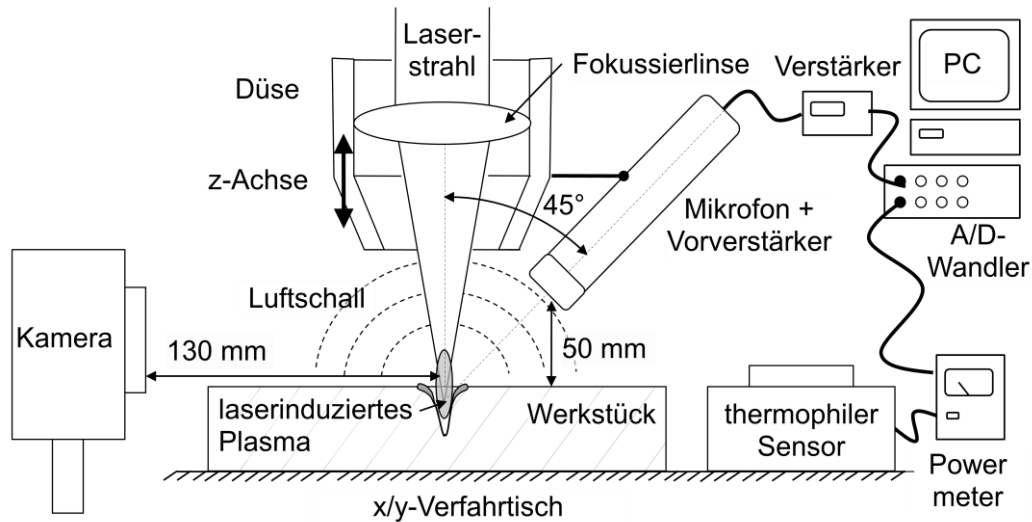


Abbildung 5-37: Skizze der Sensoranordnung

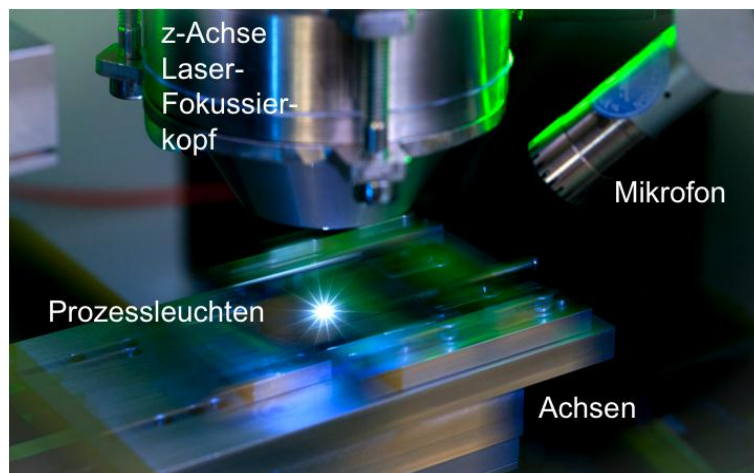


Abbildung 5-38: Aufnahme des Versuchsaufbaus

Für die Datenauswertung werden statistische Auswerteverfahren herangezogen. Zunächst wird das erfasste Zeitsignal als Summe unendlich vieler harmonischer Einzelschwingungen mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt. Die Signalamplitude wird zudem in Dezibel [dB] umgerechnet. Die erfassten Frequenzpeaks sind Vielfache der Anregungsfrequenz  $f_{\text{rep}} = 1 \text{ kHz}$  (Abbildung 5-39, links). Diese werden mit einer Abweichung von 2 bis 4 Hz detektiert. Für die Signalanalyse wird der Frequenzbereich um -2 Hz bis +4 Hz der Vielfachen erweitert. Im Folgenden werden diese Frequenzbereiche aus Gründen der einfacheren Handhabung lediglich als ganzzahlige kHz Frequenzen bezeichnet. Das Rauschen zwischen den ganzzahligen Vielfachen wird herausgefiltert, um das Datenvolumen zu minimieren.

Der Schwellwert zur Erfassung der AE wird durch Fokussierung der Laserstrahlung in der Luft deutlich oberhalb des Werkstücks erfasst. Ab einer mittleren Laserleistung von 32 mW entsteht ein Luftplasma mit deutlichen akustischen Emissionen. Bei der maximal eingesetzten Laserleistung von 80 mW bildet sich ein sichtbares Luftplasma, welches ein akustisches Signal der Anregungsfrequenz und ihre Vielfachen von bis zu 60 dB emittiert (Abbildung 5-39, links). Der Schwellwert zur Erfassung der akustischen Emissionen während der Laserablation wird deshalb auf 65 dB gesetzt. Das Frequenzspektrum unterhalb von 8 kHz weist ein starkes Signalrauschen auf, weshalb diese niedrigen Frequenzen aus den Untersuchungen ausgenommen werden.

Die Untersuchung der Störgeräusche der Umgebung ergibt, dass die Nutzung einer Druckpistole mit 6 bar in 2,5 m Entfernung zum Maschinenraum deutlich akustisch detektierbar ist. Auch das Zuschlagen der Tür zur Klimazelle wird im Maschinenraum wahrgenommen. Beide Störsignale lassen sich aber klar von den Ablationssignalen trennen. Die Signalamplituden der Vielfachen der Anregungsfrequenz, die während der Ablation erfasst werden, liegen für Frequenzen oberhalb von 14 kHz deutlich über den Amplituden der möglichen Störgrößen (Abbildung 5-39, rechts) und können somit als robuste Regelgrößen angesehen werden. Dennoch sollte die Umgebung stets akustisch abgeschirmt sein, um negative Umgebungseinflüsse auszuschließen.

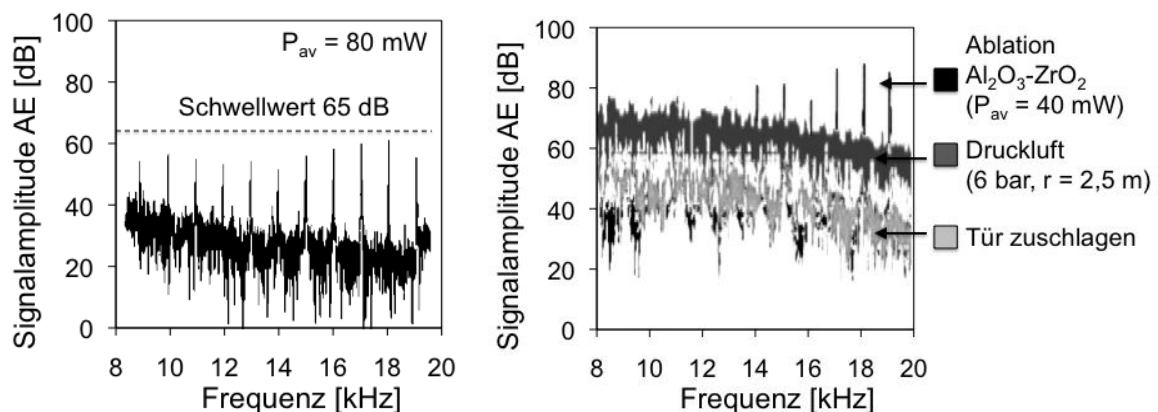


Abbildung 5-39: Schwellwerterfassung der AE nach FFT bei Laserfokussierung in Luft,  $P_{av} = 80 \text{ mW}$ ,  $H = 320,2 \text{ J/cm}^2$  (links), Überlagerung des akustischen Signals bei der Bearbeitung von  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  mit  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ , mit dem Zuschlagen der Eingangstür zur Klimazelle und dem Geräusch einer Druckluftpistole in 2,5 m Entfernung (rechts)

Die aufgenommenen akustischen Luftschallemissionen unterliegen Signalausreißern, deren Entstehung unter anderem im un stetigen Ablationsverhalten des Verdampfens vermutet wird. Um solche Ausreißer

weniger stark zu gewichten, werden die erfassten Signale einer Bahn mittels statistischer Verfahren (Median, Quartil, Minimum, Maximum) ausgewertet. Die Bahnlänge  $L$  wird so gewählt, dass ausreichend Datenpunkte in einer Bahn gesammelt werden. Die optimale Bahnlänge  $L$  liegt bei 0,3 bis 0,4 mm. Abbildung 5-40 zeigt ein ausgewertetes Diagramm der 11 kHz-Frequenz nach der FFT bei variierenden  $z$ -Positionen je ablatierter Bahn. Jeder Box-Plot entspricht 100 Messpunkten der AE einer ablatierten Bahn der Länge  $L = 0,4$  mm. Deutlich zu erkennen ist die ausgeprägte Streuung der aufgenommenen Messdaten der 11 kHz-Frequenz. Die sechzehnte Bahn entspricht der optisch ermittelten Fokusposition  $z_{OF} = 0$  mm. Die Darstellung des Medians ermöglicht trotz großer Signalstreuung bei 100 Messwerten pro Bahn eine sichere Gewichtung der Häufigkeit des Messwertes.

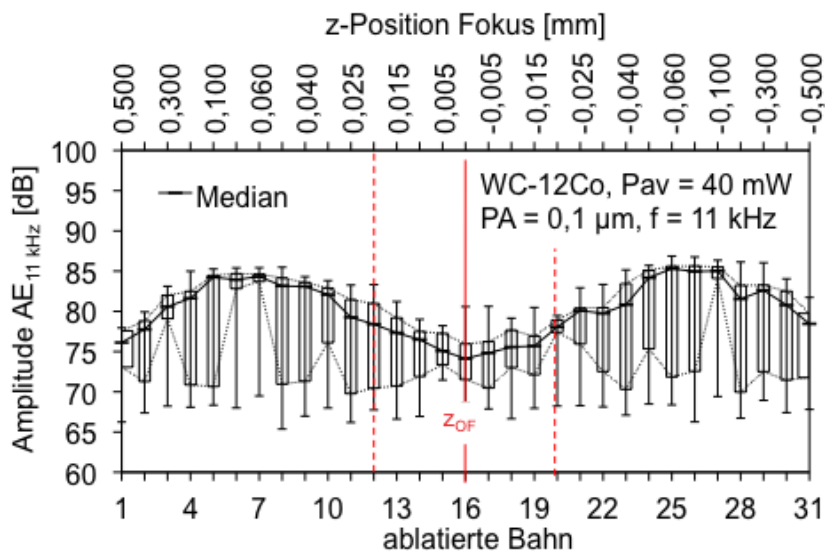


Abbildung 5-40: Box-Plot der 11 kHz-Frequenz nach der FFT bei der Ablation von 31 Bahnen mit unterschiedlichen Fokuspositionen  $z$

#### 5.4.2 Einheit zur Erfassung optischer (OE) Emissionen

Des Weiteren erfolgt parallel die Erfassung des Prozessleuchtens optisch mittels eines CMOS-Sensors (Nikon D7000 SLR) mit einem Objektiv (AF Micro-Nikkor, Brennweite 60 mm, max. Blende 1:2,8). Dabei wird der Sensor im Abstand von 130 mm mittels einer speziell konzipierten Aufnahme neben der Laser-/Material-Wechselwirkungszone und der damit einhergehenden Prozessleuchtquelle positioniert. Als Auswertekriterium des Prozessleuchtens wird dessen flächenmäßige Ausbreitung ( $x/z$ -Ebene) gewählt. Die Vermessung der Fläche des Prozessleuchtens erfolgt mit Hilfe einer Software, indem eine selbständige Ermittlung einer Fläche gleicher Farbwerte anhand einer Farbwertvorgabe

erfolgt. Die Begrenzung einer Fläche wird dabei durch ein Polygon mit variabler Anzahl an Eckpunkten definiert. Die Stärke des Prozessleuchtens wird somit als ein Wert der flächenmäßigen Ausbreitung in Pixel errechnet und dient als objektive Größe der Intensität des Prozessleuchtens.

### 5.4.3 Einflussanalyse und Versuchsplanung

Der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen (Prozessparameter, Material) und den Ausgangsgrößen (akustische Emissionen AE, Prozessleuchten PL (OE) und Bearbeitungsergebnis) wird im Folgenden auf Basis experimenteller Untersuchungen erarbeitet. Der Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen wird festgehalten und dient als Basis für die Prozessregelung mittels akustischer Emissionen. Für die Einflussanalyse wird mit Hilfe von Erfahrungswerten und Vorversuchen abgeschätzt, welche Einflussfaktoren eine Wirkung auf das akustische und optische Signal ausüben. Die identifizierten signifikanten Zusammenhänge der Einflussgrößen sind in Abbildung 5-41 in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm dargestellt.

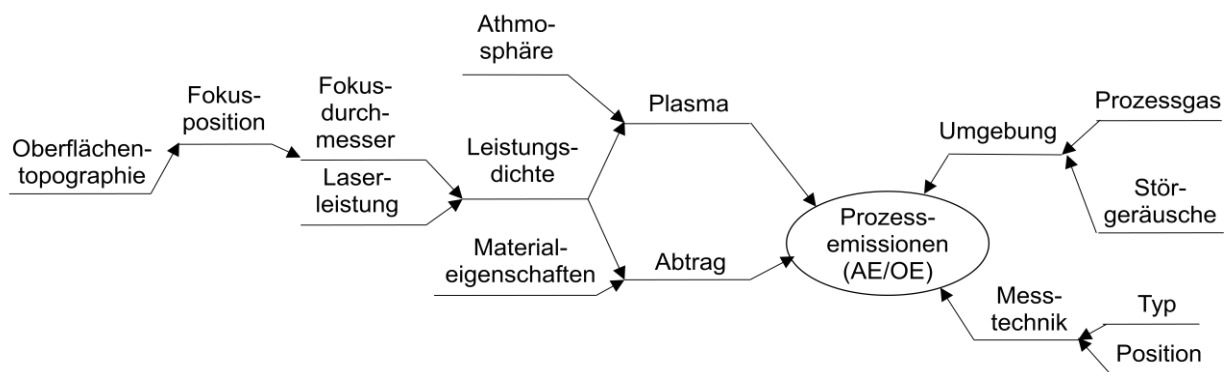


Abbildung 5-41: Ursache-Wirkungs-Diagramm auf Prozessemissionen (AE/OE) beim Mikrolaserabtragen

Das zu ablatierende Material und der dabei genutzte Energieeintrag zeigen einen signifikanten Einfluss auf das akustische und optische Signal. Der Energieeintrag untergliedert sich in die eingebrachte Energie bzw. Leistung pro Fläche, welche wiederum von der Fokusslage  $z$  und dem Pulsabstand  $PA$  abhängt. Weitere Einflussgrößen stammen aus der verwendeten Messtechnik, aus der Umgebung (beispielsweise akustische Störgeräusche durch Prozessgasströmung) oder aus dem Prozess selbst. Ist die Oberflächentopographie mit hohen Spitzen oder tiefen Kratzern versehen, so variieren die Ablationsbedingungen (Einfallwinkel, Absorption, Leistungsdichteverteilung in der Strahltaile) im Prozess. Dieser Einfluss kann dazu beitragen, dass Löcher oder Risse auf der Oberfläche entstehen. Durch einheitliche Probenpräparation wird der Einfluss der

Oberflächentopographie weitgehend minimiert, indem polierte Probenoberflächen zum Einsatz kommen. Zudem werden die Messtechnik und die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Umgebungsgeräusche) konstant gehalten. Für die Versuchsdurchführung und Planung kann festgehalten werden, dass das Material und die Leistungsdichte, das heißt die Prozessgrößen mittlere Laserleistung  $P_{av}$ , Pulsabstand PA und Fokusslage  $z$  signifikant sind für die Ablation und daher näher untersucht werden müssen.

Zum einen werden die AE in Abhängigkeit von der mittleren Laserleistung  $P_{av}$  und dem Pulsabstand PA bei konstanter Fokusslage  $z_{OF}$  erfasst. Zum anderen werden AE in Abhängigkeit vom Pulsabstand und der Fokusslage bei konstanter mittlerer Laserleistung ermittelt. Gleichzeitig erfolgt die Aufnahme und Auswertung der Intensität des Prozessleuchtens, um Parallelitäten zum Verhalten der AE zu erkennen und gegebenenfalls Hypothesen zu untermauern. Anschließend wird das Abtragergebnis mittels Konfokalmikroskop Nanofocus  $\mu$ surf und REM-Aufnahmen charakterisiert und optischen und akustischen Ergebnissen gegenübergestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse und Zusammenhänge über die AE fließen als Grundlage in die Entwicklung einer automatisierten akustischen Fokuspositionierung auf der Werkstückoberfläche ein. Abbildung 5-42 fasst das Vorgehen schematisch zusammen.

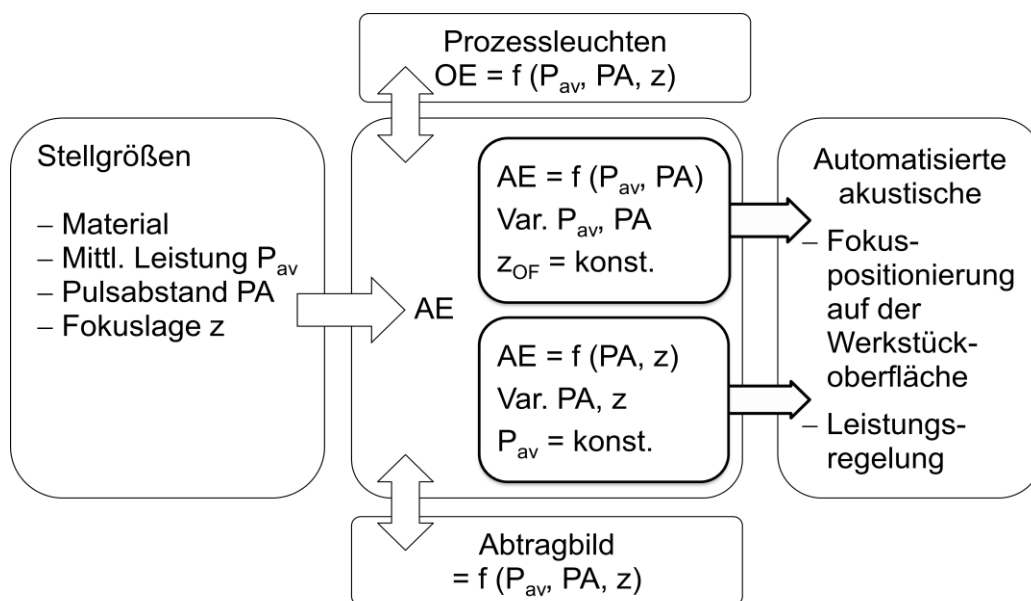


Abbildung 5-42: Übersicht des Zusammenhangs der Stellgrößen und des Abtragbildes mit paralleler Erfassung der AE und des Prozessleuchtens (OE) bei der Laserablation

Zunächst erfolgt eine optische Bestimmung der Fokusslage  $z_{OF}$ . Diese Fokusslage wird für die Auswertung der AE als Referenzgröße  $z = z_{OF} = 0$  mm gesetzt. Die

Proben werden mit Hilfe des konfokalen Weißlichtsensors und der Goniometerachsen senkrecht zum einstrahlenden Laserstrahl positioniert. Die Versuche werden je Werkstoff mit der gleichen Werkstückaufspannung durchgeführt, so dass die gleiche Referenzposition  $z = z_{OF} = 0$  mm gewährleistet wird. Die Versuchsdurchführung erfolgt in Form einer Ablation von Linien der Länge 0,4 mm auf der Oberfläche mit unterschiedlichem Pulsabstand und unterschiedlicher z-Position der Fokustaille in Bezug zur Werkstückoberfläche.

Ein rein akustisches Prozessmodell wird mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans erarbeitet. Die Prozessgrößen werden jeweils für die verschiedenen Materialien in folgenden Stufen variiert und dabei die akustischen Luftschallemission erfasst und mittels FFT der Median ausgewertet: mittlere Laserleistung  $P_{av} = 5$  bis 100 mW (maximal in 4 Stufen) und Pulsabstand  $PA = 0,05$  bis 5  $\mu\text{m}$  (maximal in 6 Stufen). Abbildung 5-43 verdeutlicht den Zusammenhang der z-Position der Fokustaille im Verhältnis zur Werkstückoberfläche.

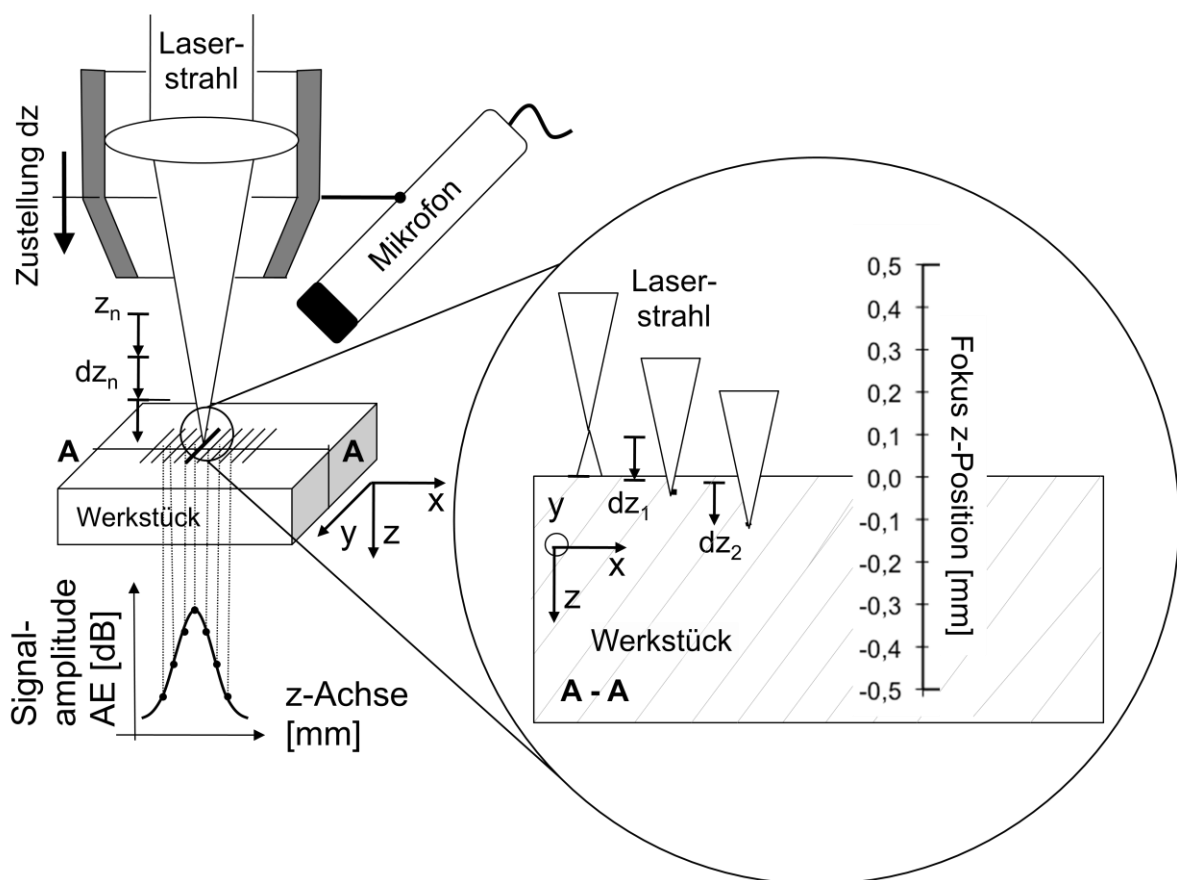


Abbildung 5-43: Schema der Versuchsdurchführung, Definition der Fokuslage in Bezug zur Werkstückoberfläche



Eine z-Position mit positivem Vorzeichen bedeutet, dass die Laserstrahltaile oberhalb der Werkstückoberfläche positioniert ist. Von Bahn zu Bahn wird die z-Position um ein Zustellungsinkrement  $dz$  in Richtung der Werkstückoberfläche zugestellt. Für jede Bahn erfolgt die Erfassung von optischen und akustischen Emissionen.

## 5.4.4 Ergebnisse akustischer und optischer Emissionserfassung

### 5.4.4.1 AE in Abhängigkeit von der mittleren Leistung

Die Ermittlung der Abhängigkeit der AE von der mittleren Laserleistung erfolgt bei einer konstanten optisch gefundenen Fokusposition  $z_F = z_{OF} = 0$  mm auf der Werkstückoberfläche (gemäß „line test“ aus Kapitel 4.6). Es werden Bahnen mit einem Pulsabstand von  $5 \mu\text{m}$  ablatiert und parallel die AE erfasst (Abbildung 5-44). Jeder dargestellte Datenpunkt entspricht dem Median aus 100 Messpunkten der AE einer ablatierten Bahn der Länge  $L = 0,4$  mm. Das Frequenzverhalten nach der FFT zeigt für WC-12Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  ein ähnliches Signalverhalten mit lediglich abgeschwächter Amplitude. Die Amplitude der AE nimmt mit steigender mittlerer Leistung im Fokus zu. Ab einer Leistung von 50 mW nähert sich die Amplitude asymptotisch einem maximalen Wert von 95 dB. Nur unterhalb von 50 mW gibt es eine klare Korrelation zwischen  $P_{av}$  und AE, so dass der nutzbare Bereich auf  $<50$  mW eingeschränkt ist.

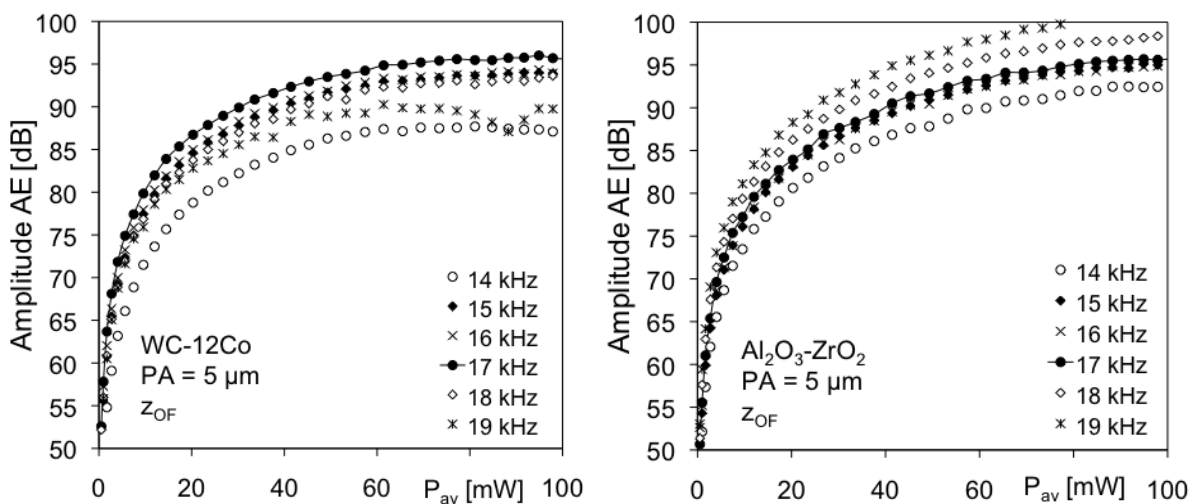


Abbildung 5-44: Median der AE in Abhängigkeit von der mittleren Laserleistung für WC-12Co (links) und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  (rechts),  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $z = z_{OF} = 0$  mm

Der Einfluss der mittleren Leistung auf die AE für 30CrMo6, WC-12Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf. Der Übersicht halber wird in Abbildung 5-45 nur die Amplitude der 17 kHz-Frequenz aufgetragen.

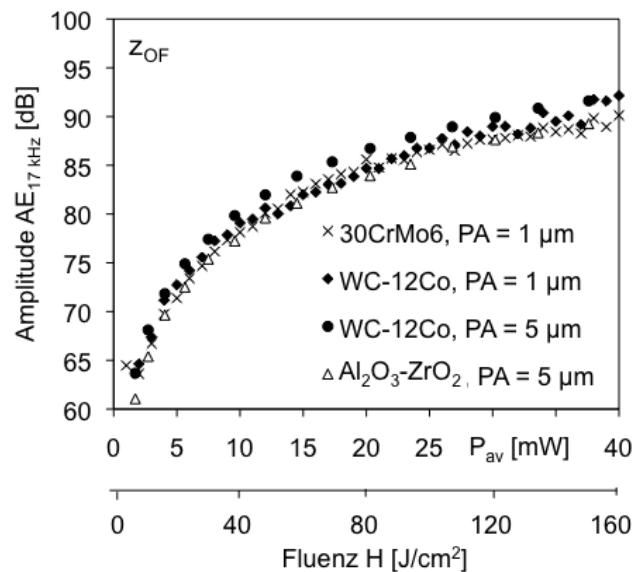


Abbildung 5-45: Einfluss der mittleren Leistung auf die AE, Auszug der 17 kHz-Frequenz für 30CrMo6, WC-12Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ,  $z = z_{OF} = 0 \text{ mm}$

Alle untersuchten Materialien zeigen sowohl für einen Pulsabstand von  $1 \mu\text{m}$  als auch von  $5 \mu\text{m}$  einen sehr ähnlichen Amplitudenanstieg der 17 kHz-Frequenz für eine steigende mittlere Leistung  $P_{av}$ .

#### 5.4.4.2 AE in Abhängigkeit von der Fokusslage und dem Pulsabstand für WC-12Co

Die Untersuchung der Abhängigkeit der AE von der Fokusslage und dem Pulsabstand wird zunächst detailliert anhand des Hartmetalls WC-12Co durchgeführt. Anschließend werden die Zusammenhänge wichtiger weiterer Parameter auf weiteren Materialien ermittelt.

Zunächst wird bei konstanter Einstellung der mittleren Leistung und des Pulsabstands die Fokussposition  $z$  gemäß des „line tests“ mit Fokusspositionen oberhalb bis unterhalb der Werkstückoberfläche abgetragen und dazu die AE erfasst. Anschließend wird eine Variation des Pulsabstandes und der mittleren Leistung bei konstanter Fokusslage  $z_{OF}$  durchgeführt und wiederum die AE erfasst. So wird der Zusammenhang zwischen den signifikanten Prozessparametern Material, mittlere Leistung, Pulsabstand und Fokusslage deutlich. Bei der Variation der Fokusslage ändert sich die bestrahlte Querschnittsfläche (vgl. Abbildung 4-10) und somit die Fluenz  $H$ . Aus diesem Grund wird der Übersicht halber im Folgenden bei Variation der  $z$ -Position der Einstellparameter mittlere Leistung  $P_{av}$  angegeben.

Die Bearbeitung von WC-12Co weist für eine mittlere Laserleistung von 40 mW besonders gute Bearbeitungsergebnisse auf, weshalb in den Versuchen auf

diese Leistungseinstellung ein besonderes Augenmerk gelegt wird. Dargestellt wird im Folgenden der Signalverlauf der Mediane nach der FFT für die Ablation von Bahnen mit variierenden  $z$ -Positionen der Fokuslage um  $dz$  von Bahn zu Bahn. In Abbildung 5-46 (links) zeigt die Amplitude der AE bei einer Laserleistung von  $P_{av} = 40$  mW und einem Pulsabstand  $PA = 1 \mu\text{m}$  ein deutlich ausgeprägtes Maximum der AE bei der Fokusposition  $z = z_{OF} = 0$  mm auf der Werkstückoberfläche [Sch-10a].

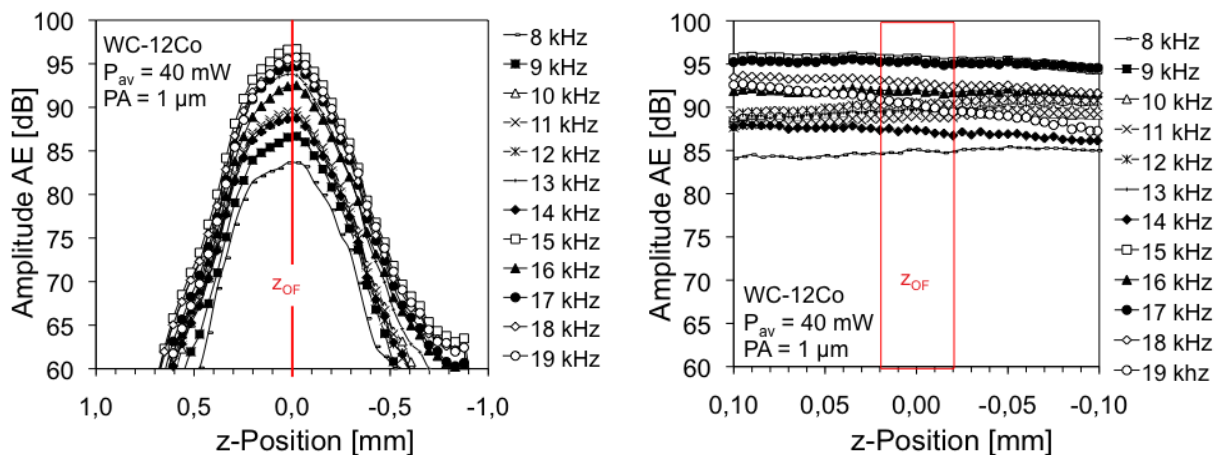


Abbildung 5-46: WC-12Co, AE für variierende Fokus  $z$ -Positionen (FFT, Median),  $P_{av} = 40$  mW,  $PA = 1 \mu\text{m}$ ,  $L = 0,4$  mm,  $dz = 40 \mu\text{m}$  (links),  $dz = 5 \mu\text{m}$  (rechts)

Alle Frequenzen des betrachteten Spektrums 8 - 19 kHz folgen einem Kurvenverlauf mit maximalem Ausschlag in  $z_{OF}$ . Dieser Sachverhalt zeigt ein hohes Umsetzungspotenzial für die Fokuslagenpositionierung mittels AE und bestätigt die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik. Der für die Fokuspositionierung relevante Bereich befindet sich bei  $z \leq z_{OF} \pm 20 \mu\text{m}$ , welches der gewünschten Genauigkeit entspricht. Abbildung 5-46 (rechts) zeigt den Verlauf für eine höhere Auflösung, indem mit kleineren Inkrementen von Bahn zu Bahn zugestellt wird ( $dz = 5 \mu\text{m}$ ). Im Bereich  $z = -0,1$  mm bis  $+0,1$  mm folgt die Amplitude einem nahezu konstanten horizontalen Verlauf ohne signifikante Unterscheidungsmerkmale der  $z$ -Position in Abhängigkeit von der AE ( $P_{av} = 40$  mW,  $PA = 1 \mu\text{m}$ ). Mit diesem Parametersatz lässt sich demzufolge akustisch lediglich eine Grobpositionierung der Fokustaille in die Nähe der Werkstückoberfläche durchführen. Eine eindeutige Zuweisung der  $z$ -Position  $z_{OF}$  zum Maximum der Amplitude AE ist im geforderten Toleranzbereich von  $\pm 20 \mu\text{m}$  hier nicht möglich.

Um eine höhere Genauigkeit als  $z_{OF} \pm 20 \mu\text{m}$  zu erreichen, werden weitere Parameter näher untersucht. Zunächst wird das Verhalten der AE in Abhängigkeit vom Pulsabstand untersucht, wobei die Fokusposition  $z_{OF}$  auf der

Werkstückoberfläche und die mittlere Leistung  $P_{av}$  konstant gehalten werden. Im Folgenden wird der Übersichtlichkeit halber und zur Datenmengenreduktion nur der 17 kHz-Verlauf ( $AE_{17\text{ kHz}}$ ) repräsentativ für die AE dargestellt.

Die Untersuchungen der  $AE_{17\text{ kHz}}$  für variierende Pulsabstände ergeben, dass der Kurvenverlauf bei einem Pulsabstand von  $PA \leq 0,1\ \mu\text{m}$  einen deutlichen Amplitudenabfall erfährt. Abbildung 5-47 (links) zeigt den Verlauf der 17 kHz-Frequenz bei der Ablation in der Fokusposition  $z_{OF}$ . Hier werden die  $AE_{17\text{ kHz}}$  auch für die mittleren Leistungen  $P_{av}$  von 5 bis 60 mW verdeutlicht. Für alle untersuchten Leistungen zeigt der Verlauf der  $AE_{17\text{ kHz}}$  einen Amplitudenabfall für einen Pulsabstand von  $PA \leq 0,1\ \mu\text{m}$ . Für die Pulsabstände 1 bis 5  $\mu\text{m}$  verhält sich die Amplitude der  $AE_{17\text{ kHz}}$  nahezu konstant. Alle untersuchten Leistungen zeigen eine deutlich niedrigere Signalamplitude bei  $PA \leq 0,1\ \mu\text{m}$ . Auch die Variation der Fokusslage für die konstante mittlere Leistung  $P_{av} = 40\ \text{mW}$  verdeutlicht in Abbildung 5-47 (rechts), dass für  $PA \leq 0,1\ \mu\text{m}$  im fokusnahen Bereich ein Amplitudenabfall erfolgt (Parameter, Tabelle 5-11). Defokussiert steigt der Durchmesser des Laserstrahls an und die Leistungsdichte nimmt bei konstanter mittlerer Leistung  $P_{av} = 40\ \text{mW}$  ab. Die AE befindet sich im defokussierten Bereich außerhalb von ca.  $z_{OF} \pm 50\ \mu\text{m}$  auf einem zunächst konstanten Plateauniveau.

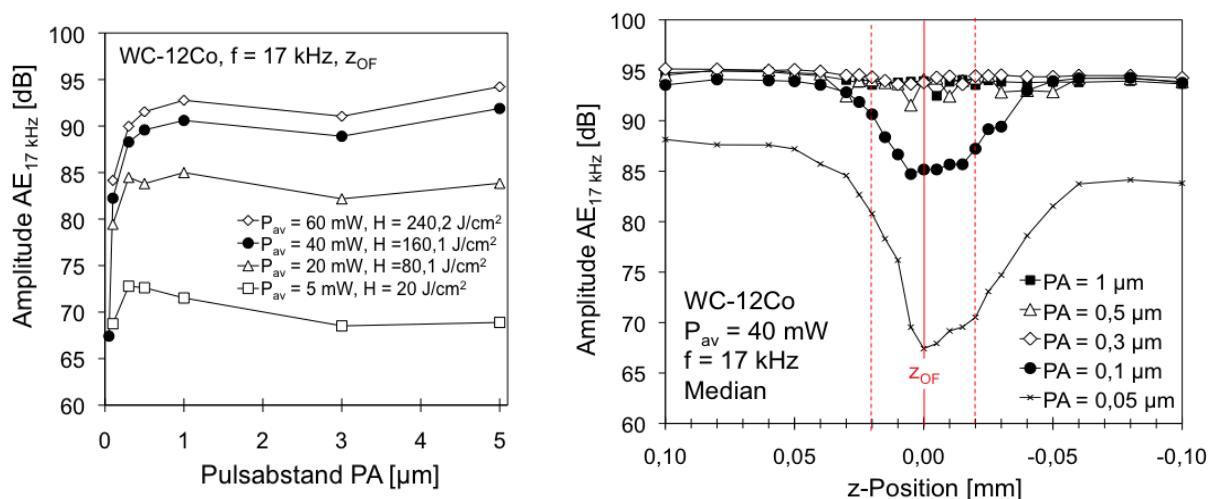


Abbildung 5-47: WC-12Co, Ablation von Linien der Länge  $L = 0,4\ \text{mm}$ ,  $AE_{17\text{ kHz}}$  bei Variation von  $P_{av}$  und  $PA$  bei konst. Fokusposition in  $z_{OF} = 0\ \text{mm}$  (links),  $AE_{17\text{ kHz}}$  bei Variation von  $PA$  und Fokus  $z$ -Positionen bei konst.  $P_{av}$  (rechts)

*Tabelle 5-11: Bearbeitungsparameter für WC-12Co in  $z = 0$  mm,  $H = 160,1$  J/cm<sup>2</sup>*

v [mm/min]	PA [ $\mu$ m]	f [Hz]	$d_{\text{eff}}$ [ $\mu$ m]	$d_w$ [ $\mu$ m]	PÜ <sub>eff</sub> [%]	PÜ <sub>w</sub> [%]
60	1	1000	4,61	7,1	78,3	85,9
30	0,5	1000	4,61	7,1	89,2	93,0
18	0,3	1000	4,61	7,1	93,5	95,8
6	0,1	1000	4,61	7,1	97,8	98,6
3	0,05	1000	4,61	7,1	98,9	99,3

Der akustische Signaleinbruch im fokusnahen Bereich ( $z = 0$  mm) wird für WC-12Co bei einem Pulsüberlapp  $P\ddot{U}_{\text{eff}} \geq 97,8\%$  ( $P\ddot{U}_w \geq 98,6\%$ ) und einer Fluenz von  $160,1$  J/cm<sup>2</sup> beobachtet. Es wird angenommen, dass das Verhalten der AE in Abhängigkeit von dem Pulsüberlapp auf die Bearbeitung mit höheren Repetitionsraten übertragen werden kann, solange Abschirmeffekte durch eine Wechselwirkung mit dem Plasma/Materialdampf ausgeschlossen werden können.

Die Gegenüberstellung der eingebrachten Energie über der Bahnlänge  $L$  zeigt, dass die eingebrachte Energiedichte  $H$  für einen Pulsabstand von  $0,1$   $\mu$ m zehn Mal so hoch ist wie bei einem Pulsabstand von  $1$   $\mu$ m. Die Position  $z_{\text{OF}} = 0$  mm, in welcher sich der Fokus auf der Probenoberfläche befindet, korreliert (Abbildung 5-48, rechts) mit dem lokalen akustischen Signaleinbruch bei  $PA = 0,1$   $\mu$ m mit der höchsten Energiedichte in der Fokustaille. Dieser Sachverhalt soll näher untersucht werden, da dieses eindeutige lokale Minimum der  $AE_{17\text{ kHz}}$  signifikant für die Fokusposition auf der Oberfläche ist. Als Gegenprobe, wird der Verlauf des Medians der AE für die Fokusposition  $z_{\text{OF}}$  auf der Werkstückoberfläche nach der FFT auch für die Vielfachen der  $1$  kHz-Frequenz im Bereich  $8 - 19$  kHz untersucht. Die Verläufe folgen dem Verlauf der  $17$  kHz-Frequenz, lediglich der Amplitudenausschlag variiert (siehe Abbildung 5-49).

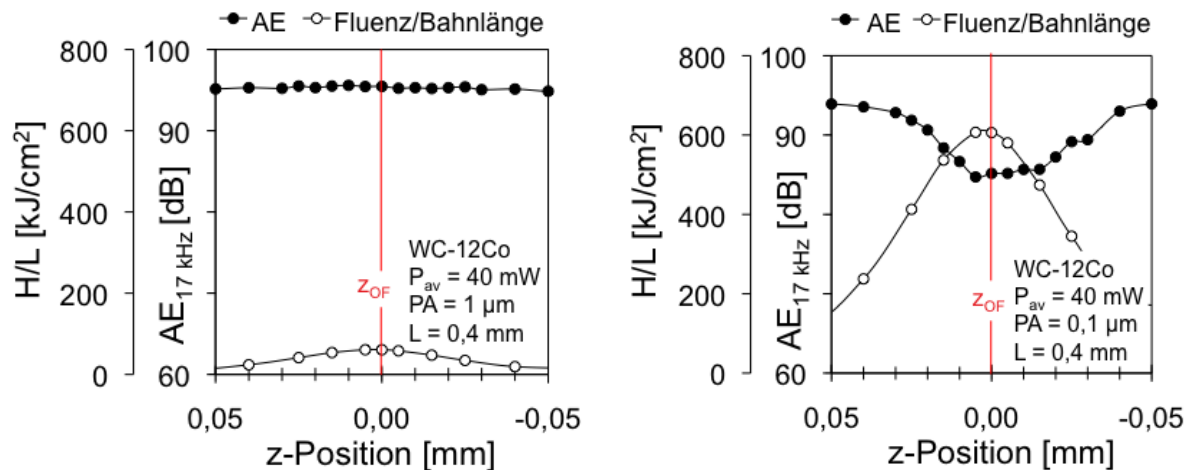


Abbildung 5-48: WC-12Co, Gegenüberstellung der eingebrachten Fluenz  $H$  pro Bahnlänge  $L$  und der  $AE_{17 \text{ kHz}}$  (Median) für  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links) und  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts)

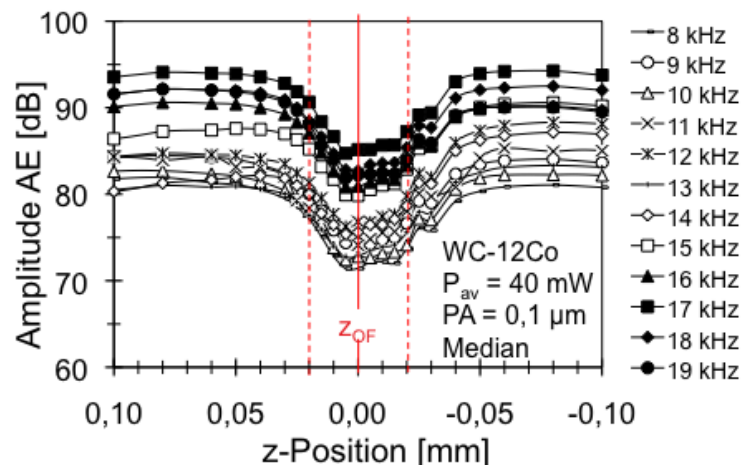


Abbildung 5-49: WC-12Co, Signalverlauf der AE bei der Ablation von Bahnen mit variierenden  $z$ -Positionen des Fokus,  $PA = 0,1 \mu\text{m}$

Für diesen Zusammenhang wird das gesamte Frequenzspektrum und die jeweilige statistische Auswertung mittels Box-Plots genauer betrachtet, um das Verhalten der einzelnen Frequenzen bei variierender Fokuslage zu untersuchen und - wenn möglich - die Frequenz mit größter Signifikanz für die Regelung auszuwählen. Dargestellt werden in einem Box-Plot 100 Messpunkte einer Bahn. Dabei werden die erfassten Minima und Maxima der Messdaten graphisch visualisiert. Der Median gewichtet die erfassten 100 Messpunkte so, dass Ausreißer weniger Bedeutung finden. Die ausgewerteten Diagramme befinden sich in Anhang B und zeigen das Amplitudenverhalten und die Standardabweichung der einzelnen Frequenzen bei der Ablation mit  $PA = 0,1 \mu\text{m}$ . Wie auch in Abbildung 5-49 deutlich zu erkennen ist, zeigen alle untersuchten Frequenzen einen ähnlichen Verlauf des Medianwertes der AE auf.

Es treten zwei Signalmaxima für oberflächenferne Fokuslagen und ein Signaleinbruch für die Fokusposition  $z$  nahe der Oberfläche  $z = 0$  mm auf. Lediglich die 11 kHz-Frequenz ist sehr stark von Ausreißern geprägt und weist eine starke Amplitudenstreuung auf, wie die Detaildarstellung im Anhang B verdeutlicht. Dieses Verhalten kann auf Störgeräusche der Umgebung zurückgeführt werden. In diesem Frequenzbereich emittieren sich im Versuchsaufbau befindliche Geräte AE, wie beispielsweise die Laserlüftereinheiten. Die Untersuchungen zeigen des Weiteren, dass für höhere Frequenzen, die Amplitude der AE zunimmt. Die Frequenzen zwischen 15 und 19 kHz zeigen einen Verlauf, der wenig von Ausreißern geprägt ist. Für ein eindeutiges Regelkriterium spielt innerhalb des Toleranzbereichs der Zusammenfall der akustisch ermittelten Fokusposition anhand des Amplitudenminimums ( $A_{AE,Min} = z_{AF}$ ) und der zuvor optisch bestimmten Fokusposition auf der Werkstückoberfläche  $z_{OF}$  eine entscheidende Rolle. Wie Abbildung 5-50 verdeutlicht, liegen die akustisch erfassten Amplitudenminima aller betrachteter Frequenzen mit ihrer dazugehörigen Laserfokusposition  $z_{AF}$  bis zu  $\pm 5 \mu\text{m}$  von  $z_{OF}$  entfernt und somit stets im Toleranzbereich von  $z_{OF} \pm 20 \mu\text{m}$ .

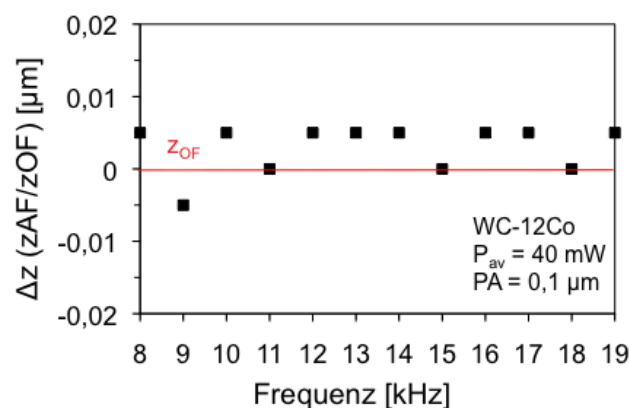


Abbildung 5-50: Abweichung  $\Delta z$  der ermittelten akustischen ( $z_{AF}$ ) und optischen ( $z_{OF}$ ) Fokuslage in Abhängigkeit von der erfassten Frequenz

Ein signifikantes und bestenfalls maximales akustisches Signaldelta zwischen dem ersten Amplitudenmaximum ( $\Delta A_{AE,Max1}$ ) und dem darauf folgenden Amplitudenminimum ( $\Delta A_{AE,Min}$ ) ist für ein eindeutiges Regelkriterium ausschlaggebend. In Abbildung 5-51 (links) sind die Deltas der einzelnen Frequenzen dargestellt. Im unteren Frequenzbereich von 8 kHz bis 11 kHz wird ein nahezu konstantes Amplitudendelta von 10 dB ermittelt. Die Frequenzen von 12 kHz bis 15 kHz zeigen ein verringertes Delta, um bis zu 3 dB. Das Delta für den Frequenzbereich von 16 kHz bis 19 kHz zeigt wiederum ein nahezu konstantes Verhalten mit ca. 10 dB. Das minimale Delta wird untersucht, indem

auch die Ausreißer berücksichtigt werden. Dazu wird der minimale Wert des Ausreißers vom Amplitudenmaximum mit dem maximalen Ausreißer des Amplitudenminimums verglichen. Abbildung 5-51 (rechts) zeigt das Ergebnis. Für die Frequenzen 11 kHz, 14 kHz und 15 kHz ist das Delta für die Ausreißer der akustischen Amplitude maximal. Da jedoch Störgeräusche und Signalstreuungen im niedrigen Frequenzbereich unterhalb von 15 kHz auftreten, entfällt dieser Bereich für die Regelung. Somit erfüllen nur die 16 kHz, die 17 kHz und die 19 kHz-Frequenz die Kriterien für ein eindeutiges Regelkriterium. Um das Datenvolumen für die Prozessregelung zu mindern, wird im Folgenden lediglich eine dieser sich signifikant verhaltenden Frequenzen und zwar die 17 kHz-Frequenz dargestellt und näher beschrieben.

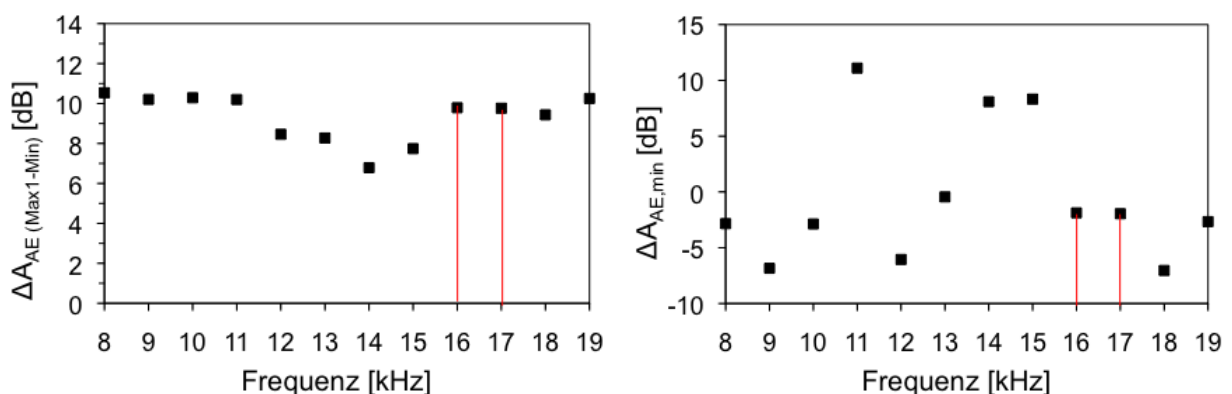


Abbildung 5-51: Amplitudendelta AE zwischen erstem Maximum ( $\Delta A_{AE, \text{Max1}}$ ) und folgendem Minimum ( $\Delta A_{AE, \text{Min}}$ ) der einzelnen Frequenzen (links), Amplitudendelta AE des minimalen Ausreißerwerts vom Maximum zum maximalen Ausreißerwert des Minimums (rechts)

#### 5.4.4.3 Vergleich AE, OE mit dem Abtragergebnis für WC-12Co

Ein Vergleich der AE mit dem Prozessleuchten und dem Abtragergebnis soll weitere Erkenntnisse zu deren Korrelation liefern und helfen das Verhalten zu verstehen. Die Fokuspositionierung erfolgt optisch über die Bewertung der Nutbreiten des Abtraggildes. Das Abtraggild variiert deutlich bei unterschiedlicher Parametereinstellung. Um das Abtraggild den aufgezeichneten akustischen Emissionen für  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  und  $PA = 1 \mu\text{m}$  gegenüberzustellen, werden zwei Versuchsreihen nebeneinander auf der gleichen Probe bei der selben Aufspannung durchgeführt. Beide Versuchsreihen erfolgen mit konstanter mittlerer Laserleistung  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ . Lediglich der Pulsüberlapp wird variiert. Zu Beginn der Versuchsreihe wird der Fokus optisch bestimmt und  $z_{OF}$  als Referenzgröße  $z = 0 \text{ mm}$  gewählt.



Abbildung 5-52 (links) zeigt den Verlauf der AE im Vergleich zum Prozessleuchten und der erzielten Nutbreite für die mittlere Leistung  $P_{av} = 40 \text{ mW}$  und den Pulsabstand  $PA = 1 \text{ }\mu\text{m}$ . Wie bereits festgehalten, zeigt die  $AE_{17 \text{ kHz}}$  für diese Parameterkombination keine signifikante Veränderung über der Fokusposition  $z = \pm 0,5 \text{ mm}$ . Die Nutbreite nimmt signifikant für die Fokusposition  $z = 0,05 \text{ mm}$  und  $z = -0,05 \text{ mm}$  zu. Das Prozessleuchten weist für die Fokusposition  $z = 0,02 \text{ mm}$  oberhalb der Werkstückoberfläche ein deutliches Intensitätsmaximum auf, das von einem Intensitätsabfall für die Fokusposition  $z = -0,025 \text{ mm}$  gefolgt wird. Mit dieser Parameterkombination erlaubt lediglich das Verhalten des Prozessleuchten und der Nutbreite Rückschlüsse auf die Fokusposition mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,02 \text{ mm}$ . Anders stellt sich jedoch die Situation für  $PA = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$  dar. Abbildung 5-52 (rechts) zeigt den Zusammenhang für die mittlere Leistung  $P_{av} = 40 \text{ mW}$  und den deutlich niedriger gewählten Pulsabstand  $PA = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ .

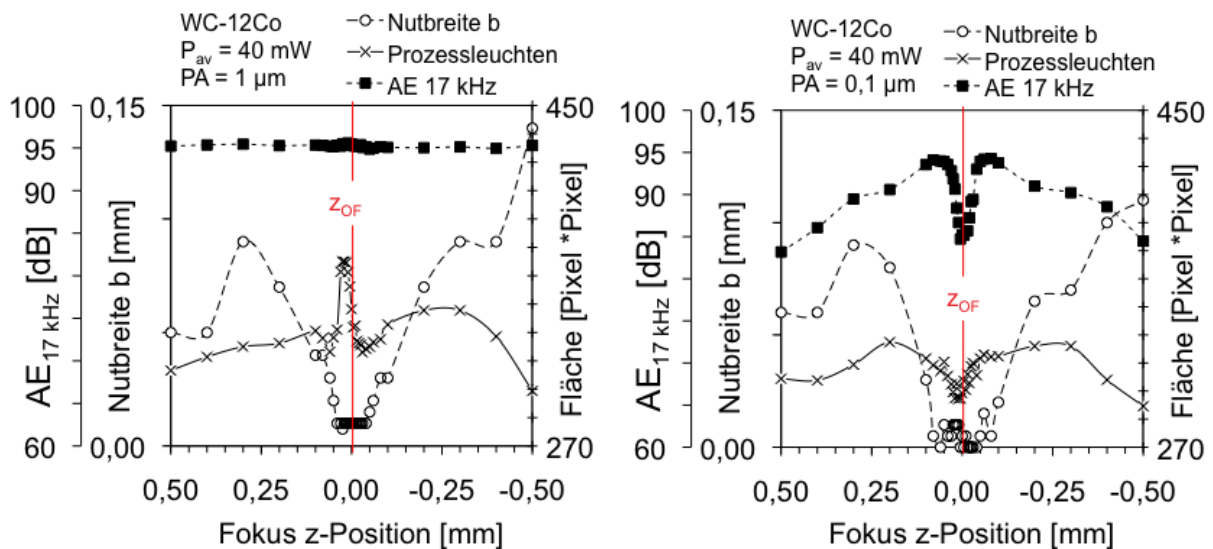


Abbildung 5-52: WC-12Co, Gegenüberstellung  $AE_{17 \text{ kHz}}$ , Nutbreite und Prozessleuchten für  $PA = 1 \text{ }\mu\text{m}$  (links) und  $PA = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$  (rechts)

Das Minimum des 17 kHz-Verlaufs fällt mit dem zuvor optisch bestimmten Fokus zusammen. Hier handelt es sich um die Bahn mit der minimalen Nutbreite. In der Fokusposition  $z = 0 \text{ mm}$  nimmt zugleich das Prozessleuchten deutlich ab. In Anhang C sind die der Abbildung 5-52 zugrunde liegenden REM-Aufnahmen der gefertigten 31 Bahnen und das dabei erfasste Prozessleuchten PL für die jeweilige Fokus  $z$ -Position mit dem Pulsabstand  $PA = 1 \text{ }\mu\text{m}$  und  $PA = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$  dargestellt. Die Abnahme der Signalintensitäten kann auf die Zunahme der erzeugten Nuttiefe und die dabei entstehende Schmelze zurückgeführt werden. Abbildung 5-53 zeigt vergrößert die REM-Aufnahmen und die Aufnahmen des

Prozessleuchtens für die Ablation der 16. Bahn in der Fokus Position  $z_{OF}$ . Beide Bahnen werden auf der selben Werkstückoberfläche örtlich nahe beieinander und zeitlich nacheinander gefertigt. So kann davon ausgegangen werden, dass die Maschineneinstellungen, die Umgebungsbedingungen und das Material konstant gehalten werden können. Beide Bahnen werden mit der Fokusposition  $z = z_{OF} = 0$  mm gefertigt.

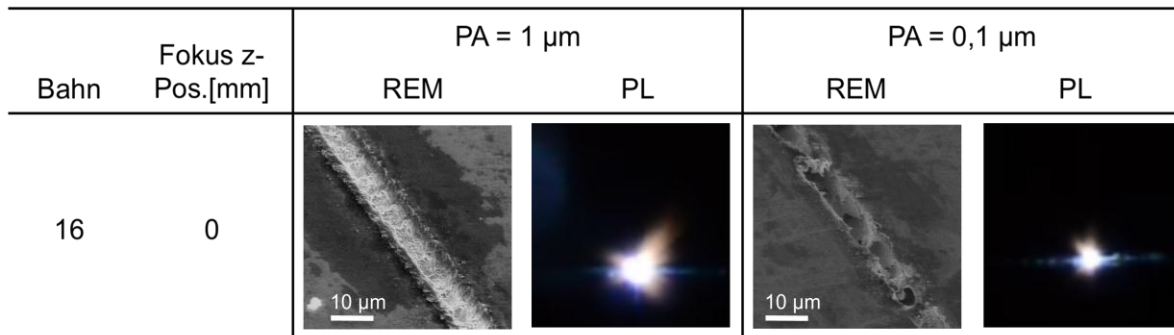


Abbildung 5-53: WC-12Co, Gegenüberstellung der REM- Aufnahme und des Prozessleuchtens für die Ablation der 16. Bahn mit Fokus Pos.  $z = 0$  mm,  $P_{av} = 40$  mW, PA = 1  $\mu$ m (links) und PA = 0,1  $\mu$ m (rechts)

Bei der Fertigung der Nut mit einem Pulsabstand von 0,1  $\mu$ m ist die eingebrachte Energie zehn Mal höher als bei der Fertigung der Nut mit einem Pulsabstand von 1  $\mu$ m. Bei gleichen Fokus z-Positionen für beide Versuche bildet sich eine doppelt so tiefere Nut für PA = 0,1  $\mu$ m aus wie für PA = 1  $\mu$ m. Für die akustische Fokuspositionierung spielt die Qualität des Abtragsbilds eine untergeordnete Rolle. Lediglich das Regelkriterium anhand der akustischen Signalgröße muss für die Fokuspositionierung vorhanden sein. Mit dem Signaleinbruch bei der Bahnablation mit PA = 0,1  $\mu$ m ist es möglich, eine Fokusposition zu ermitteln, die für andere Pulsabstände zu guten Oberflächenqualitäten führt. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Parameterkombination  $P_{av} = 40$  mW und PA = 0,1  $\mu$ m für die automatisierte akustische Fokuspositionierung auf WC-12Co ausgewählt.

Die akustische Signalerfassung wird validiert, indem auf WC-12Co die Fokusdurchfahrt 21 Mal wiederholt wird. Die Wiederholbarkeit der Messergebnisse kann dabei mit einer Streuung der Amplitude von  $\pm 2,4$  dB nachgewiesen werden. Abbildung 5-54 verdeutlicht die ermittelten AE der 21 Versuche. Der zuvor ermittelte optische Fokus  $z_{OF}$  und die dazugehörige Toleranz der Positionierung von  $z_{OF} \pm 0,02$  mm sind als Zielgröße für die spätere akustische Fokuspositionierung markiert.

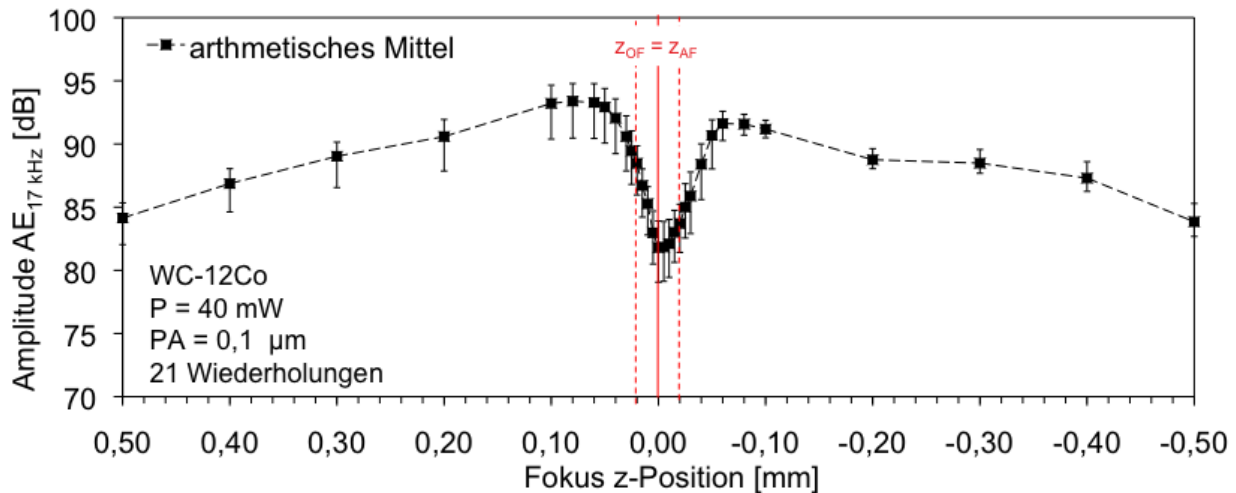


Abbildung 5-54: WC-12Co, Wiederholbarkeit der akustischen Signalerfassung basierend auf 21 Versuchen

Innerhalb eines Versuches zeigt die akustische Amplitude stets proportional den gleichen AE Verlauf. Einundzwanzig Wiederholungen führen zu einer maximalen Abweichung von  $\pm 5 \mu\text{m}$  mittels der akustischen Fokuspositionierung  $z_{AF}$  in Bezug auf die Zielgröße  $z_{OF}$ . Das Ergebnis liegt im Arbeits- und somit im Toleranzbereich. Damit wird die Zielstellung der akustischen Fokussuche erfüllt. Als nächstes wird die Untersuchung der Übertragbarkeit dieser Parameterkombination zur akustischen Fokuspositionierung auf weiteren Materialien ausgeweitet.

#### 5.4.5 Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Werkstoffe

Es konnte gezeigt werden, dass die Fokusbefahrung auf einer WC-12Co Oberfläche zu einem lokalen akustischen Signaleinbruch führt. Untersucht wird nun das Verhalten der AE für die Fokusbefahrung auf der Keramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ , dem Stahl 30CrMo6, der Titanlegierung Ti-6Al-4V und Glas.

Bei der Ablation von Bahnen mit variierenden Fokus z-Positionen auf Stahl 30CrMo6 zeigen sich die in Abbildung 5-55 dargestellten Verläufe der AE für einen  $\text{PA} = 1 \mu\text{m}$  (links) und  $\text{PA} = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts). Für beide Pulsabstände kann ein lokales Minimum im Amplitudenverlauf festgestellt werden. Der  $\text{PA} = 0,1 \mu\text{m}$  zeigt wie für WC-12Co auch bei 30CrMo6 einen sehr deutlichen akustischen Signaleinbruch in der Fokusposition  $z_{OF}$  auf der Werkstückoberfläche.

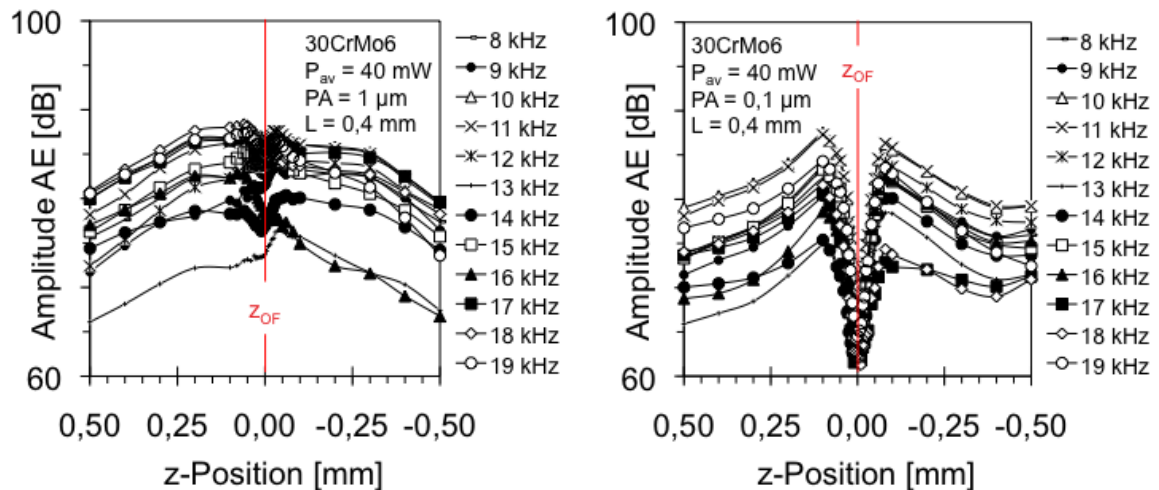


Abbildung 5-55: 30CrMo6, AE während der Bahnablation mit variierenden z-Positionen (FFT, Median),  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links),  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts)

Ein Vergleich der AE mit dem Prozessleuchten und dem Abtragergebnis verdeutlicht deren Korrelation (Abbildung 5-56). Für beide Pulsabstände fällt die kleinste Nutbreite mit dem Signaleinbruch der AE zusammen. Für  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  sinkt zudem die Intensität des Prozessleuchten im Bereich  $z_{OF} \pm 0,03 \text{ mm}$ . Das optisch beobachtete Prozessleuchten und die AE nehmen für die Fokurdurchfahrt auf 30CrMo6 im fokushen Bereich deutlich ab und stellen somit ein eindeutiges Kriterium als Regelgröße dar. Die Wahl der akustischen Fokusposition  $z_{AF}$  fällt auf die minimale AE Amplitude. Die zugrundeliegenden Rohdaten (REM-Aufnahmen und Prozessleuchten) befinden sich im Anhang D.

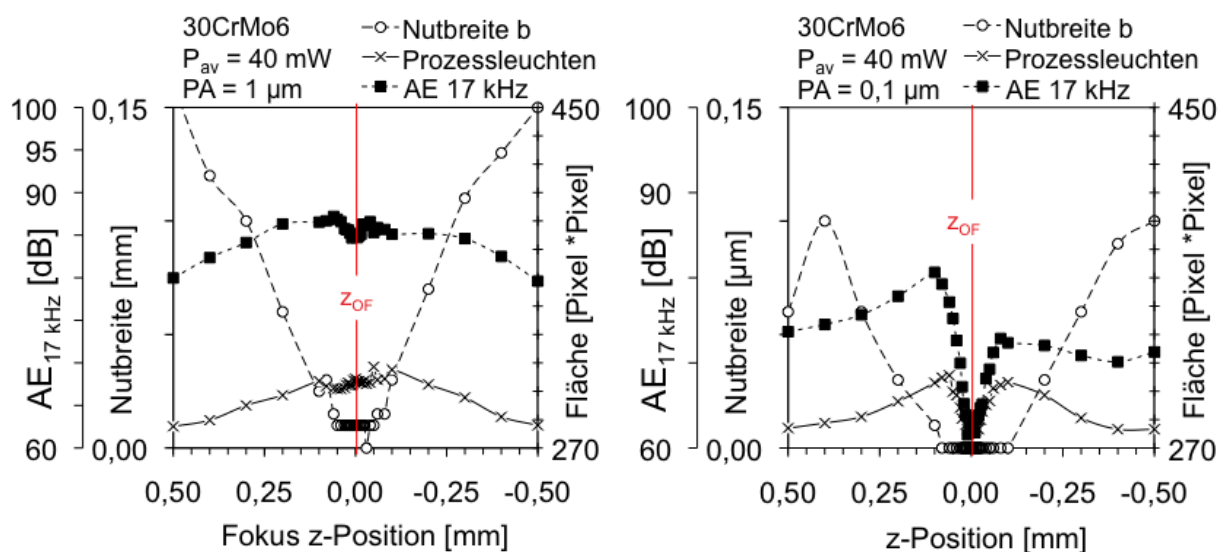


Abbildung 5-56: 30CrMo6, Gegenüberstellung  $AE_{17 \text{ kHz}}$ , Nutbreite und Prozessleuchten für  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links) und  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts)

Im Folgenden wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die Ablation der weißen Mischkeramik  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  untersucht. Abbildung 5-57 (links) zeigt, dass sich der akustische Signalverlauf bei der Ablation mit  $\text{PA} = 1 \mu\text{m}$  ähnlich dem von WC-12Co verhält. Für diese Pulsabstandeinstellung ist kein markanter Signaleinbruch zu erkennen. Für  $\text{PA} = 0,1 \mu\text{m}$  wiederum ist ein starker akustischer Signaleinbruch zu detektieren (Abbildung 5-57, rechts).

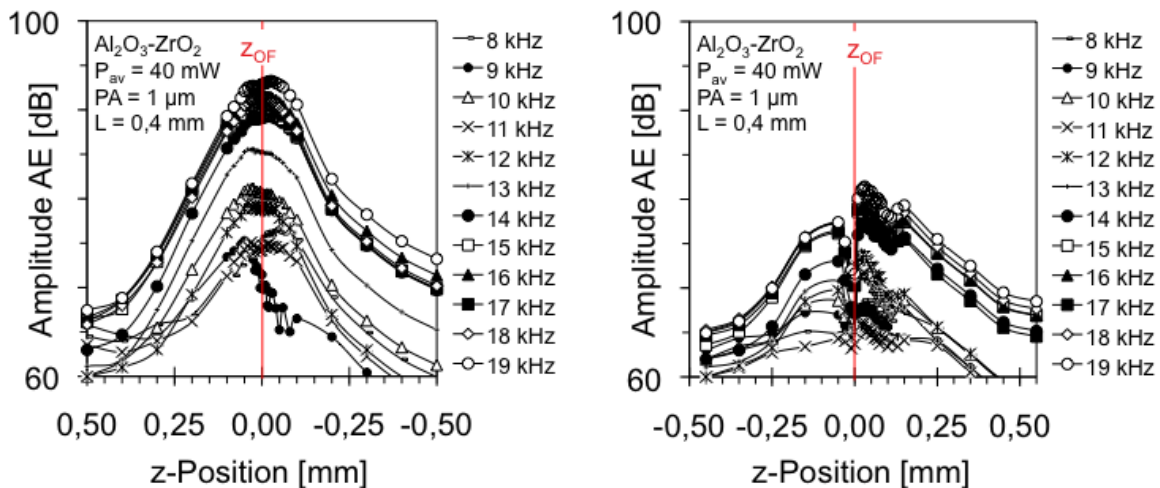


Abbildung 5-57:  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ , AE in Abhängigkeit von der z-Position des Fokus,  $\text{PA} = 1 \mu\text{m}$  (links),  $\text{PA} = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts)

Das akustische Minimum wird für  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  bei der 8. Bahn ermittelt. Ein expliziter Vergleich zur optisch ermittelten Fokus z-Position  $z_{\text{OF}}$  kann an dieser Stelle nicht gezogen werden, da die optische Fokussuche an ihre Grenzen gelangt. Die Bewertung der 8. Bahn erfolgt aus diesem Grund anhand der REM-Aufnahme. In Anhang E sind die REM-Aufnahmen und das Prozessleuchten der Fokusposition gegenübergestellt. Die 8. Bahn entspricht der schmalsten Bahnbreite.

Die AE für die Fokusbahn auf Glas und Ti-6Al-4V zeigt für den  $\text{PA} = 0,1 \mu\text{m}$  ebenfalls einen Signaleinbruch im fokusnahen Bereich, wie in Abbildung 5-58 zu erkennen ist. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse ist somit gegeben. Für die untersuchten Materialien WC-12Co, 30CrMo6,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ , Glas und Ti-6Al-4V konnte damit jeweils ein signifikanter akustischer Verlauf der 17 kHz-Frequenz bei der Fokusbahn ermittelt werden.

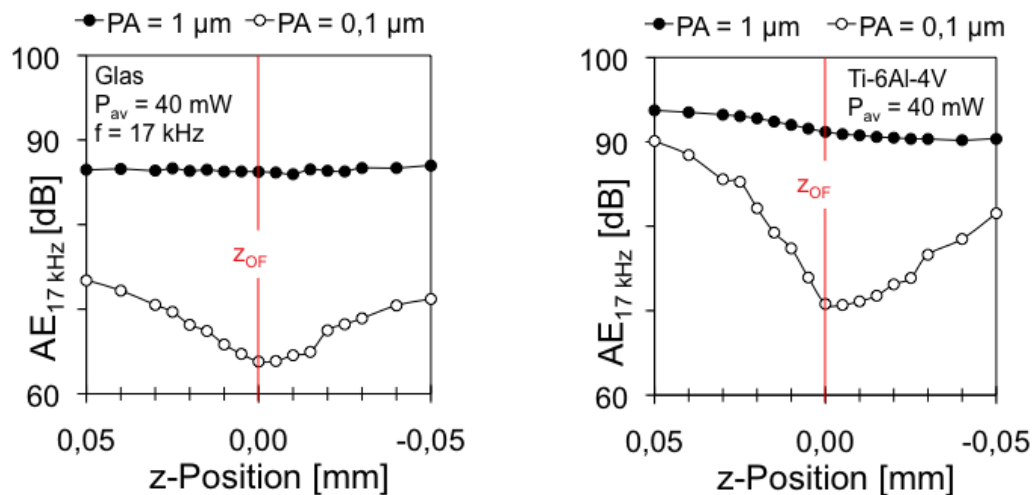


Abbildung 5-58:  $AE_{17\text{ kHz}}$  während der Bahnablation mit variierenden  $z$ -Positionen mit  $PA = 1\ \mu\text{m}$  und  $PA = 0,1\ \mu\text{m}$ , Glas (links), Titanlegierung Ti-6Al-4V (rechts)

#### 5.4.6 Diskussion der Ursache des lokalen Signaleinbruchs der AE

Festgehalten werden kann, dass für alle untersuchten Materialien die AE für  $P_{\text{av}} = 40\ \text{mW}$  und  $PA = 0,1\ \mu\text{m}$  bei der Fokusdurchfahrt ein Amplitudenminimum aufweisen. Für die Werkstoffe WC-12Co, 30CrMoV6, Ti-6Al-4V und Glas fällt das akustische Amplitudenminimum mit der schmalsten Nutbreite zusammen, welche zuvor optisch als Fokusposition auf der Werkstückoberfläche ermittelt wurde. Die Nuttiefe der akustisch ermittelten Bahn ist maximal, was daraus schlussfolgern lässt, dass der akustische Signaleinbruch ebenfalls mit der Tiefe der ablatierten Nuten zusammenhängt.

Das Prozessleuchten zeigt für  $PA = 0,1\ \mu\text{m}$  ein ähnliches Verhalten wie die AE, da beide eine Signalabschwächung bei der Fokusposition auf der Oberfläche erfahren. Die Ursache wird in verschiedenen Mechanismen vermutet, welche im Folgenden erörtert werden.

Eine Möglichkeit könnte eine Plasmaabschirmung der Emissionen sein. Li und Steens [Li-92] Untersuchung zeigt, dass erzeugter Dampf oder entstehendes Plasma mit einer Schallemission in der Luft einhergeht. Sie beschreiben, dass gleichzeitig hohe Plasmadichten als Diffusor oder Abschirmung auf die akustischen Wellen zu wirken scheinen.

Die Aufnahmen des Prozessleuchtens zeigen für die Fokusposition des akustischen Signaleinbruchs gerichtete Emissionen. Die defokussierte Bearbeitung erfolgt mit einem größeren Strahldurchmesser bei kleinerer mittlerer Leistung, was in einer niedrigeren Abtragtiefe als bei der Bearbeitung im Fokus resultiert. Dadurch werden die Emissionen an der Materialoberfläche nahezu halbkugelförmig abgestrahlt. Des Weiteren wird bei der Ablation mit  $PA = 1\ \mu\text{m}$



deutlich mehr Materialvolumen pro Puls abgetragen als bei der Ablation mit  $PA = 0,1 \mu\text{m}$ , was wiederum in höherem Materialaubtrieb resultiert. Gerade bei 30CrMo6 ist in Abbildung 5-59 deutlich zu erkennen, dass für die Bearbeitung mit  $PA = 1 \mu\text{m}$  Materialdampf und Schmelzetropfen aus der Laser-Material-Wechselwirkungszone geschleudert werden. Bei der Bearbeitung mit  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  hingegen entsteht eine tiefere Nut, aus welcher die Emissionen gerichtet austreten und als zum Laserstrahl koaxialer Jet zu beobachten sind. Über die Wände der tieferen Nut und dortige Schmelzeablagerung wird der Schall in das Werkstückinnere abtransportiert, so dass lediglich gedämpfter Luftschall aus der Nut austritt. Ebenso denkbar ist eine Schallreflexion an der dichteren Plasmawolke, die zu einer Schallreduktion führt. Abbildung 5-59 zeigt die Aufnahmen des Prozessleuchtens für verschiedene Materialien und Pulsabstände im Fokus und visualisiert schematisch den soeben geschilderten Zusammenhang.

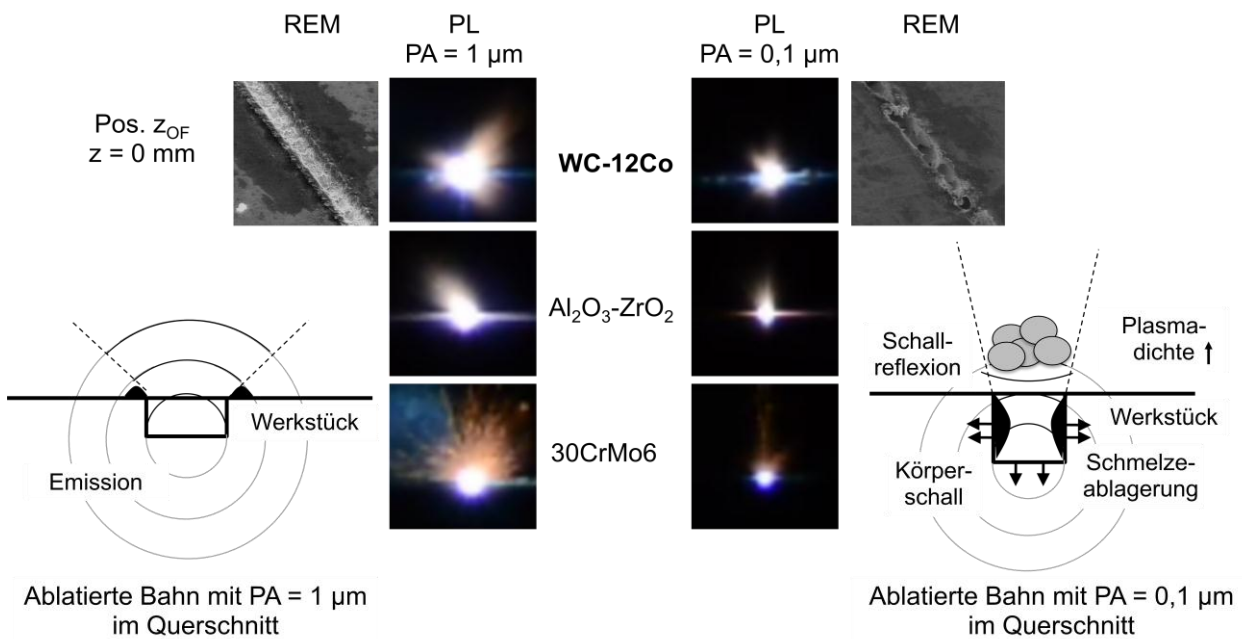


Abbildung 5-59: Schema zur Erläuterung des akustischen Signalverhaltens bei  $z = z_{OF} = 0 \text{ mm}$ , Prozessleuchten für WC-12Co (zzgl. REM),  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  und 30VrMo6 für  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links) und  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts)

## 5.5 Akustische Prozesskontrolle und- automatisierung

### 5.5.1 Strategieentwicklung und Diskussion der Nutzung von AE zur akustischen In-Prozess-Regelung

Es gibt verschiedene Ansätze zur Prozessoptimierung, die vorbeugend in der Prozessgrundlage, vorbereitend in der Prozesseinrichtung, regelnd im Prozess und überwachend bei der Ergebniskontrolle fungieren (Abbildung 5-60).

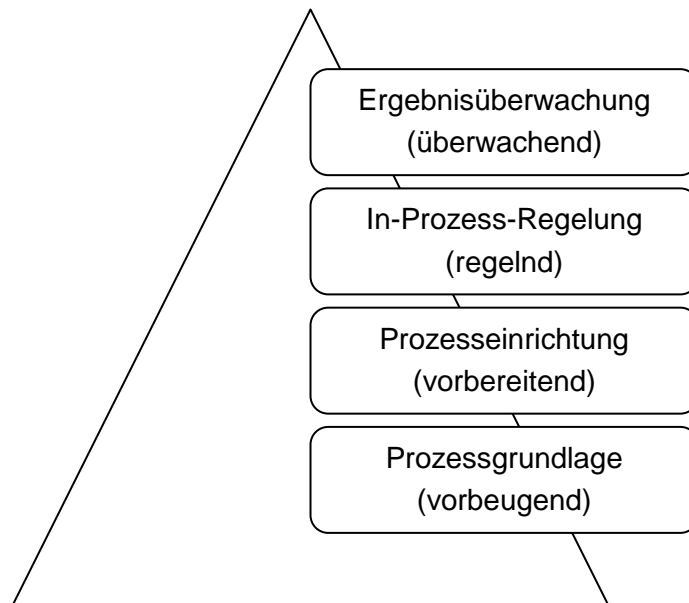


Abbildung 5-60: Stufen der Prozesskontrolle zur systematischen Eliminierung von Abweichungen im Bearbeitungsprozess gemäß [Ren-11]

Die Prozessoptimierung mittels der Erfassung akustischer Emissionen aus dem Prozess ist besonders für die Prozesseinrichtung und die In-Prozess-Regelung interessant und wird an dieser Stelle diskutiert.

Eine denkbare Strategie für die In-Prozess-Regelung ist die ebenenweise Ablation einer Fläche mit  $PA = 5 \mu\text{m}$ , in welcher lediglich einzelne Bahnen akustisch auf die Position der Fokusslage hin untersucht werden. Gängige Parametersätze für die Bearbeitung sind  $P_{av} = 5 - 60 \text{ mW}$ ,  $PA = BA = 1 - 7 \mu\text{m}$ . Die akustische Prozesskontrolle, ist für diese Pulsabstände lediglich in der Lage Fokusslagenabweichungen größer  $0,1 \text{ mm}$  zu detektieren. Diese Abweichung ist für die Regelung einer präzisen Mikrofertigung nicht ausreichend. Ihr Einsatz zeigt keine signifikanten Abweichungen der AE bei einer geforderten maximalen Abweichung der Fokusslage  $z$  von  $\pm 0,02 \text{ mm}$ . Der für eine akustische Regelung relevante Signalamplitudenabfall der AE wird im geforderten Genauigkeitsbereich  $z \leq z_F \pm 0,02 \text{ mm}$  nur für die Parameterkombination  $P_{av} = 40 \text{ mW}$  und  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  detektiert (vgl. Abbildung 5-58). Während der Bearbeitung einer



Fläche mit  $PA = 5 \mu\text{m}$  sind für das akustische Messen der Fokuslage einzelne Bahnen mit  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  in dieser Fläche abgetragen und die AE erfasst worden. Diese Messeinstellung führt in der Fläche wie erwartet zu deutlich tieferen Bahnen, die bei mehrfacher Überfahrt zusätzlich verstärkt werden und so eine ungewünschte Oberflächenqualität liefern.

Für die automatische Fokuspositionierung in Form einer gesonderten Fokussuche auf der Oberfläche zur Prozesseinrichtung ist der akustische Ansatz jedoch sehr gut geeignet. Er ermöglicht die effiziente und wiederholgenaue Einrichtung der Fokusposition auf optisch herausfordernden (transparenten, spiegelnden etc.) Oberflächen welche zum Beispiel durch die Fokussuche mittels Mikroskopie nicht oder nur unzureichend bewerkstelligt werden kann. Auch die erneute Einspannung des Werkstücks nach der optischen Fokuslagenbeurteilung unter dem Mikroskop entfällt, wodurch eine bedeutsame Fehlerquelle eliminiert werden kann.

### **5.5.2 Ableitung des Regelkriteriums**

Im Folgenden wird ein Regelkriterium abgeleitet, welches der automatisierten akustischen Fokuspositionierung dient. In Abbildung 5-61 (links) sind die markanten Datenpunkte der AE für WC-12Co markiert. Bei WC-12Co steigt die AE in Bahn 6 (Fokusposition  $z = -0,08 \text{ mm}$ ) auf  $94,09 \text{ dB}$  und sinkt anschließend bis zu Bahn 15 (Fokusposition  $z = -0,005 \text{ mm}$ ) auf den minimalen Wert von  $84,72 \text{ dB}$ . Die zuvor ermittelte Fokus-Soll-Position  $z = 0 \text{ mm}$  liegt bei Bahn 16. Bis zu Bahn 26 (Fokusposition  $z = -0,08 \text{ mm}$ ) steigt die AE erneut bis zu einem Extremwert mit  $94,26 \text{ dB}$ . Der Kurvenverlauf beinhaltet zwei Maxima, die die z-Position  $z_{OF}$  einschließen. Im vorliegenden Fall handelt es sich um Bahn 6 und 26, in deren Mitte die Bahn 16 liegt.

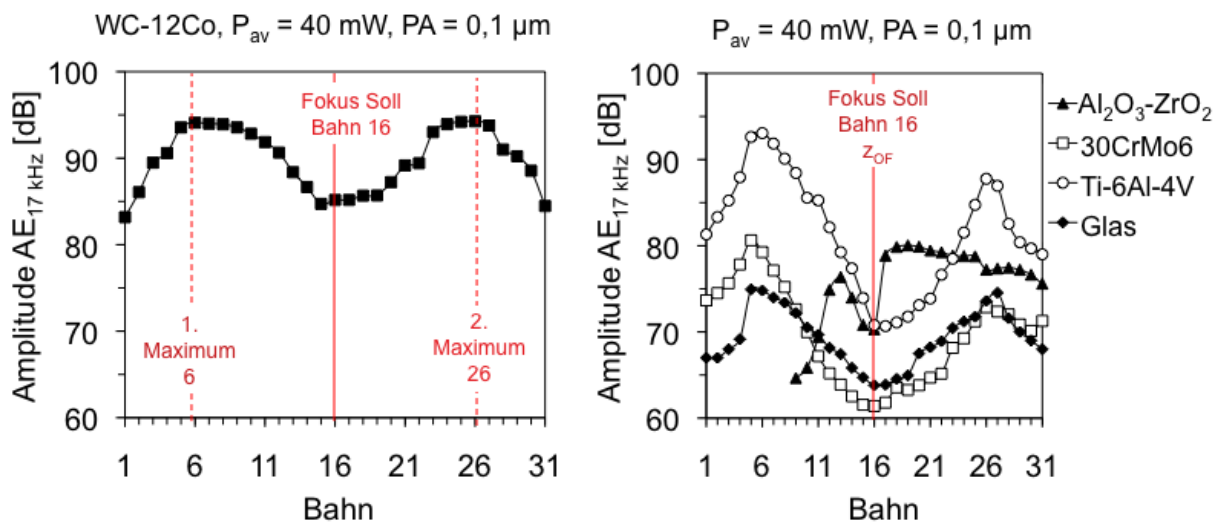


Abbildung 5-61: Regelkriterien für die akustische Fokuspositionierung, WC-12Co (links), 30CrMo6, Glas, Titanlegierung Ti-6Al-4V (rechts)

Analog dazu wird für die ebenso untersuchten Materialien die Fokusposition  $z_{AF}$  ermittelt (Abbildung 5-61, rechts). Für alle fünf Materialien fällt das Minimum der AE mit der optisch ermittelten Fokus z-Position zusammen. Gemäß diesem Kriterium wird demzufolge das akustische Minimum im Datenverlauf gesucht und als  $AE_{\min} = z_{AF}$  ausgegeben und anschließend zur weiteren Verarbeitung an die CNC-Steuerung übermittelt (in Anhang F ist die Tabelle für die Zuordnung der Bahnnummer zur Fokus z-Position aufgeführt).

### 5.5.3 Ergebnisse der akustischen Prozesskontrolle und -automatisierung

Die gewonnenen Erkenntnisse zu den Zusammenhängen zwischen Werkstoff, AE, PL und dem Abtragergebnis dienen als Basis für die Prozessüberwachung mittels AE welche im Folgenden entwickelt wird. Die AE hängt maßgeblich vom Werkstückmaterial und den Prozessparametern mittlere Leistung, Fokusslage und Pulsabstand ab. Jeweils zwei der drei genannten signifikanten Prozessparameter müssen konstant gehalten werden, um die dritte Größe akustisch sicher erfassen zu können (Tabelle 5-12).

Tabelle 5-12: Varianten der akustischen Detektion

Konstante Größe	Akustische Detektion
I. Mittlere Leistung $P_{av}$ , Pulsabstand PA	Fokusslage z
II. Fokusslage z, Pulsabstand PA	Mittlere Leistung $P_{av}$
III. Mittlere Leistung $P_{av}$ , Fokusslage z	Pulsabstand PA

Mit Hilfe der Erfassung von akustischen Emissionen können eine automatisierte Laserfokuspositionierung und eine automatisierte Einstellung der mittleren Leistung realisiert werden. Als Referenzgröße dient der ermittelte Wert über die in Kapitel 4.6 vorgestellte optische Methode zur Ermittlung der Fokusslage mittels Laserablation von Bahnen. Die akustische Erfassung der Fokusposition zielt darauf ab, die Einstellung von  $z_{OF}$  auf akustischem Weg zu erzielen und damit automatisiert und prozesssicher die Fokusposition einzustellen. Zu Vergleichszwecken wird die zuvor manuell ermittelte optische Fokusposition mit aufgeführt und bildet die Referenzgröße  $z_{OF} = 0$  mm der z-Achse. Diese Position  $z_{OF} = z = 0$  mm stellt somit nicht die tatsächliche Werkstückoberfläche dar, sondern setzt lediglich die optisch und akustisch ermittelte Fokusposition in Bezug zueinander. Die Genauigkeit der Ermittlung der Position  $z_{OF}$  ergibt sich über die gewählte Inkrementzustellung von Bahn zu Bahn.  $z_{OF}$  wird im „line test“ mit einer Genauigkeit von  $dz = 3$   $\mu$ m bestimmt. Unter Ausnutzung der Symmetrie des Abtragbilds der Bahnbreiten wird die Bahn, die die Spiegellinie bildet, ermittelt und die zur Ablation eingestellte z-Position mit  $z_{OF}$  gekennzeichnet.

### 5.5.3.1 Automatisierung der Laserfokuspositionierung mittels AE

Die Entwicklung der Fokuspositionierung beinhaltet die mathematische Beschreibung der Zielgröße, die Entwicklung der Bearbeitungsstrategie, die Entwicklung des Auswertalgorithmus unter Beachtung der Kriterien und die praktische Umsetzung in LabVIEW (NI) und der Maschinensteuerung.

Voraussetzung für die Durchführung der akustischen Fokuspositionierung ist die Ausrichtung der Werkstückoberfläche senkrecht zum einfallenden Laserstrahl und die Konstanz der mittleren Leistung in der Laser-Material-Wechselwirkungszone. Viele Laserbearbeitungsmaschinen messen die mittlere Leistung im Strahlengang. Der Strahl wird weiter über Optiken zum Fokussierobjektiv geführt und erfährt dabei eine Abschwächung. Aus diesem Grund empfiehlt sich eine Leistungsmessung des Strahls nach der Fokussieroptik. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Coherent Leistungsmessgerät (thermophiler Sensor) auf der y-Achse des Verfahrtschis montiert (vgl. Abbildung 4-3). Ein entwickeltes CNC-Programm ermöglicht das automatische Verfahren des Messgeräts unter das Fokussierobjektiv. Der Abstand  $z$  des Objektivs vom Sensorchip des Messgeräts wurde so gewählt, dass eine defokussierte aufgeweitete Strahlfläche den Chip erreicht, da andernfalls der Sensorchip beschädigt werden würde. Die mittlere Leistung wird erfasst und mit einem Anzeigegerät auf einem Display ausgegeben. Parallel dazu wird die gemessene Spannung direkt an das Programm LabVIEW übertragen, welches die Leistungseinstellung selbständig regelt. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, ist bei dem vorliegenden Aufbau die

Leistungsabschwächereinheit über die motorisierte Manipulation einer  $\lambda/2$ -Platte realisiert. Die Kommunikation zwischen der Maschinensteuerung und der in LabVIEW programmierten Leistungsregelung ermöglicht automatisiert das iterative Verfahren der motorisierten  $\lambda/2$ -Platte und das Einlesen der mit der mittleren Leistung korrespondierenden Spannung. Der gemessene Ist-Wert  $y(t)$  wird mit dem voreingestellten Soll-Wert  $w(t)$  verglichen (Abbildung 5-62). Sind beide Werte nicht gleich, so wird die  $\lambda/2$ -Platte um  $u(t)$  weiter rotiert und die Schleife solange durchlaufen, bis der Ist- dem Soll-Wert entspricht. Mit einer eingestellten mittleren Leistung mit der Genauigkeit von 0,1 mW erfolgt anschließend die Fokuspositionierung.

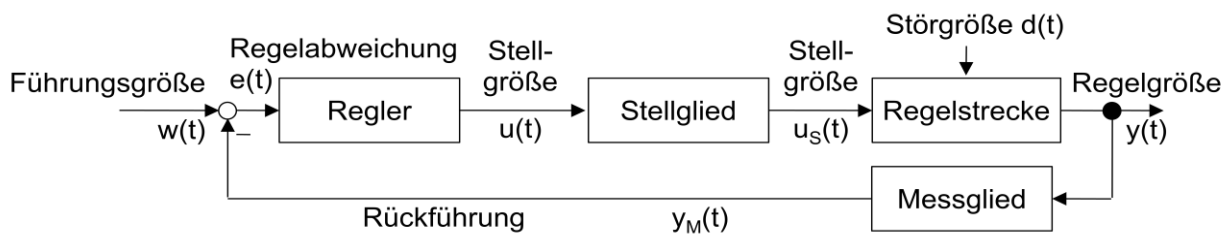


Abbildung 5-62: Blockschaltbild des Regelkreises zur Fokuspositionierung

Um die Fokuspositionierung möglichst platz- und zeitsparend mit kleinen Datenmengen zu realisieren, wurden die minimalen Strukturlängen für eine sichere Erfassung der AE ermittelt. Die minimale Bahnlänge beträgt  $120 \mu\text{m}$  und der minimale Bahnabstand liegt bei  $70 \mu\text{m}$ . Die Automatisierung der Laserfokuspositionierung teilt sich in drei Schritte. Je nach erreichbarer Genauigkeit wird zwischen einer Grob- (I.), Fein- (II.) und Präzisionspositionierung (III.) unterschieden (Abbildung 5-63). Während der Ablation werden die AE erfasst und mittels FFT ausgewertet. Die 17 kHz-Frequenz wird für die Fokuspositionierung weiter analysiert und verarbeitet.

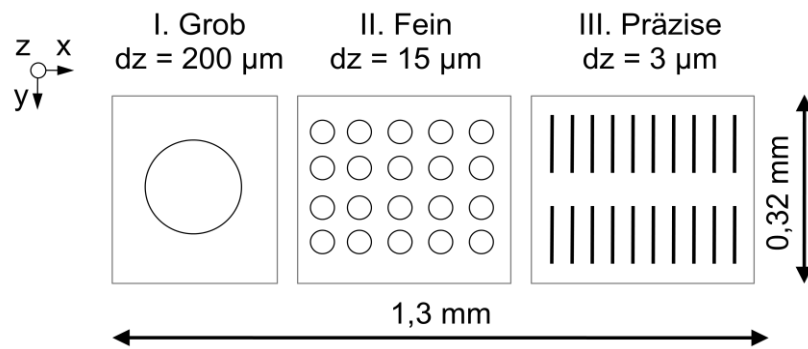


Abbildung 5-63: Anordnung und Abmaße der Abtragstrategie zur akustischen Fokuslagenpositionierung, I. Grob-, II. Fein- und III. Präzisionspositionierung

Für die Grobpositionierung wird der Laserfokus in einem Punkt in Richtung der Werkstückoberfläche verfahren. Die Zustellungsinkremente  $dz$  betragen  $200\ \mu\text{m}$ . Das Abbruchkriterium der Grobpositionierung erfordert einen akustischen Signalabfall in Bezug zur vorher gemessenen Signalamplitude. Ist das Kriterium erfüllt, wird der Vorgang der Grobpositionierung beendet (Abbildung 5-64).

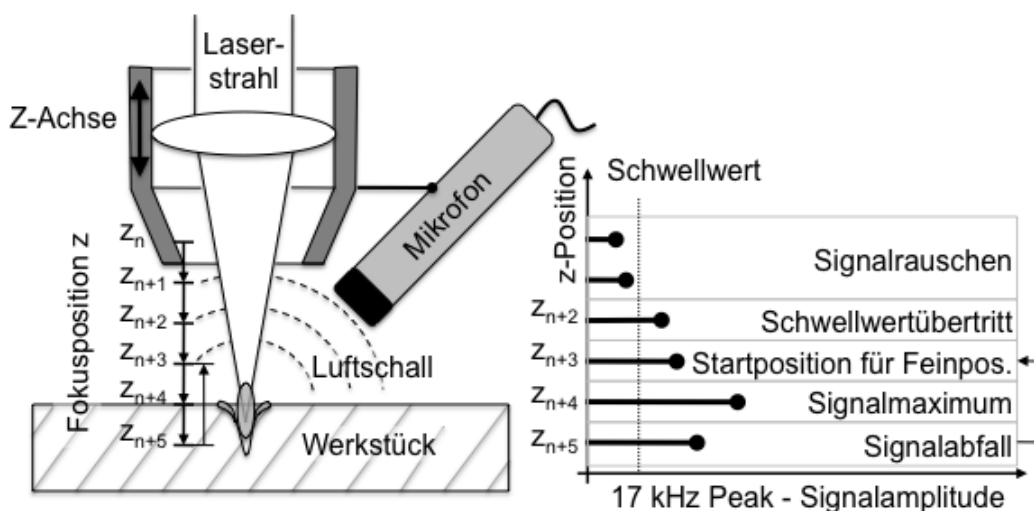


Abbildung 5-64: Schema der akustischen Grobpositionierung [Sch-10a]

Abbildung 5-65 zeigt die erfassten Werte der  $AE_{17\ \text{kHz}}$  über der  $z$ -Position des Fokus für die Grobpositionierung. Der Signalabfall wird in der Position unterhalb  $z_{OF}$  zu  $z = z_{OF} - 0,067\ \text{mm}$  ermittelt (Markierung durch Pfeil). Für die folgende Feinpositionierung wird die Position um ein Rückinkrement verfahren und die Regelung nähert sich mit kleineren Schritten und in versetzten Punkten der Werkstückoberfläche. So wird die Genauigkeit der Positionierung gesteigert. Die Inkrementgrößen  $dz$  limitieren die Auflösung der Fokuspositionierung und damit die erreichbare Genauigkeit des Ergebnisses.

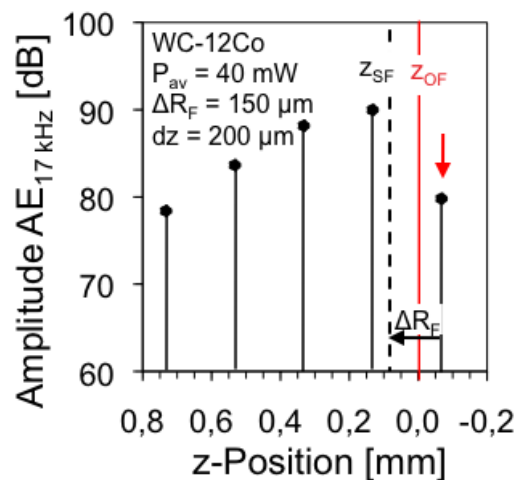


Abbildung 5-65: WC-12Co, akustische Grobpositionierung (I.) im Punkt mit Zustellungsinkrementen  $dz = 200 \mu\text{m}$ ,  $P_{av} = 40 \text{ mW}$

Durch die Verwendung des Rückinkrements wird sichergestellt, dass während der Feinpositionierung die Positionierung des Fokus bis unterhalb  $z_{OF}$  und somit bis unter die Werkstückoberfläche erfolgt. Wichtig dabei ist, dass die Anzahl der Bahnen mit den Inkrementen der Feinpositionierung abgestimmt ist. Das Rückinkrement  $\Delta R$  errechnet sich über die Anzahl der Linien  $n$  der folgenden Feinpositionierung mit den Inkrementen  $dz$  (Formel 5-5).

$$\Delta R = \frac{n \cdot dz}{2}$$

Formel 5-5

Für  $n = 20$  Linien und einer Inkrementbreite  $dz$  von  $15 \mu\text{m}$  von Bahn zu Bahn errechnet sich das Rückinkrement für die Feinpositionierung  $\Delta R_F$  zu  $150 \mu\text{m}$ . Als Startwert  $z_{SF}$  für die Feinpositionierung wird bezogen auf die zuletzt gemessene  $z$ -Position ein vordefiniertes Rückinkrement  $\Delta R_F = 150 \mu\text{m}$  eingestellt. Damit befindet sich der Fokus oberhalb der Werkstückoberfläche und die Feinpositionierung kann erfolgen.

Softwareseitig wird die Datenerfassung, Handhabung und Verarbeitung in der graphischen Programmierumgebung LabVIEW (LV) umgesetzt. Das entwickelte LabVIEW-Programm liest die über eine Messkarte übermittelten Spannungen ein und ordnet diese in einem Array den von der Maschinensteuerung übermittelten  $z$ -Positionen der Fokussierlinse zu. Anschließend erfolgt eine Umwandlung des Spannungssignals in Dezibel. Das von diesem Funktionselement ausgegebene Signal ist auf den Bezugsschalldruck in Luft  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit des Mikrofonvorverstärkers bezogen.

Hierarchisch ist der Ablauf des CNC-Codes der Maschinensteuerung dem des LV-Programms übergeordnet.

Die Feinpositionierung erfolgt gemäß Abbildung 5-66. Die Position  $z_{SF}$  wird nach der Grobpositionierung an das CNC-Programm übergeben, in welchem  $\Delta R_F$  subtrahiert wird. Vor der Ablation einer Bahn wird das Zustellungsinkrement  $dz$  addiert. Im Versuch werden die einzelnen Laserpulse mittels CNC-Programm versetzt auf die unversehrte Oberfläche gepulst und während dessen mit Unterstützung des LV-Programms die  $AE_{17\text{ kHz}}$  erfasst. Von Puls zu Puls wird der Fokus um  $dz = 15\text{ }\mu\text{m}$  zugestellt bis  $n$  Pulse ablatiert wurden. Parallel zur Strukturierung erfasst das LV-Programm die AE und die dazugehörige Einstellung der z-Position, die im Array gespeichert werden. Ist die vorgegebene Anzahl der Bahnen erreicht, so erfolgt in LV die Auswertung der AE gemäß der vordefinierten Kriterien. Die Startposition für die Präzisionspositionierung  $z_{SP}$  wird ermittelt und an das CNC-Programm gesendet.

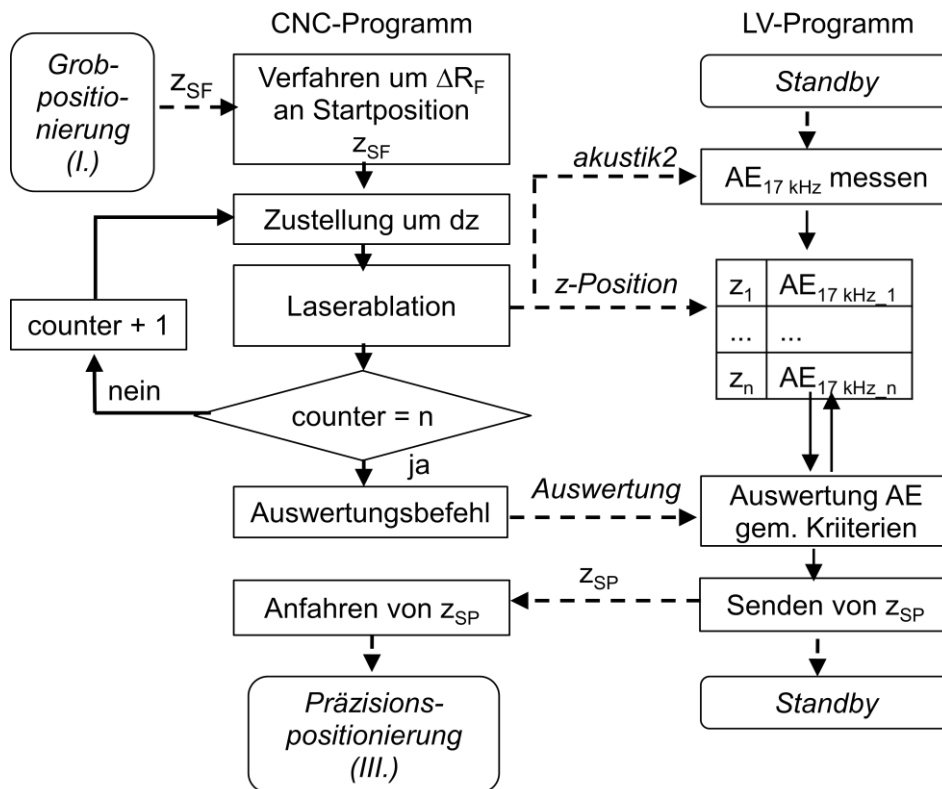


Abbildung 5-66: Ablaufschema der Feinpositionierung (II.) und des Kommunikationswegs zwischen CNC- und LV-Programm

Abbildung 5-67 zeigt die erfassten Werte der  $AE_{17\text{ kHz}}$  über der z-Position des Fokus für die Feinpositionierung. Der Verlauf der  $AE_{17\text{ kHz}}$  weist in der Auswertung einen Signalabfall an der z-Position  $z = z_{OF} - 0,0072\text{ mm}$  auf, welche als Startposition  $z_{SP}$  für die Präzisionspositionierung (III.) übergeben wird.

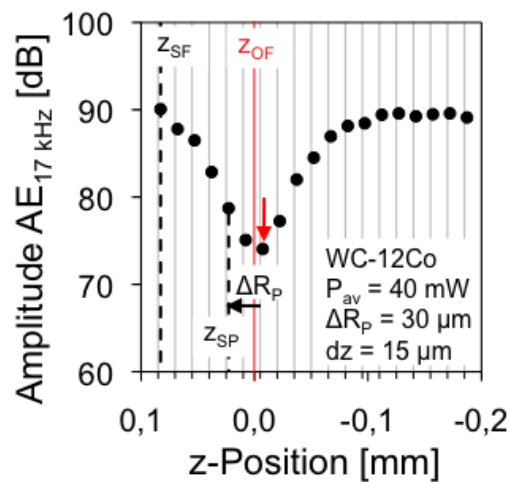


Abbildung 5-67: WC-12Co, akustische Feinpositionierung (II.) mit  $n = 20$  Pulse mit Zustellungsinkrementen  $dz = 15 \mu\text{m}$ ,  $P_{av} = 40 \text{ mW}$

Die Präzisionspositionierung erfolgt in 20 Bahnen mit  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  und Zustellinkrementen von  $dz = 3 \mu\text{m}$  zwischen den Bahnen gemäß Abbildung 5-68. Das Rückinkrement  $\Delta R_P$  errechnet sich hier zu  $30 \mu\text{m}$  für die Startposition  $z_{SP}$  gemäß Formel 5-5.

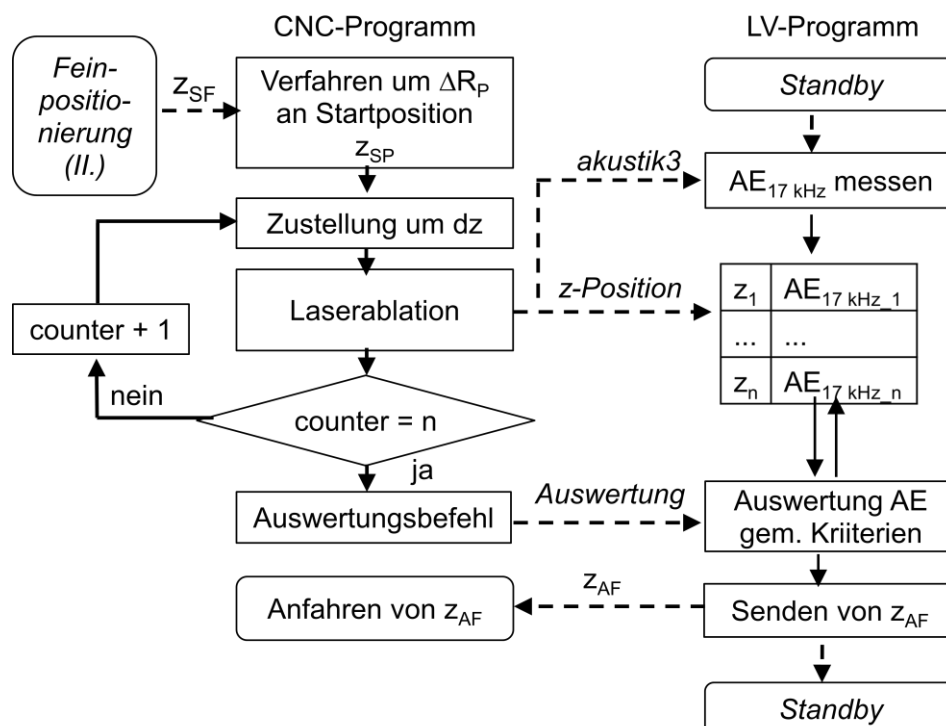


Abbildung 5-68: Ablaufschema der Präzisionspositionierung (III.) und des Kommunikationswegs zwischen CNC- und LV-Programm



Abbildung 5-69 (links) zeigt die erfassten Werte der  $AE_{17\text{ kHz}}$  über der z-Position des Fokus für die Präzisionspositionierung. Erneut wird ein Signaleinbruch gemessen. Gemäß der zuvor gewonnenen Erkenntnisse wird das Minimum der AE gesucht und als akustisch ermittelte Fokus z-Position  $z_{AF}$  ausgegeben.  $z_{AF}$  liegt  $1,8\text{ }\mu\text{m}$  oberhalb von  $z_{OF}$ . Die gewählte Inkrementzustellung  $dz = 3\text{ }\mu\text{m}$  gibt zugleich die Genauigkeit der ermittelten Fokuspositionierung an.

Da der Fokusdurchmesser in der Rayleighlänge als nahezu konstant angenommen werden darf, ergibt sich für die Positionierung des Fokus auf der Oberfläche ein Toleranzbereich von kleiner gleich zwei Mal der Rayleighlänge in Richtung der z-Achse ( $z_A \leq 2z_R$ ). Mit einer Rayleighlänge  $z_R = 27\text{ }\mu\text{m}$  liegen die erzielten Werte  $z_{SP} = -7,2\text{ }\mu\text{m}$  für die Fein- und  $z_{AF} = 1,8\text{ }\mu\text{m}$  für die Präzisionspositionierung deutlich innerhalb dieser Toleranz.

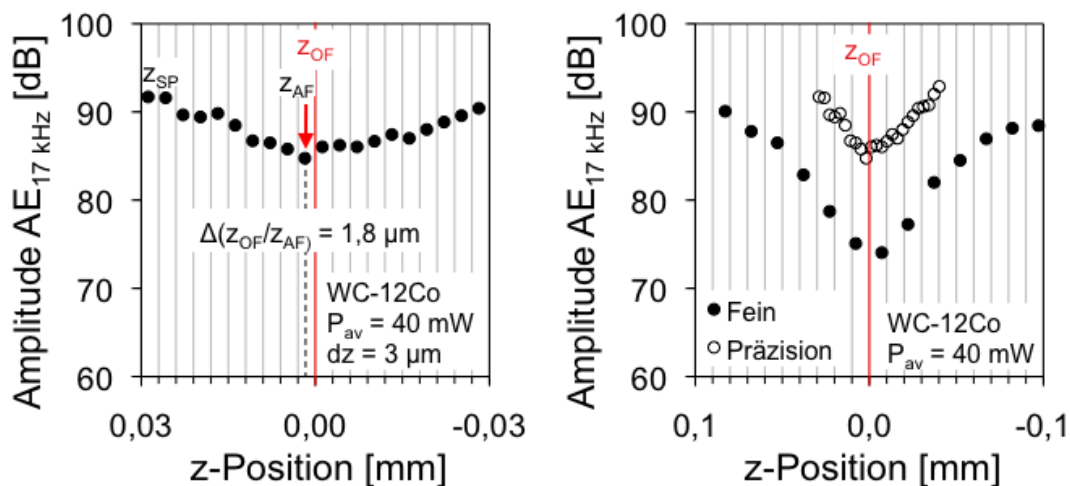


Abbildung 5-69: WC-12Co, akustische Präzisionspositionierung (III.) in  $n = 20$  Linien mit  $PA = 0,1\text{ }\mu\text{m}$  und Zustellungsincrementen  $dz = 3\text{ }\mu\text{m}$  (links), Vergleich Fein- (II.) und Präzisionspositionierung (III.) (rechts)

Die Grob- und Feinpositionierung führt zu einer akustisch detektierten Fokusposition unterhalb der Position  $z_{OF}$ , wohingegen die Präzisionspositionierung zu einer Positionierung oberhalb von  $z_{OF}$  führt. Abbildung 5-69 (rechts) stellt die beiden Verläufe gegenüber. Schlussfolgernd zeigt die AE, dass die Ablation in Punkten zu tieferen Strukturen führt als die Ablation in Bahnen. Beide Kurven, der Fein- und Präzisionspositionierung folgen einem ähnlichen Verlauf mit einem Minimum in der Nähe der Position  $z_{OF}$ . Hier wird die Steigerung der Genauigkeit von der Fein- zur Präzisionspositionierung deutlich. Die Genauigkeit der Feinpositionierung ist ausreichend für eine Bearbeitung deutlich innerhalb der Rayleighlänge, so dass bei Bedarf auf eine Präzisionspositionierung verzichtet werden kann.

Die Validierung der akustischen Fokuspositionierung erfolgt im weiteren Verlauf je in 21 Versuchen für WC-12Co, 30CrMo6 und Glas. Die in Abbildung 5-70 dargestellten Werte der Standardabweichung  $\sigma$  sind ein Maß für die Zuverlässigkeit der untersuchten Strategie, wiederholbare Ergebnisse zu liefern.

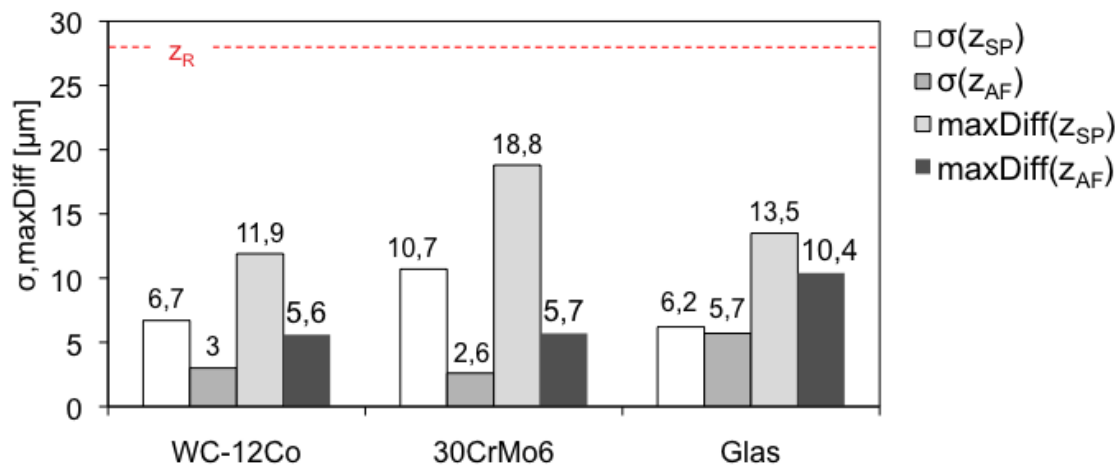


Abbildung 5-70: Streuung der Ergebnisse bei der Fein- (II.)  $z_{SP}$  und Präzisionspositionierung (III.)  $z_{AF}$  basierend auf 21 Versuchen pro Material

Die Standardabweichungen sind in Relation zur Rayleighlänge  $z_R$  des Lasersystems zu bewerten. In Abbildung 5-70 ist die maximale Abweichung maxDiff der erzielten Mittelwerte dargestellt. Die Standardabweichung der Feinpositionierung (II.) liegt für alle drei Materialien oberhalb der Präzisionspositionierung (III.), bei welcher Standardabweichungen im einstelligen Mikrometerbereich erzielt wurden. Mit  $\sigma(z_{AF}) = 2,6 \mu\text{m}$  wird für 30CrMo6 mittels Präzisionspositionierung die geringste Standardabweichung erzielt. Die Feinpositionierung schneidet hier deutlich schlechter ab mit  $\sigma(z_{SP}) = 10,7 \mu\text{m}$ . Für WC-12Co beträgt die Standardabweichung der Präzisionspositionierung  $\sigma(z_{AF}) = 3,0 \mu\text{m}$  und ist somit halb so groß, wie die nach der Feinpositionierung. Für Glas ergeben sich nach der Präzisions- und Feinpositionierung ähnliche Werte ( $\sigma(z_{SP}) = 6,2 \mu\text{m}$  und  $\sigma(z_{AF}) = 5,7 \mu\text{m}$ ). Die maximalen Abweichungen des erzielten Mittelwerts liegen für die Fein- (II.) und Präzisionspositionierung (III.) jeweils innerhalb des Toleranzbereichs von  $z_{OF} \pm 0,02 \text{ mm}$  und sind somit für die Bearbeitung einsetzbar.

Um eine Aussage über die Korrelation zwischen dem akustisch ermittelten Wert  $z_{AF}$  und der zuvor optisch gefundenen Position  $z_{OF}$  treffen zu können, werden weitere Versuche durchgeführt. Abbildung 5-71 zeigt, basierend auf 15 Versuchen pro Material, die Abweichung der akustischen Fokusposition  $z_{AF}$  von

der optisch gefundenen Fokusposition  $z_{OF}$  ( $z = 0$  mm) und deren Standardabweichung  $\sigma$  nach der Präzisionspositionierung (III.).

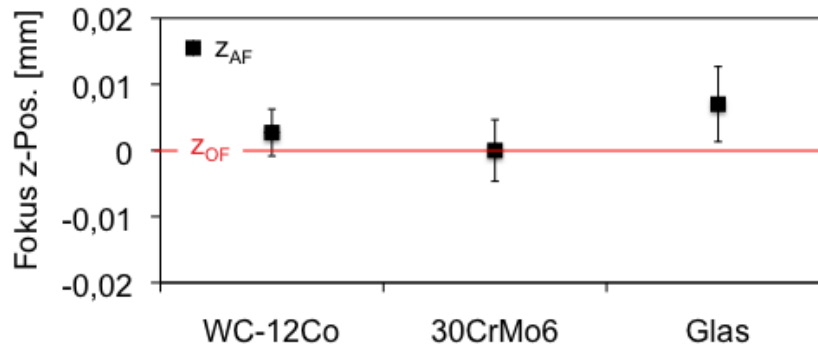


Abbildung 5-71: Abweichung der akustischen Fokusposition  $z_{AF}$  von der optisch gefundenen Fokusposition  $z_{OF}$  ( $z = 0$  mm) und dessen Standardabweichung  $\sigma$  nach der Präzisionspositionierung (III.), basierend auf 15 Versuchen pro Material

Beim Glas zeigen sich die größten Abweichungen mit bis zu 12  $\mu\text{m}$ , die aber stets im Toleranzbereich liegen. Für alle drei Materialien liegt der akustisch ermittelte Wert im Toleranzbereich, womit gezeigt werden konnte, dass die automatisierte akustische Fokussuche zuverlässig funktioniert und reproduzierbare Ergebnisse liefert.

### 5.5.3.2 Automatisierte Einstellung der mittleren Leistung mittels AE

Für definierte Prozessparameter (Pulsabstand PA, Bahnlänge L und Zustellung des Objektivs dz) werden für WC-12Co Kennlinien ermittelt, die den Zusammenhang zwischen der Laserleistung und der Amplitude der 17 kHz-Frequenz der AE beschreiben. Dafür werden 300  $\mu\text{m}$  lange Bahnen mit PA = 5  $\mu\text{m}$  auf der Oberfläche ablatiert und von Bahn zu Bahn die mittlere Leistung variiert. Der Verlauf der Amplitude der AE in Abhängigkeit von der mittleren Leistung steigt zunächst steil an und nähert sich ab 40 mW ( $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ) asymptotisch einem Maximum, wie Abbildung 5-72 zeigt.

Für eine Regelung ist es wichtig, dass die AE eindeutig einer mittleren Leistung zugeordnet werden kann. Oberhalb von 40 mW ändert sich die Amplitude nur geringfügig beim Auftreten von Leistungsschwankungen, weshalb die Leistungsüberwachung mittels AE nur für mittlere Leistungen kleiner 40 mW Erfolg verspricht. Der Leistungsbereich kleiner 40 mW zeigt verhältnismäßig große Amplitudenunterschiede für nur kleine Leistungsänderungen und wird für eine akustische Leistungseinstellung und Überwachung im Folgenden näher untersucht. Die Laserstrukturierung erfolgt meistens mit Pulsabständen zwischen

1  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$ . Da eine In-Prozess-Regelung angestrebt wird, werden Pulsabstände  $PA \geq 1 \mu\text{m}$  gewählt.

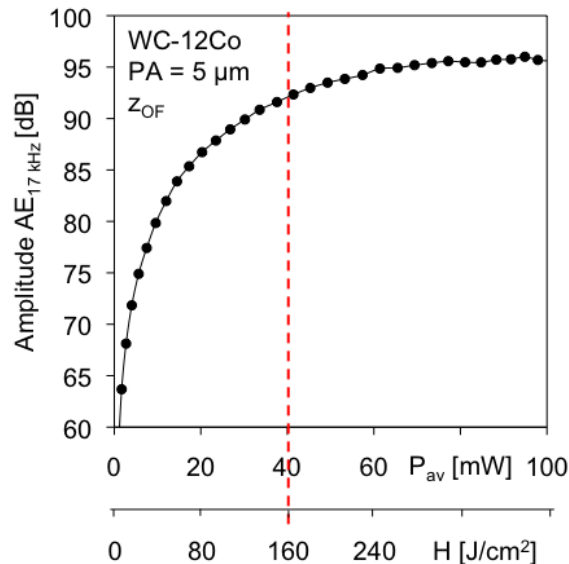


Abbildung 5-72:  $AE_{17 \text{ kHz}}$  in Abhängigkeit von der mittleren Leistung  $P_{av}$  bzw. Fluenz  $H$  während der Ablation von Bahnen mit  $PA = 5 \mu\text{m}$

Für die Leistungsüberwachung im Prozess wird zunächst der Zusammenhang der Position der  $\lambda/2$ -Platte der Abschwächereinheit im Verhältnis zur gemessenen mittleren Leistung nach dem Fokussierobjektiv ermittelt. Diese Referenzmessung wird vollautomatisiert mit einem CNC- und speziell dafür entwickelten LV-Programm abgearbeitet, aufgezeichnet und gespeichert. Das LV-Programm kommuniziert mit dem CNC-Programm und übergibt den Befehl zum Verfahren der motorisierten Achse der  $\lambda/2$ -Platte. Parallel zur Ablation von Bahnen erfolgt die Erfassung der mittleren Leistung  $P_{av}$  in der Laserstrahltaile mit dem thermophilen Leistungsmessgerät.  $P_{av}$  wird mit der dazugehörigen  $\lambda/2$ -Position im LV-Programm hinterlegt. Den Zusammenhang der beiden Größen in Form einer Polynomfunktion dritten Grades zeigt Abbildung 5-73 (links).

Als nächstes wird die  $AE_{17 \text{ kHz}}$  in Abhängigkeit von der  $\lambda/2$ -Position ermittelt. Die minimale einstellbare mittlere Leistung liegt bei der  $\lambda/2$ -Position von  $-22^\circ$  vor, während die maximale Leistung bei  $+22^\circ$  erreicht wird. Die minimal bzw. maximal einstellbare mittlere Leistung im Fokus beträgt  $P_{av} = 0 \text{ mW}$  bzw.  $100 \text{ mW}$ . Der Zusammenhang der eingestellten mittleren Leistung der gemessenen AE lässt sich über eine Exponentialfunktion beschreiben und wird im LV-Programm ebenfalls hinterlegt (Abbildung 5-73, rechts). Somit ist als Grundlage für die Leistungsregelung der Zusammenhang der Position der  $\lambda/2$ -Platte der Abschwächereinheit, der mittleren Leistung  $P_{av}$  und der AE hergestellt.

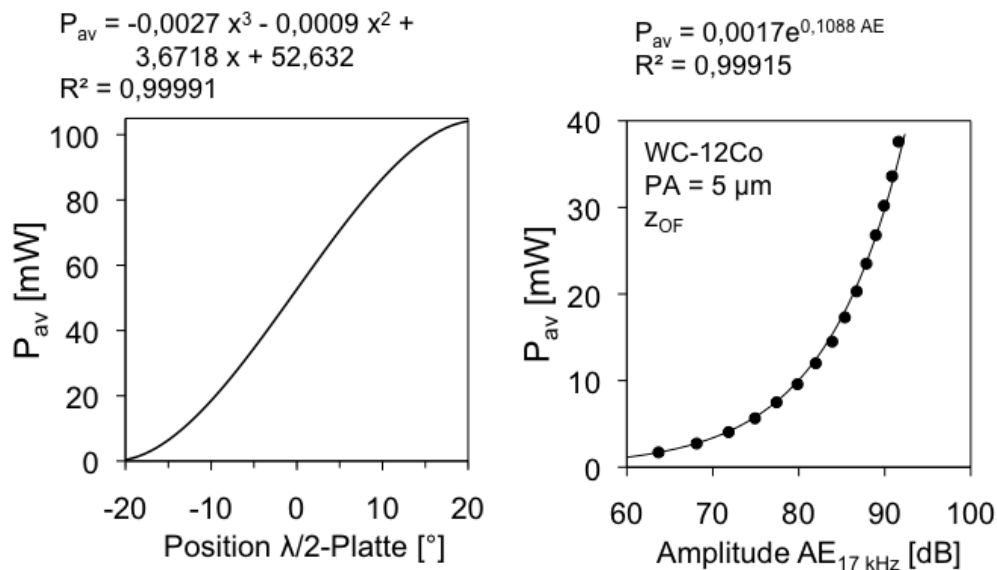


Abbildung 5-73: Mathematische Beschreibung der Zusammenhänge, mittlere Leistung  $P_{av}$  in Abhängigkeit von der Position der  $\lambda/2$ -Platte (links),  $AE_{17 \text{ kHz}}$  von Bahnen mit  $L = 0,4 \text{ mm}$  in Abhängigkeit von  $P_{av}$  für WC-12Co (rechts)

Die senkrechte Ausrichtung der Werkstückoberfläche zum Laserstrahl ist für die akustische Leistungsregelung von großer Bedeutung, da eine Abweichung der Fokuslage oder eine Abweichung der mittleren Leistung den Amplitudenausschlag der AE signifikant beeinflusst. Aus diesem Grund wird die Abweichung der AE bei defokussierter und fokussierter Bearbeitung untersucht. Abbildung 5-74 (links) veranschaulicht den Signalunterschied für die Fokusposition im Fokus  $z = z_{OF} = 0 \text{ mm}$  und defokussiert für  $z = z_{OF} \pm 50 \text{ μm}$ . Für die beiden defokussierten Fokuspositionen wird ein ähnlich starker Signalanstieg beobachtet wie im Fokus. Die Messung der AE in der Fokusposition  $z_{OF}$  wurde sechs Mal wiederholt und deren Fehlerindikator dargestellt. Deutlich wird, dass die Abweichungen teilweise in der gleichen Größenordnung liegen wie die Amplitudenunterschiede zweier benachbarter mittlerer Leistungen. Abbildung 5-74 (rechts) veranschaulicht die Abweichungen am Beispiel der Amplitude AE für  $P_{av} = 9 \text{ mW}$  bis  $11 \text{ mW}$ . Die Abweichungen überschneiden sich teilweise, weshalb eine genaue Zuordnung der gemessenen AE zu  $P_{av}$  erschwert ist. Auf Grund dieser Tatsache beschränkt sich die Genauigkeit der akustischen Leistungsregelung auf eine maximale Abweichung  $\Delta P_{max}$  von bis zu  $3 \text{ mW}$ . Bei der Bearbeitung mit höheren Leistungen (z.B.  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ) ist prozentual betrachtet eine Abweichung von bis zu  $3 \text{ mW}$  ( $7,5 \%$ ) unkritisch und zeigt wenn überhaupt nur einen kleinen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Bei der Bearbeitung mit kleineren Leistungseinstellungen (z.B.  $P_{av} = 10 \text{ mW}$ ) zeigt eine Abweichung von bis zu  $3 \text{ mW}$  ( $30 \%$ ) durchaus eine Wirkung.

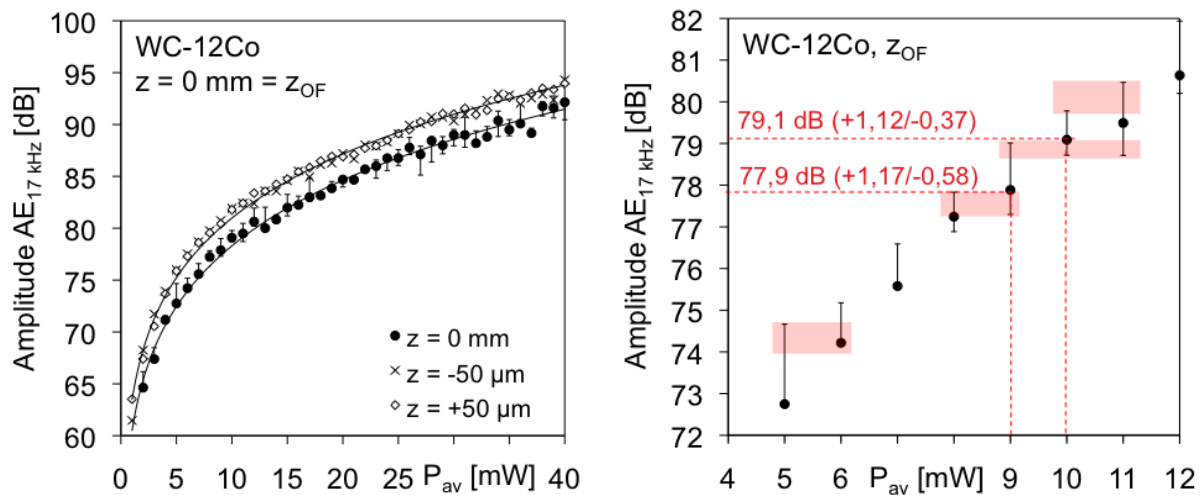


Abbildung 5-74: WC-12Co, AE über  $P_{av}$  bei variierenden Fokus  $z$ -Positionen (links), Vergrößerung des Bereichs 4 bis 12 mW zur Abweichungsbetrachtung der AE Messpunkte (rechts)

Mit dieser Kenntnis erfolgt die Entwicklung einer automatischen akustischen Leistungseinstellung vor der Bearbeitung mittels LV-Programm. Das Abfolgeschema zur automatisierten Einstellung der mittleren Leistung mittels AE zeigt Abbildung 5-75.

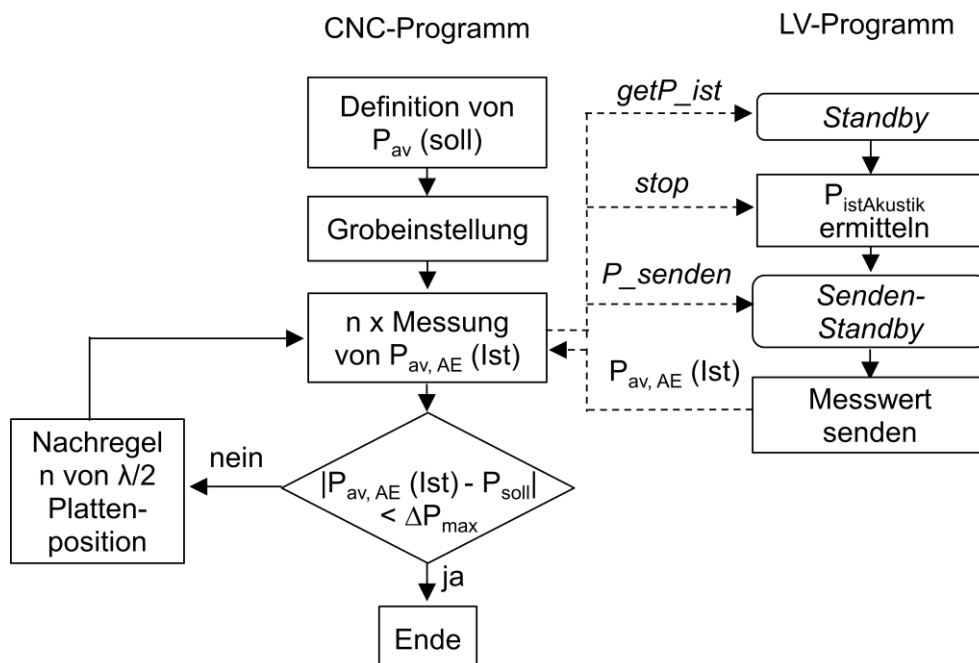


Abbildung 5-75: Abfolgeschema zur automatisierten Einstellung der mittleren Leistung mittels AE

Im CNC-Programm wird vor der Bearbeitung die gewünschte mittlere Leistung  $P_{soll}$  eingegeben. Durch Ausführen des LV-Programms wird eine Bahn der Länge

400  $\mu\text{m}$  auf der Werkstückoberfläche ablatiert, und die AE in  $n$  Messwerten mittels LV aufgezeichnet und der Mittelwert als  $P_{\text{av, AE}} (\text{Ist})$  an das CNC-Programm übergeben. Ist die Differenz zwischen  $P_{\text{av, AE}} (\text{Ist})$  und  $P_{\text{av}} (\text{Soll})$  größer als die zuvor definierte maximal zulässige Abweichung  $\Delta P_{\text{max}}$  wird eine weitere Bahn ablatiert, bis die Differenz kleiner als die zulässige Abweichung ist.

Für die Validierung wird in einem iterativen Prozess von Bahn zu Bahn die Position der  $\lambda/2$ -Platte so lange nachgeregelt, bis die vorliegende gemessene mittlere Leistung  $P_{\text{av, AE}} (\text{Ist})$  betragsmäßig weniger von  $P_{\text{av}} (\text{Soll})$  abweicht als die maximale zulässige Abweichung  $\Delta P_{\text{max}}$ . Abbildung 5-76 stellt die Ergebnisse der akustisch ermittelten  $P_{\text{av, AE}} (\text{Ist})$  der voreingestellten  $P_{\text{av}} (\text{Soll})$  gegenüber und bildet darüber hinaus deren Abweichungen ab.

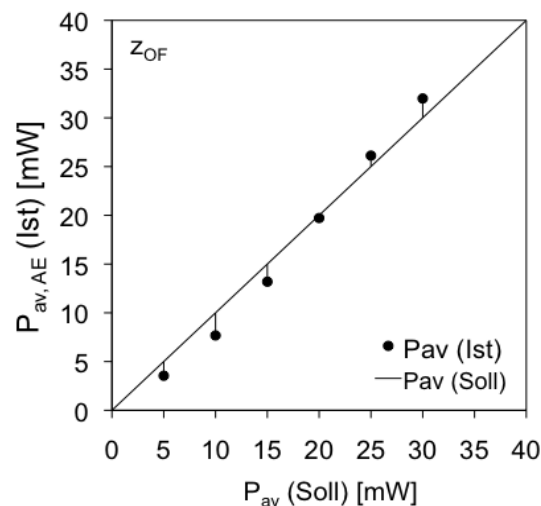


Abbildung 5-76: Gegenüberstellung der akustisch ermittelten  $P_{\text{av, AE}} (\text{Ist})$  und  $P_{\text{av}} (\text{Soll})$  für WC-12Co

Für ein gewünschtes  $P_{\text{av}} (\text{Soll}) = 10 \text{ mW}$  ( $H = 40 \text{ J/cm}^2$ ) wurde  $P_{\text{av, AE}} (\text{Ist}) = 7,7 \text{ mW}$  ( $H = 30,8 \text{ J/cm}^2$ ) mit einer Abweichung von 2,3 mW mittels AE eingestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Einstellgenauigkeit der mittleren Leistung mit einer Genauigkeit von bis zu 3 mW für kleine Leistungseinstellungen vergleichsweise gering ist. Dies limitiert in der Konsequenz die Genauigkeit eines Regelkreises bei kleinen Leistungseinstellungen, der diese Art der Leistungsüberwachung nutzt. Für den Einsatz zur Einstellung höherer Leistungen spielt eine Abweichung von 3 mW hingegen nur eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall kann die akustische Leistungsregelung problemlos eingesetzt werden.

## 6 Abschließende Bewertung

Im Rahmen dieser Arbeit konnten deutliche Verbesserungen entlang der Prozesskette erzielt werden. Die wesentlichen Aspekte sind gemäß Abbildung 6-1 Teil der Prozessgrundlage, der Prozesseinrichtung und des Bearbeitungsprozesses für das Mikrolaserabtragen.

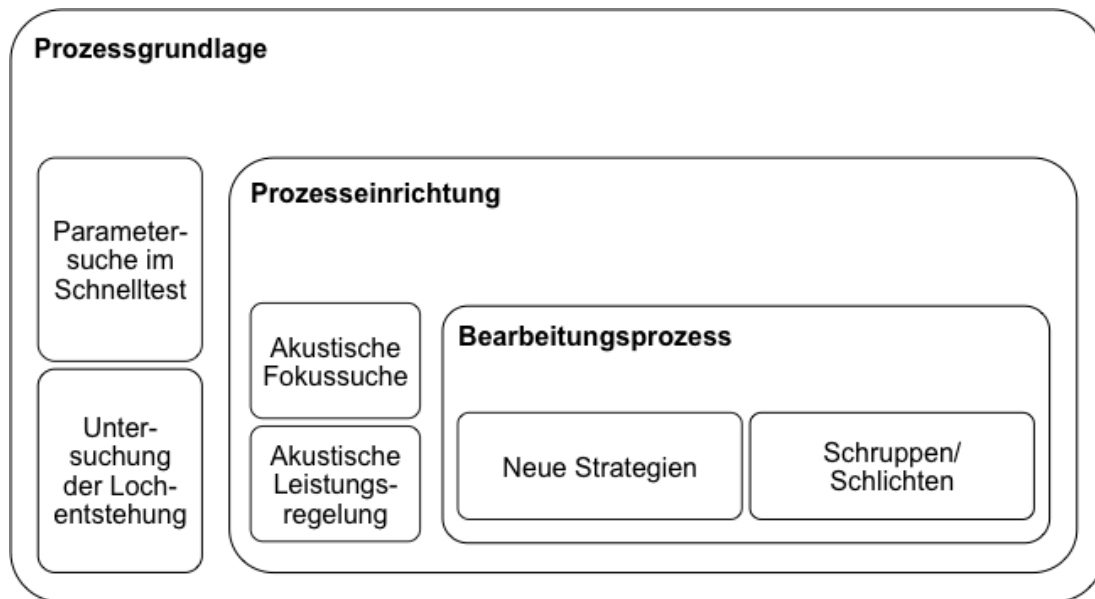


Abbildung 6-1: Schematische Visualisierung des Beitrags zur Verbesserung einzelner Teilbereiche der Prozesskette des Mikrolaserabtragens

Der Verständnisaufbau für die Parameterzusammenhänge und die darauf basierende Entwicklung der Methode zur Parametersuche im Schnelltest ermöglicht eine erhebliche Zeit- und somit Kosteneinsparung. In nur 18 Versuchen können bereits geeignete Parameterkombinationen für die Bearbeitung neuer Materialien identifiziert werden. Mit einem deutlich höheren Aufwand ist es konventionell möglich Parameterkombinationen zu extrahieren, die zu besseren Oberflächenrauheiten führen, die jedoch unter Abwägung des Aufwands die minimale Oberflächenverbesserung oft nicht rechtfertigen.

Des Weiteren wurden Entstehungsmechanismen unerwünschter Löcher im Antragsbild untersucht und Abhilfemaßnahmen abgeleitet. Löcher im Bearbeitungsbild (z.B. eines Formeinsatzes) gelten als inakzeptable Defekte, die somit als Ausschuss bewertet werden. Eine Wiederholung der Bearbeitung führt zu einer erheblichen Erhöhung des Aufwands (Material, Zeit und Kosten). Der Entstehungsmechanismus von Löchern war bislang nicht hinreichend geklärt, um diese zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde herausgefunden, dass Löcher bei Schmelze bildenden Materialien und besonders stark bei



defokussierter Bearbeitung entstehen. Eine zuverlässige Fokuslagenpositionierung gewinnt durch diese Erkenntnisse eine umso bedeutendere Rolle. Aus diesen Gründen wurden neue Ansätze zur Fokuslagenpositionierung und –regelung unter Nutzung akustischer Prozessemissionen entwickelt. Ein Einfluss von Abtragpartikeln auf die Entstehung von Löchern in der Fläche konnte für WC-12Co nicht festgestellt werden. Es wird jedoch ein Einfluss der Ablagerungen von Schmelze und größeren Abtragsmengen beobachtet, indem am Rand und in den Ecken der Kavität gehäuft Löcher auftreten. Eine neue Bearbeitungsstrategie, die das Kleiner-Werden der Flächen von Ebene zu Ebene vorsieht, verhindert das Einwirken des Lasers in die Ablagerungen am Rand der Kavität und bietet somit Abhilfe. Tabelle 6-1 fasst die abschließende Bewertung der Verbesserung in den Prozessgrundlagen zusammen.

*Tabelle 6-1: Abschließende Bewertung der Verbesserung der Prozessgrundlagen*

	Konventionelle Parametersuche	Parametersuche im Schnelltest	Untersuchung der Lochentstehung
Zeitaufwand	–	+	+
Fehler-vorkommen	/	/	+
Qualität	+	– +	+
Kostenaufwand	–	+	+
Fazit	–	+	+

Die Prozess vorbereitende Fokuslageneinstellung wurde mit Hilfe der Analyse akustischer Prozessemissionen objektiviert. Der zuvor teils händische Prozess wurde automatisiert. Um die Fokuslage auf der Oberfläche zu bestimmen, werden Bahnen mit variierenden z-Positionen der Fokuslage von oberhalb zu unterhalb der Materialoberfläche abgetragen (sogenannter „line test“). So entsteht ein symmetrisches Abtragbild. Dieses Abtragbild wurde früher durch Abspinnen des Werkstücks optisch mit einem externen Lichtmikroskop betrachtet und vom Mitarbeiter subjektiv bewertet. Nach der optischen Entscheidung und der Wahl der schmalsten Bahn im Abtragbild wurde die Probe erneut in die Maschine eingespannt. Dank der entwickelten akustischen Fokuspositionierung entfällt die Fehlerquelle durch das Ab- und Aufspannen des Werkstücks. Des Weiteren konnten eindeutige objektive Kriterien definiert werden, die eine automatische Auswertung der Fokuspositionierung mittels AE ermöglicht. Die Fehlerquelle durch eine subjektive Beurteilung des Abtragbildes

konnte somit eliminiert werden. Der große Vorteil der entwickelten akustischen Fokuspositionierung liegt in der automatisierten, objektiven und wiederholbaren Fokuspositionierung auf verschiedensten Oberflächen mit herausfordernden optischen Eigenschaften (spiegelnd, transparent etc.).

Mit der akustisch gefundenen Fokusposition lässt sich automatisch und reproduzierbar die Fokusslage einstellen und für anschließende Bearbeitungen ausgehend von dieser Position gezielt auch defokussiert arbeiten. Am Beispiel der  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ -Mischkeramik führt die Strategie einer defokussierten Bearbeitung zu deutlich höheren Abtragraten, wie Abbildung 6-2 zeigt. Die Bearbeitung im akustisch gefundenen Fokus ( $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ ) führt zu einer Abtragtiefe von  $82,3 \mu\text{m}$ , wohingegen eine defokussierte Bearbeitung mit einer Fokus z-Position von  $+0,04 \text{ mm}$  ( $H = 79,6 \text{ J/cm}^2$ ) oberhalb der Position  $z_{\text{AF}}$  zu einer 5 mal tieferen Kavität mit  $c = 423,8 \mu\text{m}$  führt.

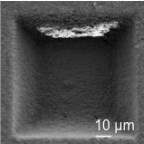
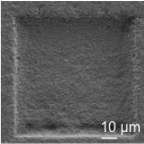
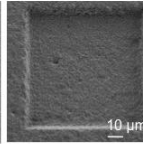
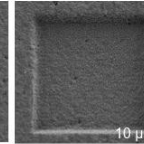
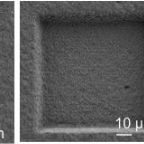
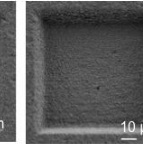
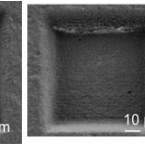
Fokus z-Pos. [mm]	+0,04	$z_{\text{AF}} = 0$	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,14
ESEM-Aufnahmen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$							
Tiefe c [ $\mu\text{m}$ ]	423,8	82,3	79,2	83,9	100,7	111,2	257,3

Abbildung 6-2: ESEM-Aufnahmen,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ , Abtrag bei var. Fokus z-Pos.,  $P_{\text{av}} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 5 \mu\text{m}$ ,  $BA = 5 \mu\text{m}$ ,  $dz = 11 \mu\text{m}$ ,  $n = 6$

Zudem konnte eine automatisierte Einstellung der mittleren Laserleistung im Bereich des fokussierten Laserstrahls mittels AE umgesetzt werden. Eine alternative Messung der Laserleistung im Strahlengang weit vor der Fokussieroptik mittels externer Leistungsmessgeräte ermöglicht zwar eine Onlinemessung im Prozess, jedoch erfährt der Strahl bis zur Wirkzone Leistungsverluste durch Absorption der Strahlung an optischen Komponenten, welche somit die Leistungsmessung verfälschen. Nur die Leistungsmessung hinter der Fokussieroptik erfasst die tatsächliche Leistung in der Wirkstelle. Basierend auf diesem Problem wurde in dieser Arbeit eine Lösung erarbeitet, die mittels der Erfassung akustischer Emissionen während der Bearbeitung online die mittlere Leistung bestimmt und automatisiert manipuliert, bis der gewünschte Einstellwert erreicht ist. Die akustische Datenerfassung, -handhabung und Auswertung wurde im Programm LabVIEW entwickelt, welches selbständig mit der Maschinensteuerung kommuniziert. Tabelle 6-2 fasst die abschließende Bewertung der Verbesserung der Prozesseinrichtung zusammen.

Tabelle 6-2: Abschließende Bewertung der Verbesserung der Prozesseinrichtung

	Optische Fokussuche	Akustische Fokussuche	Konventionelle Leistungs- einstellung	Akustische Leistungs- regelung
Zeitaufwand	–	+	–	+
Fehler- vorkommen	–	+	+	+
Automatisierung	–	+	–	+
Qualität	–	+	+	+
Kostenaufwand	+	+	–	+
Fazit	–	+	–	+

Die erlangten Erkenntnisse werden abschließend für die Mikrolaserablation von weiteren Geometrien eingesetzt. Die Werkzeug- und Materialcharakterisierung und die ermittelten Parameterkombinationen zur Herstellung qualitativ hochwertiger Oberflächen bilden hierfür die Basis. Die Prozesseinrichtung sieht die Probenausrichtung, Parametereinstellung und die Fokuslagenpositionierung mittels der entwickelten automatischen akustischen Fokuspositionierung vor. Mit diesem Prozess können verschiedenste Geometrien realisiert werden, wie im Weiteren beispielhaft gezeigt wird.

In den Stahl X38CrMoV5-1 wurde zu Demonstrationszwecken das Logo des wbk Institut für Produktionstechnik (KIT) ablatiert. Abbildung 6-3 (a) zeigt das Logo neben einem menschlichen Haar. Die Strukturbreiten betragen 20 µm bei einer Tiefe von 10 µm. Die Kanten des Schriftzuges sind scharf ausgearbeitet und defektfrei [Sch-10b].

In WC-12Co wurde die Kavitätform eines evolventenverzahnten Sonnenrads, das Bestandteil eines Miniaturplanetenbetriebes ist, abgetragen (Demonstratorformeinsetz des Sonderforschungsbereichs 499, Abbildung 6-3, b). Der Kopfteildurchmesser beträgt 2,9 mm bei lateralen Zahnbreiten von 0,2 mm und einer Abtragtiefe von  $c = 0,08$  mm. Mit der im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Parameterkombination ( $P_{av} = 40$  mW,  $H = 160,1$  J/cm<sup>2</sup>,  $PA = 5$  µm,  $BA = 3$  µm,  $dz = 1$  µm) konnten Oberflächenrauheiten von  $Rz = 1,03$  µm und  $Ra = 0,16$  µm realisiert werden [Sch-10a].

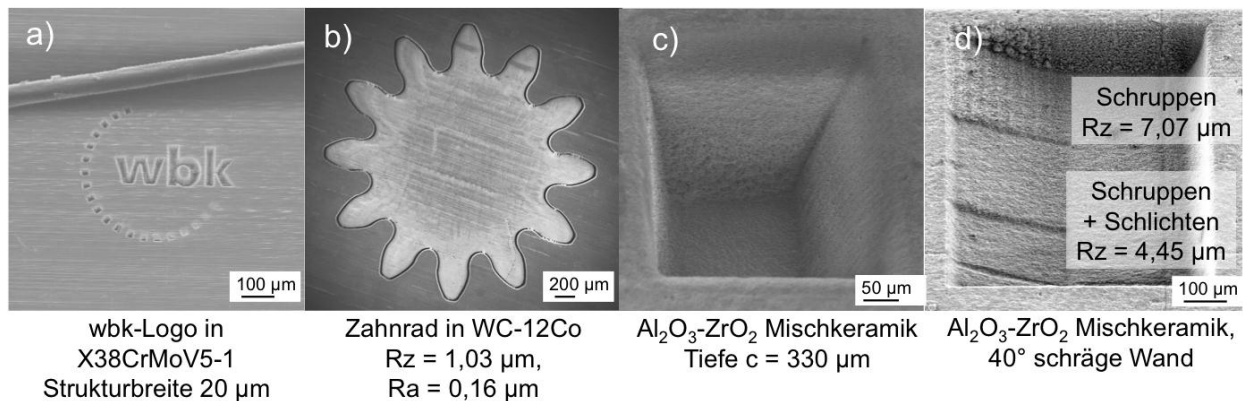


Abbildung 6-3: REM-/ESEM-Aufnahmen von Abtragergebnissen in (a) X38CrMoV5-1 [Sch-10b], (b) WC-12Co [Sch-10a] und (c-d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> [Sch-12]

Eine deutlich tiefere quadratische Kavität von 300 µm x 300 µm mit einer Tiefe von  $c = 330$  µm wurde in die Mischkeramik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> gefertigt (Abbildung 6-3, c). Leichte Wandschrägen von bis zu 3° fördern das Abformen der Struktur im zur Abformung vorgesehenen Metallkapillarspritzgussverfahren [Sch-12].

Abbildung 6-3 (d) zeigt die ESEM-Aufnahme einer Geometrie mit schrägem Wandwinkel von 40° für die Mischkeramik Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>. Zur Reduktion der Bearbeitungszeit wird eine Schrupp- und Schlichtstrategie zur Erzeugung von schrägen Wänden mittels Manipulation der mittleren Laserleistung und der Bearbeitungsstrategie erarbeitet. Um eine solche Wandschräge zu erreichen, wird konventionell mit geringen Abtragraten pro Ebene gearbeitet.

Die geeignete Parametersuche erfolgt im Schnelltest. Für das Schruppen wird die Parameterkombination gewählt, die zu hohen Abtragtiefen pro Ebene führt, für das Schlichten hingegen eine mit kleinen Abtragtiefen. Die konventionelle Abtragstrategie erfolgt mit kleinen Abtragtiefen  $c$  pro Ebene, um eine ausgeprägte Stufenbildung am Rand zu vermeiden. Dafür werden eine Fluenz von 153 J/cm<sup>2</sup>, ein Pulsabstand von 4 µm und ein Bahnabstand von 7 µm in 40 Ebenen eingestellt. Die Abtragtiefe  $c$  pro Ebene beträgt 5 µm. Die Bearbeitungszeit beläuft sich auf 726 s bei einer Abtragrate von 100.000 µm<sup>3</sup>/s.

Beim Schruppen wird mit einem geeigneten Parametersatz (Fluenz gleich 204 J/cm<sup>2</sup>, Puls- und Bahnabstand gleich 5 µm) mit 9 Ebenen ein großes Materialvolumen abgetragen. Dabei entstehen sichtbare Stufen pro ablatierter Ebene, die im nachgeschalteten Schlichtvorgang reduziert werden (Abbildung 6-3, d). Pro Ebene wird eine Abtragtiefe von 22 µm erreicht. Die Abtragrate beträgt dabei 500.000 µm<sup>3</sup>/s bei einer Bearbeitungszeit von 65,4 s.

Im angesprochenen zweiten Schritt wird die erzeugte stufige Schräge durch Schlichten geglättet. Dabei wird der Laserfokus der Sollkontur folgend über die

Spitzen der schrägen Wand verfahren und die Oberfläche durch Sublimation geglättet. Bei Schmelze bildenden Werkstoffen wird im Gegensatz zum Abtragen mit Nanosekundenpulsen bei der Bearbeitung mit Pikosekundenpulsen durch das Schichten das Material nicht umgeschmolzen, sondern ausschließlich ablatiert. Die Entstehung wiedererstarrender Schmelzeschichten kann so vermieden werden. Der Schlichtvorgang dauert 4,8 s. Die Gesamtbearbeitung dauert somit lediglich 70,2 s. An diesem Beispiel wird deutlich, dass durch den Einsatz von Schrump- und Schlichtstrategien der Ablationsprozess im Vergleich zur herkömmlichen Bearbeitung um das 10-fache beschleunigt werden kann [Sch-12].

Daneben wurden die in Abbildung 6-4 abgebildeten Pyramidenkavitäten in WC-12Co und  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  abgetragen. Die jeweilige Einstellung der Parameterkombinationen und die daraus resultierende Tiefe pro Ebene wird zur Berechnung der Wandschrägen genutzt. Die Schräge wird über einfache geometrische Zusammenhänge der Abtragtiefe zur Stufenbreite berechnet. Abbildung 6-4 (a-b) zeigt die dreidimensionalen Ergebnisse für das Hartmetall WC-12Co. Hier wurden Pyramiden mit der Kantenlänge  $200\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$  für a) ( $R_z = 6,47\ \mu\text{m}$ ,  $R_a = 1,12\ \mu\text{m}$ ) und  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  für b) ( $R_z = 3,24\ \mu\text{m}$ ,  $R_a = 0,586\ \mu\text{m}$ ) gefertigt. Bei den Versuchen für WC-12Co entsteht ein Schmelzerand an den Kanten der Kavität, welcher die Oberflächenqualität mindert.

Die Pyramide d) wurde in die  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  Oberfläche mit einer Stufenbreiten von  $11,7\ \mu\text{m}$  in 8 Ebenen ablatiert. Es konnte somit eine Pyramide mit den Kantenlängen von  $150\ \mu\text{m}$ , einer Tiefe von  $70\ \mu\text{m}$  und einer Spitze im Winkel von  $47^\circ$  hergestellt werden. Die Oberflächenrauheit liegt hier bei  $R_z = 13,4\ \mu\text{m}$  und  $R_a = 1,56\ \mu\text{m}$ . Des Weiteren wurde eine defektfreie quaderförmige Kavität mit größeren Stufenbreiten ( $36\ \mu\text{m}$ ) und senkrechten Wänden pro Stufe hergestellt (Abbildung 6-4, e).

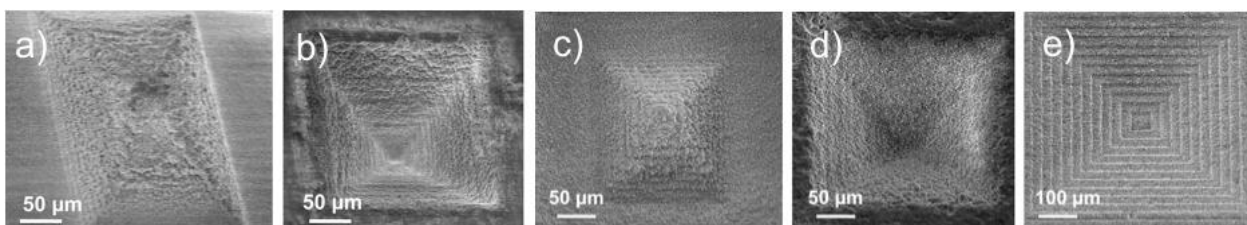


Abbildung 6-4: Pyramidenstrukturen, (a-b) WC-12Co, (c-e)  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$

Es konnte gezeigt werden, dass im Rahmen dieser Arbeit ein Beitrag zur Steigerung der Prozesswiederholbarkeit, Bearbeitungsqualität und Effizienz beim Mikrolaserabtragen geleistet wurde.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Mikrolaserablation begegnet den Anforderungen der Mikrotechnologie durch eine nahezu kraftfreie, berührungslose und flexible Strukturierung in einer Vielzahl von Materialien, unabhängig von ihrer Härte, Transparenz oder elektrischen Leitfähigkeit. Trotz ihres hohen Potenzials birgt diese Technologie Herausforderungen in der Wiederholbarkeit der Prozessvorbereitung, -durchführung und -überwachung.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Prozessverhalten bei variierenden Parametereinstellungen zu erarbeiten und mit einem akustischen Ansatz zur Fokuslagenpositionierung einen Beitrag zur Steigerung der Prozesswiederholbarkeit, Bearbeitungsqualität und Effizienz beim Mikrolaserabtragen zu leisten. Dieses Ziel wurde in den drei Bereichen Prozessgrundlagen, Prozesseinrichtung und Bearbeitungsprozess erarbeitet.

Zunächst wurden das Werkzeug und die Werkstoffe charakterisiert. Darauf aufbauend wurde ein Prozessfenster für WC-12Co empirisch erarbeitet. Dabei konnte Verständnis für das Parameterzusammenwirken erlangt werden, indem systematisch der Einzelpuls-, Bahn-, Flächen- und 2½D-Abtrag untersucht wurde. Für WC-12Co wurden so zehn Parameterkombinationen bestimmt, die zu einer geforderten Oberflächenrauheit von  $R_z \leq 1 \mu\text{m}$  führen. Der Pulsabstand  $PA = 5 \mu\text{m}$  zeigt für alle Bahnabstände ein gleichbleibend gutes Ergebnis und wurde daher für weitere Untersuchungen ausgewählt. Bei symmetrischer Wahl des PA und BA wurde deutlich, dass die maximale Tiefe bei minimaler Rauheit  $R_z$  für Puls- und Bahnabstände von 3 bis 7  $\mu\text{m}$  erreicht werden kann. Mittels automatisierter Abtragregelung wurde anschließend die Zustellung für die Bearbeitung tieferer Kavitäten ermittelt. Es wurde herausgefunden, dass die Tiefe der ersten Ebene nicht der idealen Zustelltiefe für die weiteren Ebenen entspricht. Eine Mittelung der Abtragtiefen über 20 Ebenen führte zu einem Zustellungsinkrement, welches die Fertigung deutlich besserer Oberflächenqualitäten zulässt. Anschließend wurde eine Strategie zur Parametersuche im Schnelltest mittels der Response Surface Methode (RSM) erarbeitet, die es nun ermöglicht in nur 18 Versuchen effizient geeignete Parameterkombinationen für die Laserablation neuer Materialien zu ermitteln.

Zusätzlich wurden das Vorkommen und der Entstehungsmechanismus von Löchern in Kavitäten näher betrachtet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Löcher im Flächengrund, am Rand und in den Ecken von Kavitäten auftreten. Sie entstehen bei gleichen Parametereinstellungen scheinbar stochastisch, sind stets kreisrund und haben Durchmesser von 3 bis 10  $\mu\text{m}$ . Aus

der Literatur lässt sich ableiten, dass Löcher beim Einsatz verschiedener Lasersysteme (unterschiedliche Wellenlängen, Pulsdauern, Repetitionsraten, Fokusedurchmesser) vorkommen. Löcher wurden bislang bei Stählen, Hartmetall, Halbleitersilizium und einer Titanlegierung beobachtet.

Eine Einflussanalyse ergab, dass Einflussfaktoren zur Lochbildung aus den Bereichen der Laserquelle, der Maschine, des Prozesses, des Materials und der Umgebung stammen können. So wurde der Einfluss des Milieus in Form von Abtragpartikeln und des Prozesses, speziell der Fokusslage und des Materials auf die Entstehung von Löchern beleuchtet. Damit können bereits wichtige Mechanismen identifiziert werden. Ein besonders signifikanter Einfluss auf die Lochentstehung wurde in der Schmelzebildung als Materialeigenschaft in Kombination mit einer defokussierten Bearbeitung detektiert. Bei Materialien, die keine Schmelze ausbilden, wie z.B. Keramiken, wurden bislang keine Löcher beobachtet. Es wird vermutet, dass ein Dampfplasma das Laserlicht streuen oder Druck auf die Schmelze ausüben kann, was zur Deformation der Schmelzeoberfläche und zur Bildung von kleinsten Dampfkapillaren führen kann, die bereits nach der Bearbeitung der ersten Ebene als kleinste Löcher in der Oberfläche detektiert werden. Bei der Bearbeitung von fünf Ebenen werden die Löcher durch Mehrfachreflexionen auf einen Durchmesser von ca. 5 µm verstärkt und bei weiterer Bearbeitung nicht mehr maßgeblich aufgeweitet. Eine Schmelzebildung sollte daher bestmöglich vermieden werden, was durch den Einsatz von Lasersystemen mit Pulsdauern kleiner 10 ps geschehen kann. Bei der Metallbearbeitung macht eine Reduktion der Pulsdauer auf ca. 1-10 ps Sinn, um das entstehende Schmelzevolumen zu verringern [Bre-09].

Es wird ein Einfluss der Ablagerungen von Schmelze und größeren Abtragsmengen beobachtet, indem am Rand und in den Ecken der Kavität gehäuft Löcher auftreten. Eine neue Bearbeitungsstrategie, die das Kleinerwerden der Flächen von Ebene zu Ebene vorsieht, verhindert das Einwirken des Lasers in die Ablagerungen am Rand der Kavität und bietet somit Abhilfe. Des Weiteren wurde zur Prävention der Lochentstehung abgeleitet, dass es notwendig ist, die Parameter mit größter Sorgfalt präzise und wiederholbar einzustellen und im Prozess stets konstant zu halten.

Die Steigerung der Prozesszuverlässigkeit und der Wiederholbarkeit der Bearbeitungsqualität wurde mittels einer akustischen Fokuslagenpositionierung und Leistungsregelung realisiert. Dabei wurden optische Emissionen hinzugezogen, um das Verhalten der akustischen Emissionen (AE) im Kontext interpretieren zu können. Das Herzstück der Fokussuche ist der sogenannte „line test“. Dabei werden Bahnen mit variierenden Fokus z-Positionen von oberhalb

bis unterhalb der Werkstückoberfläche ablatiert. Die bislang optisch durchgeführte Fokussuche, sieht eine externe Bewertung der ablatierten Bahnen mit einem Lichtmikroskop vor. Auf stark variierenden Materialoberflächen mit verschiedensten Eigenschaften (reflektierend, transmittierend) gerät diese Methode an ihre Grenzen. Des Weiteren birgt die manuelle und subjektive Beurteilung des Abtraggildes ein hohes Fehlerpotenzial. Die Erfassung des Verhaltens des Prozessleuchtens und/oder der akustischen Emissionen während der Ablation im „line test“ bietet objektive Entscheidungshilfen in Form von einheitlichen Kriterien im Verhalten der AE, die für eine automatische Fokuspositionierung genutzt wurden. Der Verlauf der AE über variierende Fokus z-Positionen zeigt für alle untersuchten Werkstoffe einen eindeutigen Signaleinbruch für die Fokus z-Position auf der Werkstückoberfläche für  $H = 160,1 \text{ J/cm}^2$ . Für die automatisierte Fokuspositionierung mit Hilfe der AE wurde ein eigens entwickeltes LabVIEW-Programm implementiert, welches selbständig mit der Maschinensteuerung kommuniziert und nach klaren Definitionen und Kriterien den Fokus automatisch positioniert. Zudem wurde eine automatische Leistungsregelung im Fokus mittels AE umgesetzt. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass der akustische Ansatz gut geeignet ist, die wiederholgenaue Einrichtung der Bearbeitungsoperationen auch auf optisch herausfordernden (transparenten, spiegelnden etc.) Oberflächen schnell und reproduzierbar durchzuführen.

Die Übertragbarkeit des Verhaltens der AE auf die Bearbeitung mit weiteren Lasersystemen, anderen Wellenlängen und Pulsdauern konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Die Ursache für den lokalen Signaleinbruch könnte dadurch besser verstanden werden und gegebenenfalls auf weitere Anwendungen übertragen werden. Es wird angenommen, dass das Verhalten der AE in Abhängigkeit von dem Pulsüberlapp auf die Bearbeitung mit höheren Repetitionsraten übertragen werden kann, solange Abschirmeffekte durch eine Wechselwirkung mit dem Plasma/Materialdampf ausgeschlossen werden können.

Die Versuche konnten zeigen, dass variierende Materialien ein unterschiedliches Signalverhalten der AE hervorrufen. Dieses Verhalten kann für die Detektion von Materialübergängen in geschichteten Werkstoffverbunden (z.B. widerstandsfähige Keramikbeschichtungen auf Metallen) während der Ablation genutzt werden. Daraus ergeben sich zum Beispiel definierte Abbruchkriterien beim Übergang der Ablation von einem Material zum nächsten, so dass die materialspezifischen Kombinationen aus Prozess- und Laserparametern (Einsatz verschiedener Lasersysteme) für jedes Material gezielt eingestellt werden können.



Diese Werkstoffverbunde finden immer größere Bedeutung im Maschinenbau, insbesondere für thermisch beanspruchte Bauteile. Diese Beschichtungen sind sehr hart und oftmals nicht elektrisch leitfähig, weshalb die Deckschichten mittels konventioneller Zerspanung oder elektrischer/elektrochemischer Abtragverfahren nicht entfernt werden können. Eine solche Übergangsdetektion ist nicht nur für den klassischen Maschinenbau (z.B. Luftfahrt), sondern auch in anderen Bereichen, wie der Lasermedizin von Interesse. In den letzten Jahren besteht zunehmend die Absicht, minimalinvasive Operationsverfahren und eine navigierte Instrumentenführung zur Erhöhung der chirurgischen Präzision zu erreichen. Einer automatisierten Übergangsdetektion von einem Gewebe zum anderen kommt deshalb eine enorme Bedeutung in der mechatronisch assistierten Chirurgie zu, deren Umsetzung mit Unterstützung der Detektion von AE denkbar ist und in zukünftigen Arbeiten vertieft werden sollte.



## Literaturverzeichnis

- [Ale-13] Alexeev, I., Strauss, J., Gröschl, A., Cvecek, K., Schmidt, M.: Laser focus positioning method with submicrometer accuracy. *Appl Opt.* 2013, Jan 20, 52(3), S. 415 - 21, 2013
- [All-87] Allmen, M.: Laser-Beam interactions with materials - Physical principles and applications. Springer Verlag, ISBN 3-540-17568-7, 1987
- [Ash-06] Ashby, M. F., Jones, D. R. H.: Werkstoffe 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe, Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 978-3827417091, 2006
- [Bah-00] Bahnmüller, J.: Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren, Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, 2000
- [Bor-02] Bordatchev, E.V., Nikumb, S.K.: Informational properties of surface acoustic waves generated by laser-material interactions during laser precision machining, *Meas. Sci. Technol. J.* 13 (6), S. 836 - 845, 2002
- [Bor-06] Bordatchev, E.V., Nikumb, S.K.: Effect of focus position on informational properties of acoustic emission generated by laser-material interactions, *Applied Surface Science* Volume 253, Issue 3, Elsevier, S. 1122 - 1129, 2006
- [Bre-01] Breitschwerdt, S.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen, Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, 2001
- [Bre-04] Breitling, D., Ruf, A., Dausinger, F.: Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses, *Proc. SPIE 5339, Photon Processing in Microelectronics and Photonics*, doi:10.1117/12.541434, 2004
- [Bre-09] Breitling, D.: Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung, *Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW, Universität Stuttgart*, 2009

- [Bro-08] Brodmann, R., Brodmann, B., Gräber, J., Ofen, R., Hercke, T., Seewig, J.: Kenngrößen der Mikrostruktur definiert, VDA-Richtlinie für die Oberflächenmessung mit Streulicht. In: QZ Qualität und Zuverlässigkeit 53 (7), S. 46 - 49, 2008
- [Brü-12] Brüning, S. E.: Ultrakurzpuls-Laser zur dreidimensionalen Mikrostrukturierung von Druck- und Prägeformen, Dissertation Aachen, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8440-0879-1, 2012
- [Cap-04] Capitellia, M., Casavola, A., Colonna, G., De Giacomo, A.: Laser-induced plasma expansion: theoretical and experimental aspects, Spectrochimica Acta Part B 59, S. 271 - 289, 2004
- [Cha-12] Chang, G., Tu, Y.: Closed-loop control in ultrafast laser milling process using laser triggered plasma, In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 60, S. 35 - 39, 2012
- [Chi-96] Chichkov, B.N., Momma, C., Nolte, S., Alvensleben, F., Tunnermann, A.: Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, Appl. Phys. A 63, S.109 - 115, 1996
- [Chr-94] Chryssolouris, G.: Sensors in Laser Machining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 43, Issue 2, S. 513 - 519, 1994
- [Dau-07] Dausinger, F.: Präzisionsbohren mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen, Laser Technik Journal, No. 1, 2007
- [DeK-07] De Keuster J.; Duflou, J. R. ; Kruth J.-P.: Monitoring of high-power CO<sub>2</sub> laser cutting by means of an acoustic microphone and photodiodes, In: International Journey of Advanced Manufacturing Technologies 35, S. 115 - 126, London, 2007
- [Dei-06] Deininger, C.: Prozessüberwachung in der Lasermaterialbearbeitung, LTJ, Nr. 4, September, 2006
- [Dia-10] Diaci, J., Možina, J.: On-line Optodynamic Monitoring of Laser Materials Processing, Advanced Knowledge Application in Practice, Igor Fuerstner (Ed.), ISBN: 978-953-307-141-1, InTech, 2010
- [DIN 32540] Laserstrahlabtragen - Thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl, Definitionen, Einflussgrößen, Durchführung, 8/2012, Beuth Verlag GmbH

- [DIN EN 21683] Akustik - Bevorzugte Bezugswerte für akustische Pegel (ISO 1683:1983); Deutsche Fassung EN 21683:1994, Beuth Verlag GmbH
- [DIN EN ISO 4288] Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
- [DIN EN ISO 3274] Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten
- [Du-13] Du, K., Gillner, A.: Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser und deren Anwendungspotenzial, Laser+Photonik 4/2013, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [Dub-08] Dubey, A. K., Yadava, V.: Laser beam machining - A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, S. 609 - 628, 2008
- [Dul-08] Duley, W.W.: UV Lasers: Effects and Applications in Materials Science, Cambridge University Press, 2008
- [Ebe-08] Ebeling, K. J.: Bauelemente der Optoelektronik. Institut für Optoelektronik, Universität Ulm, 2008
- [Eic-04] Eichler, J., Dünkel, L., Eppich, B.: Die Strahlqualität von Lasern, In: Laser Technik Journal, LTJ, Nr. 2, Oktober, 2004
- [Esc-09] Eschenberg, T.; Borsoi Klein, T.; Mattes, A.: Einsatz von Piko-sekundenlasern zur Modifikation von Hochleistungswerkzeugen, Journal Diamond Business, No. 3, S. 6 - 14, 2009
- [Eve-97] Eversheim, W., Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft: Strategie und Technologie, VDI-Buch, Springer Verlag, ISBN: 3-540-62651-4, 1997
- [Fah-07] Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G.: Statistik: Der Weg zur Datenanalyse, Springer Verlag, 2007
- [Far-99] Farson D. F; Kim, K.R.: Generation of optical and acoustic emissions in laser weld plumes, In: Journal of Applied Physics 85, Nummer 3; Columbus/Ohio, 1999
- [Fle-07] Fleischer, J.; Haupt, S.: Online ablation control in micro structuring with ultrashort laser pulses, In: Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Liverpool, 2007

- [Fhj-13] [www.bw.fh-jena.de](http://www.bw.fh-jena.de), Stand: 17.1.2013
- [Fox-02] Fox, M., French, P., Peters, C., Hand, D., Jones, J.: Applications of Optical Sensing for Laser Cutting and Drilling, Applied Optics, Vol. 41, Issue 24, S. 4988 - 4995, 2002
- [Fra-10] Frank, A.: Einführung in die statistische Versuchsplanung, Quality Engineering, TQU Business GmbH, 2010
- [Fra-12] Frauenpreiß, T.: Laser Solutions - Smart and Mobile. ROFIN-SINAR Laser GmbH, International Laser Technology Congress AKL'12, Aachen, 2012
- [Gei-03] Geiger, M.: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, 6. Erlanger Seminar LEF 2003, Erlangen, Meisenbach-Verlag, ISBN 9783875251883, 2003
- [Gei-11] Geisel, M.: Method and device for automatic laser focusing, US Patent 0007304 A1, 2011
- [Gra-93a] Grad, L.: Ultrasonic Monitoring of Excimer Laser Beam Focussing, Ultrasonics International 93, Conference Proceedings, Butterworth-Heinemann Ltd, ISBN 0750618799, 1993
- [Gra-93b] Grad, L., Možina, J.: Acoustic in situ monitoring of excimerlaser ablation of different ceramics, Applied Surface Science, Volume 69, Issues 1 - 4, 2, S. 370 - 375, 1993
- [Gu-96] Gu, H.; Duley, W.W.: A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding, In: Journal of Applied Physics. 29 (1996), S. 556 - 560, o.O. 1996
- [Hau-09] Haupt, S.: Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation, Dissertation, Universität Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik. Shaker-Verlag, 2009
- [Hel-00] Hellrung, D.: Materialabtrag mittels Laserstrahlung zur Herstellung von dreidimensionalen Mikroabformwerkzeugen aus Hartstoffen, Dissertation, Aachen, 2000
- [Her-11] Hering, E., Schönfelder, G.: Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN-10: 3834801690, 2011

- [Hon-04] Honer, M.: Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung, Dissertation Universität Stuttgart, ISBN 3-8316-0441-X, 2004
- [Hüg-09] Hügel, H.: Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3835100053, 2009
- [ISO 11562] Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften
- [Kas-09] Kasashima, N., Kurita, T.: On-machine three-dimensional monitoring technique using machining laser, In: Journal of materials processing technology, S. 657 - 663, 2009
- [Kar-07] Karnakis, D.M., Knowles, M.R.H., Petkov, P.V., Dobrev, T., Dimov, S.: Surface integrity optimisation in ps-laser milling of advanced engineering materials, Proceedings of 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, S. 619 - 623, ISBN 978-3-00-021449-3, 2007
- [Kan-98] Kanicky, V.: Use of Internal Standardization to Compensate for a Wide Range of Absorbance in the Analysis of Glasses by UV Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, In: Optical Society: Applied Spectroscopy, Volume 52, Issue 5, S. 639 - 642, 1998
- [Kie-11] Kienzler, A.: Auswirkungen mechanischer Oberflächenbehandlungen auf die Randschichteigenschaften mikrostrukturierter Formeinsätze. Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-9799-2, 2011
- [Kli-03] Klimentov, S.M., Kononenko, T.V., Pivovarov, P.A., Garnov, S.V., Konov, V.I., Breitling, D., Dausinger, F.: Effect of nonlinear scattering of radiation in air on material ablation by femtosecond laser pulses, Proc. Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies, Proc. SPIE 5121, Moskau, S. 77 – 86, 2003
- [Kli-04] Klinger, P.: Regelung des Nd:YAG-Formabtrags mit optischen Sensoren, Dissertation, TU München, Shaker-Verlag, 2004

- [Klo-07] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren 3, Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung, Verein Deutscher Ingenieure, ISBN 3540345795, Springer London, 2007
- [Kne-08] Kneubühl, F. K., Sigrist, M. W.: Laser, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3835101456, 2008
- [Kno-06] Knowles, M.R.H., Rutterford, G., Karnakis, D., Dobrev, T., Petkov, P., Dimov, S.: Laser micro-milling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers, Proceedings of the second international conference on multimaterial micro manufacture (4M), 2006
- [Koc-11] Koch, J.: Laserendbearbeitung metallischer Werkstoffe, Dissertation TU Ilmenau, ISBN 978-3939473954, 2011
- [Kol-06] Kollmann, F. G.: Praktische Maschinenakustik, Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-20094-9, 2006
- [Kön-06] König, J.: Abtragsprozesse bei Bestrahlung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen, Dissertation Friedrich-Schiller Universität Jena, 2006
- [Kor-07] Kordt, J.: Konturnahes Laserstrahlstrukturieren für Kunststoffspritzgießwerkzeuge, Dissertation, RWTH Aachen Universität, 2007
- [Kra-13] Kraft, O: Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung Urgeformter Mikroteile aus Metallischen und Keramischen Werkstoffen, Abschlussbericht Sonderforschungsbereich 499, KIT Scientific Reports 7607, KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3866448124, 2013
- [Krü-00] Krüger, J.: Ultrakurze Laserimpulse in der Mikromaterialbearbeitung, Dissertation, ISBN 978-3898250344, 2000
- [Läß-94] Läßiger, B.: Kontrollierter Formabtrag durch Sublimation mittels Laserstrahlung, Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 1994
- [Lee-87] Lee, C.S., Kim, S.W., Yim, D.Y., Tönshöff, H.K.: An In-Process Measurement Technique Using Laser for Non-Contact Monitoring of Surface Roughness and Form Accuracy of Ground Surfaces, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 36, Issue 1, S. 425 - 428, 1987



- [Ler-09] Lerch, R.; Sessler, G.M.; Wolf, D.: Technische Akustik - Grundlagen und Anwendung, Springer Verlag, ISBN-13 978-3540234302, 2009
- [Li-92] Li, L.; Steen, W. M.: Non-contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing, In: Laser materials processing, ICALEO '92, Orlando, Florida, 1992
- [Lie-05] Liess, H.: Untersuchung von Laser-, Funkenerosions- und Räumverfahren zur Herstellung von zyklodischen Mikroverzahnungen, Dissertation, München, VDI-Verlag, ISBN 9783183657025, 2005
- [Liu-05] Liu, G., Toncich, D., Harvey, E., Yuan, F.: Diagnostic technique for laser micromachining of multi-layer thin films, In: International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, S. 583 - 589, 2005
- [Lor-09] Lorenz, A.: Analyse des Laserstrahlabtrags für den wirtschaftlichen Einsatz im Werkzeug- und Formenbau, Dissertation TU Hamburg-Harburg, iLAS, Cuvillier Verlag, ISBN-13: 978-3867278508, 2009
- [Lu-96] Lu, Y.F., Hong, M.H., Chua, S.J., Low T.S.: Acoustic wave monitoring in pulsed laser interaction with materials, Advanced Applications of Lasers in Materials Processing, IEEE, 1996
- [Mar-05] Marz, J.: Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess ( $\mu$ PEP) für werkzeuggebundene Mikrotechniken, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), IPEK Forschungsberichte Band 17, ISSN 1615-8113, 2005
- [Mei-95] Meiners, E.: Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozess, Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW, Teubner Verlag, 1995
- [Miy-93] Miyazaki, T.; Tanaka, Y., Tokunaga, T., Taniguchi, N.: Controlling Q-switched YAG Laser Drilling Process by Generated Sound, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 42, Issue 1, S. 243 - 246, 1993
- [Mül-02] Müller, M.G.: Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung, Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3-8316-0144-8, 2002

- [Mye-95] Myers, R., Montgomery, D.C.: Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, Wiley Verlag, 1995
- [Nis-10] Nishiwaki, M., Iri, J., Inada, G., Sugama, S.: Automatic focusing apparatus, laser processing apparatus, and laser cutting apparatus, US Patent 7791001, 2010
- [Opt-12] Optech-Consulting: Höhenflug im Laseranlagen-Markt. Photonik NL7/2012, Fachzeitschrift für die Optischen Technologien, 28.3.2012
- [Pas-08] Paschotta, R.: Encyclopedia of Laser Physics and Technology, Wiley-VCH Verlag, ISBN 978-3527408283, 2008
- [Pet-08] Petkovsek, R.: Optodynamic monitoring of laser micro-drilling of glass by using a laser probe, In: Applied Physics A - Materials Science & Processing, Heft Volume 93; S. 141 - 145, 2008
- [Pio-11] Piotter, V., Bauer, W., Knitter, R., Mueller, M., Mueller, T., Plewa, K.: Powder injection moulding of metallic and ceramic micro parts, Microsystem Technologies, S. 251 - 263, 2011
- [Pir-79] Pirri, A.N., Root, R.G., Wu, P.K.S.: Plasma Energy Transfer to Metal Surfaces Irradiated by Pulsed Lasers, AIAA Journal 16, 1979
- [Pop-05] Poprawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur (VDI-Buch), Springer Verlag, 2005
- [Pre-11] Prehm, J., Dellinger, P., Roxlau, C., Möhwald, K., Bach, Fr.-W.: Entwicklung einer Fertigungstechnik für Metall-Kapillardruckgießprozesse, Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, Karlsruhe, Germany, Verlag KIT Scientific Reports, ISBN ISBN 978-3-86644-747-9, S. 193 - 198, 2011
- [Rai-05] Raimund, V.: Rauheitsmessung Theorie und Praxis, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., München, Beuth Verlag GmbH, 2005
- [Ree-10] Reek, A.: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen, Dissertation Universität München, Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3896757302, 2000
- [Ren-11] Renishaw: White Paper, Productive Process Pyramid™, 2011

- [Ruf-04] Ruf, A.: Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern., München, Herbert Utz-Verlag, 2004
- [Sac-06] Sachs, L.: Statistische Methoden 2: Planung und Auswertung. Springer Verlag, 2006
- [Sch-00] Schittenhelm, H.: Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen, Dissertation Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, 2000
- [Sfb-10] N. N.: Sonderforschungsbereich (SFB) 499: Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikroteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen, Internet: [www.sfb499.de](http://www.sfb499.de). Stand: 2010. Zuletzt aufgerufen: 08.10.2010
- [Sch-08] Schille, J., Ebert, R., Loeschner, U., Regenfass, P., Suess, T., Exner, H.: Micro structuring with highly repetitive ultra short laser pulses, Proceedings of LPM2008 - the 9th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2008
- [Sch-09a] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Implementation of on-machine measurements using confocal white-light sensors for micro Electrical Discharge Machining and micro laser ablation, 4M/ICOMM 2009 Conference, The Global Conference on Micro Manufacture, Karlsruhe, S. 179 - 182, 2009
- [Sch-09b] Schulz, W., Eppelt, U.: The Theory of Laser Materials Processing, Basic Concepts of Laser Drilling, Springer Verlag, ISBN 978-1402093395, 2009
- [Sch-10a] Schulze, V.; Weber, P.: Precise ablation milling with ultra short pulsed Nd:YAG lasers by optical and acoustical process control, SPIE Photonics West 2010 – LASE, San Francisco, USA, 23.01.–28.01.2010. Proceedings of SPIE Volume 75850J-1, document 7585-18, 2010
- [Sch-10b] Schulze, V.; Weber, P.; Deuchert, M.; Haupt, S.; Ruhs, C.; Kienzler, A.: Limits and challenges of manufacturing micro moulds. in: International Journal of Nanomanufacturing, Jahrgang 2010, Heft/Band Vol. 6, No.1/2/3/4, Verlag Inderscience Publishers, DOI 10.1504/IJNM.2010.034782, S. pp. 176 – 189, 2010

- [Sch-11] Schmid, M., Neuenschwander, B., Romano, V., Jaeggi, B., Hunziker, U.: Processing of metals with ps-laser pulses in the range between 10 ps and 100 ps, Proc. SPIE 7920, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM), doi:10.1117/12.879498, 2011
- [Sch-12] Schulze, V.; Weber, P.: Automated laser power control for roughing and finishing in micro laser machining. 4M/ICOMM 2012 Conference, 9.-11.10.2012, Wien, Österreich, Band 4M/ICOMM 2009 - The Global Conference on Micro Manufacture, 2012
- [Sch-13] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen, Springer Verlag, ISBN: 978-3-642-34699-6, 2013
- [Sei-06] Seibold, G.: Absorption technischer Oberflächen in der Laser-materialbearbeitung, Universität Stuttgart, Dissertation, Herbert Utz Verlag, ISBN-13: 978-3831606184, 2006
- [Ser-08] Serbin, J.: Ultrakurzpulslaser, fit für die Industrie, Laser + Produktion, 2008
- [She-94a] Sheng, P., Chryssolouris, G.: Investigation of acoustic sensing for laser machining processes Part 1: Laser drilling, Journal of Materials Processing Technology, Volume 43, Issues 2 - 4, S. 125 - 144, 1994
- [She-94b] Sheng, P., Chryssolouris, G.: Investigation of acoustic sensing for laser machining processes Part 2: Laser grooving and cutting, Journal of Materials Processing Technology, Volume 43, Issues 2 - 4, S. 145 - 163, 1994
- [Som-10] Sommer, S.: Effizienzsteigerung beim präzisen Oberflächenabtragen mit ultrakurzen Laserpulsen, RWTH Aachen Universität, Dissertation, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-9549-3, 2010
- [Ste-10] Steglich, K.H.: Reinigung und Strukturierung empfindlicher Oberflächen mittels Excimerlaserstrahlung, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-8782-5, 2010
- [Sto-10] Stournaras, A.; Chryssolouris G.: On acoustic emissions in percussion laser drilling, In: The International Journey of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 46, London, S. 611-620, 2010

- [Str-09] A. Streek, K. Kujawa, L. Hartwig, S. Klötzer, J. Schille, U. Löschner, R. Ebert, B. Steiger, H. Exner: Visualisierung von Laser-Material-Wechselwirkungsprozessen, 20th International Scientific Conference Mittweida, Scientific Reports Nr. 4, S. 65 - 71, 2009
- [Str-12] Strategies Unlimited, Industrial Laser Solutions, 2012
- [Stü-95] Stürmer, M.: Materialabtrag mit Nd:YAG-Lasern, Dissertation, VDI-Verlag, 1995
- [Tat-02] Tatah, A., Liu, X.: Method and apparatus for focusing a laser, US Patent 6355908, 2002
- [Vei-05] Veit, I.: Technische Akustik: Grundlagen der physikalischen, physiologischen und Elektroakustik, Vogel-Fachbuch, Kamprath-Reihe, 2005
- [Wal-10] Walter, D.: Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung, Herbert Utz Verlag GmbH, München, ISBN 978-3-8316-0968-0, 2010
- [Wan-08] Wang, W., Mei, X., Jiang, G., Lei, S., Yang, C.: Effect of two typical focus positions on microstructure shape and morphology in femtosecond laser multi-pulse ablation of metals, Elsevier, Applied Surface Science, Vol. 255, S. 2303 - 2311, 2008
- [Wei-05] Weikert, M.: Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen, Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW). Herbert Utz-Verlag, 2005
- [Yeh-01] Yeh, L.: Einfluss von Bearbeitungsparametern auf die Oberflächen- und Werkstoffeigenschaften von laserbearbeiteten Mikrobauteilen, Dissertation Aachen, Shaker Verlag, ISBN 9783826586538, 2001
- [Zen-06] Zeng, X., Mao, X., Mao, S., Wen, S., Greif, R., Russo, R.: Laser-induced shockwave propagation from ablation in a cavity, Appl. Phys. Lett. 88, doi: 10.1063/1.2172738, 2006

## Anhang

### Anhang A: Prozessparameterfindung im Schnelltest mittels Response Surface Methode (RSM) für SiC

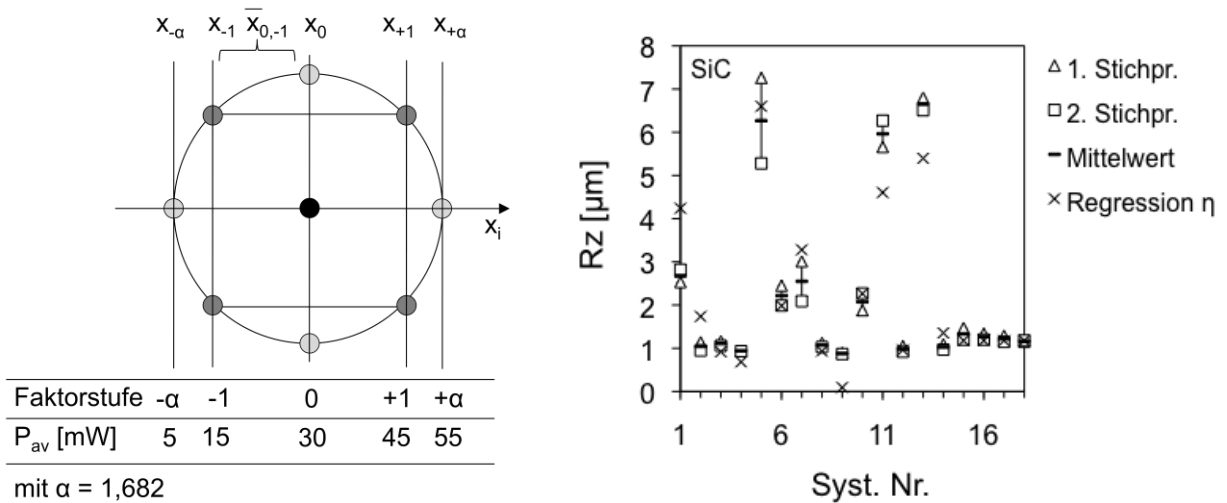


Abbildung 7-1: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan, Response Surface Design (links), Streuung der Rauheitsmesswerte  $Rz$  über vier Stichproben, Mittelwert und ermittelte Regression, SiC (rechts)

Tabelle 7-1: Statistische Auswertung und Überprüfung der Güte der Modellanpassung, SiC

Modell	F-Wert	$R^2$	$R^2_{adj}$	PRESS
Linear	18,9	0,6117	0,5793	66,96
Gemischte Wechselwirkungen	30348	0,6911	0,635	57,72
Quadratisch	16,21	0,8822	0,8468	34,38

*Tabelle 7-2: Errechnete Regressionskoeffizienten für SiC*

Faktor	Koeffizient	errechneter Schätzwert
Konstante	$\beta_0$	8,46495
A (Pulsleistung)	$\beta_1$	0,177622
B (Pulsabstand)	$\beta_2$	-2,5671
C (Bahnabstand)	$\beta_3$	-2,88703
AA	$\beta_4$	-0,000351382
AB	$\beta_5$	-0,0173806
AC	$\beta_6$	-0,0210917
BB	$\beta_7$	0,278778
BC	$\beta_8$	0,22825
CC	$\beta_9$	0,336525

*Tabelle 7-3: Zusätzliche Parametersätze errechnet mittels OR-Methode, SiC*

Pulsleistung $P_{av}$ [mW]	Pulsabstand PA [ $\mu\text{m}$ ]	Bahnabstand BA [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
5	3,7	3,1	0,791	0,152
10	4,1	3,5	0,817	0,175
15	4	3,5	0,922	0,169
20	4	3,7	0,948	0,175
30	3	4,2	0,886	0,158
40	4	3,8	0,975	0,198

**Anhang B: Box-Plot-Diagramme der AE nach FFT bei variierender Laser z-Position, WC-12Co,  $P_{av} = 40$  mW,  $PA = 0,1$   $\mu\text{m}$ , Median,  $z_{OF} = 0$  mm**

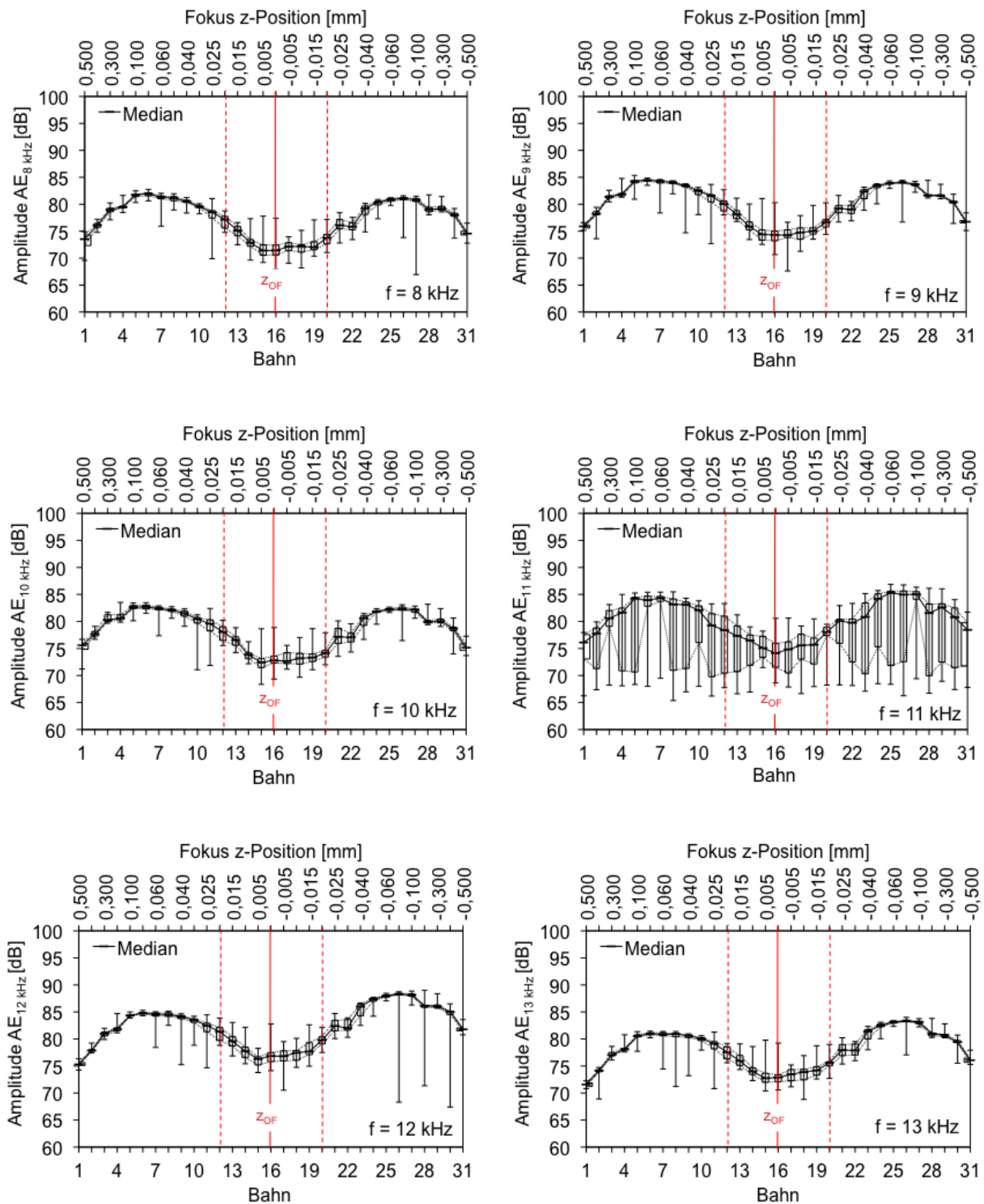


Abbildung 7-2: WC-12Co, Box-Plot-Diagramme der AE nach FFT, Auszug des 8 -13 kHz-Frequenzverhaltens bei der Ablation von Bahnen ( $L = 0,4$  mm) unterschiedlicher z-Positionen der Fokuslage



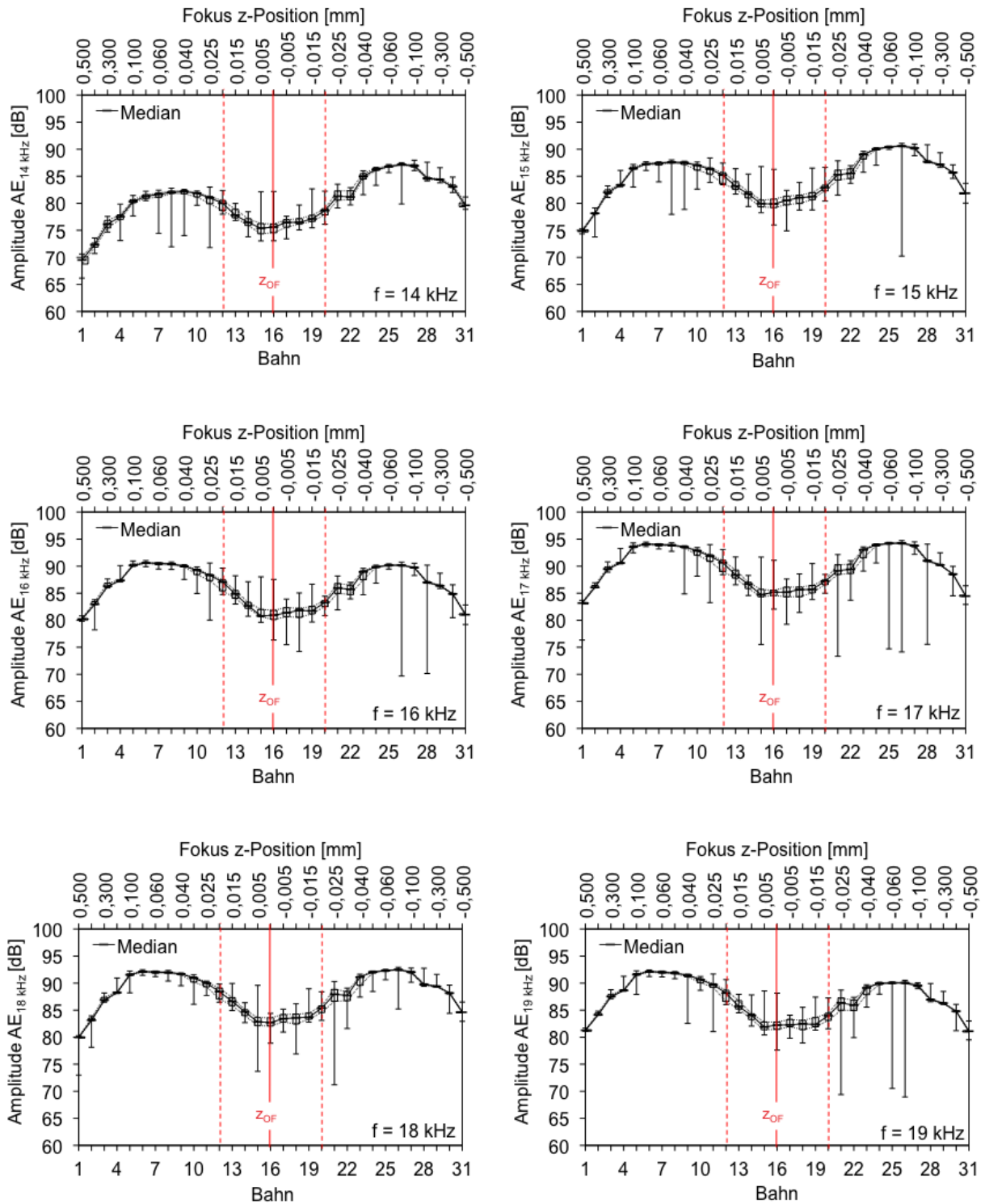
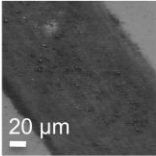
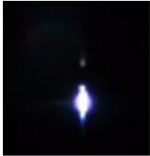
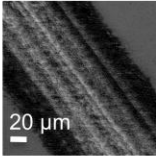
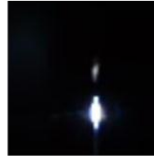
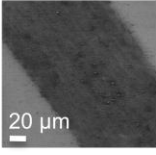

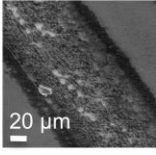

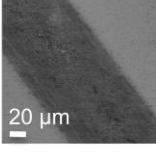
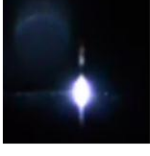
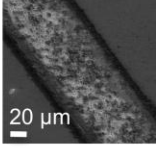

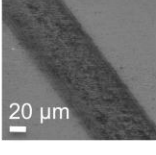

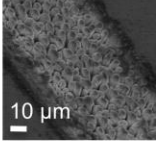
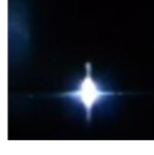
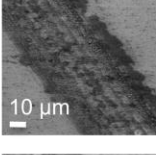

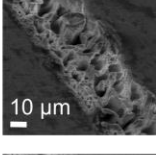
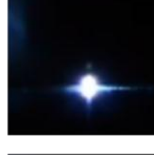
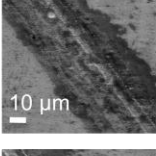
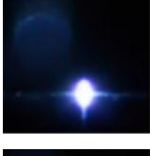
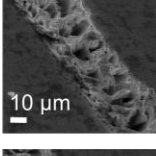
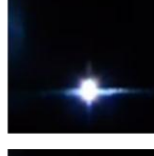
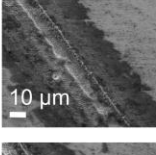

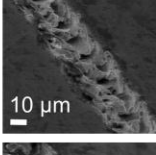
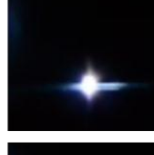
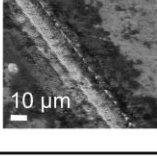
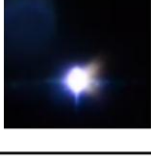
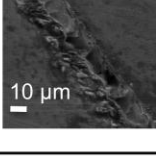
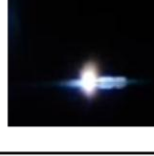
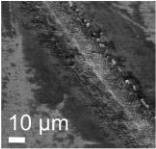

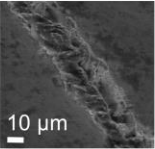

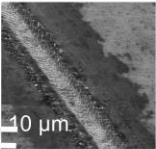

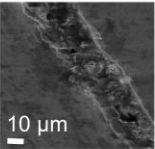

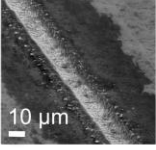

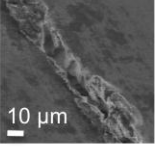

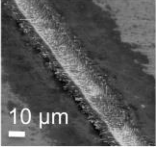

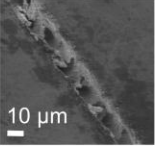

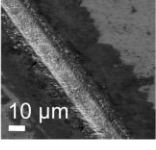

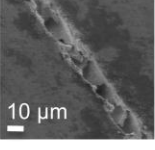

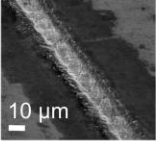

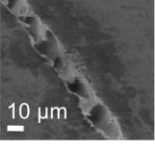

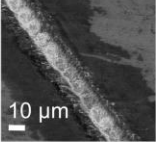

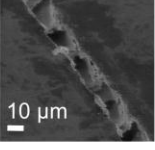

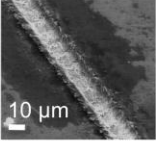

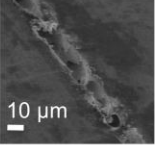



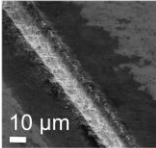

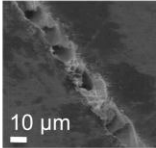

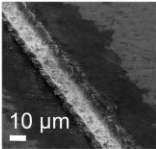

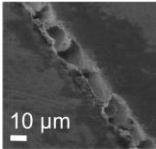

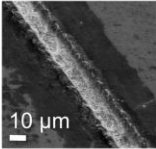

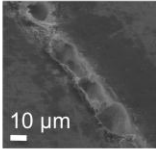

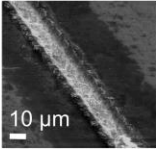

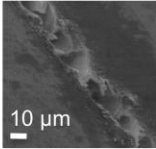

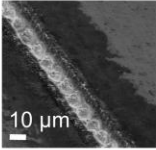

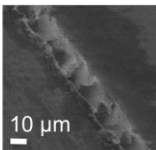

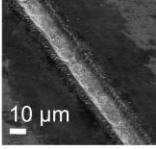

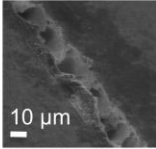

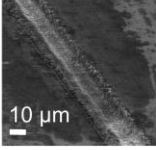

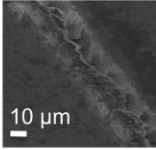

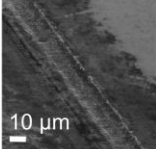

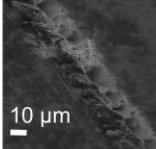

Abbildung 7-3: WC-12Co, Box-Plot-Diagramme der AE nach FFT, Auszug des 14 -19 kHz-Frequenzverhaltens bei der Ablation von Bahnen ( $L = 0,4 \text{ mm}$ ) unterschiedlicher z-Positionen der Fokuzlage

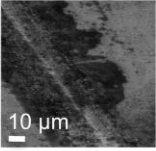
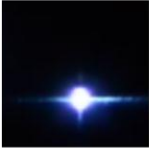
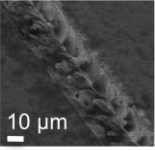

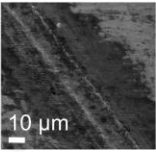

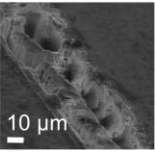

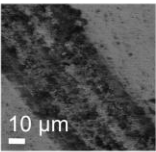

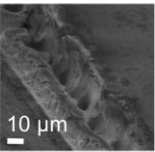

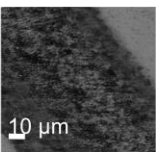

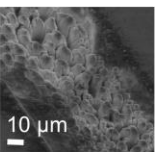

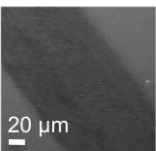
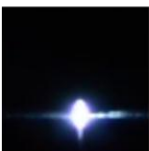
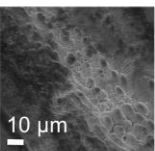
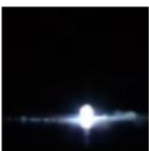
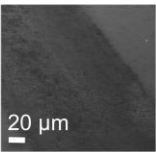

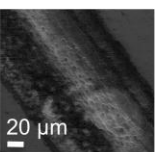
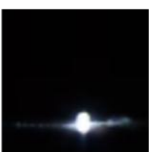
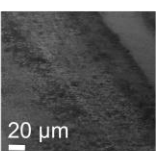
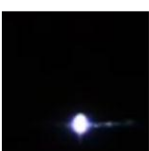
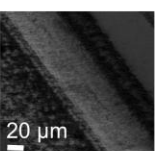
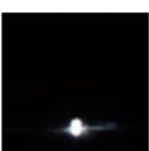
### Anhang C: WC-12Co, REM- und Prozessleuchtaufnahmen für Bahnen bei variierender Fokus z-Zustellung pro Bahn

Parameter:  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links),  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts),  $z_{OF} = 0 \text{ mm}$

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
1	0,5				
2	0,4				
3	0,3				
4	0,2				
5	0,1				
6	0,08				
7	0,06				
8	0,05				

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
9	0,04				
10	0,03				
11	0,025				
12	0,02				
13	0,015				
14	0,01				
15	0,005				
16	0,00				

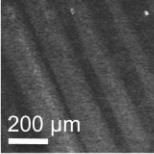

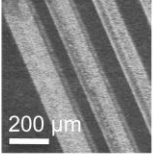

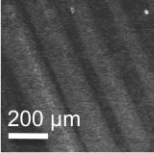

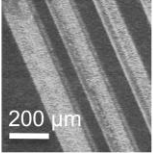

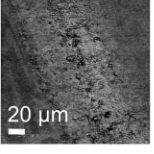

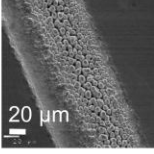

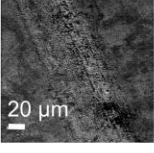

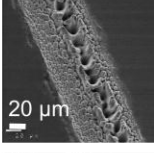

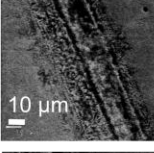

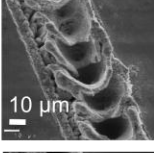

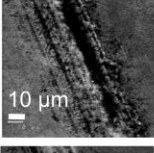

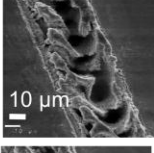

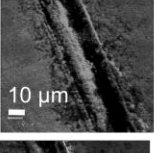

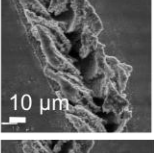

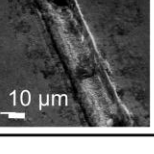

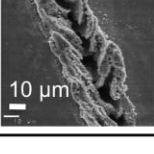

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
17	-0,005				
18	-0,01				
19	-0,015				
20	-0,02				
21	-0,025				
22	-0,03				
23	-0,04				
24	-0,05				

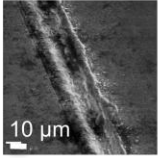

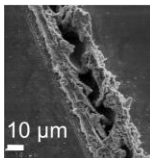

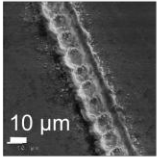

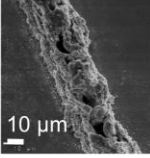

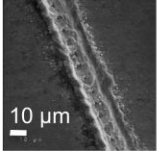

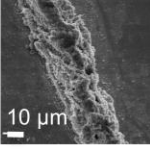

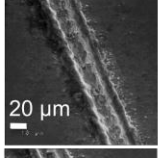

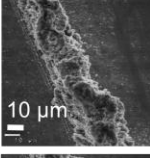

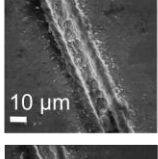

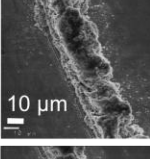

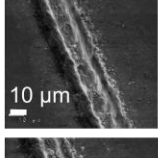

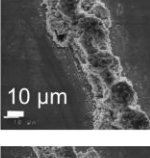

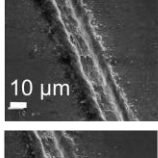

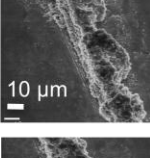

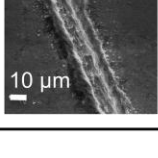

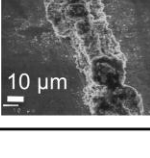

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
25	-0,06				
26	-0,08				
27	-0,1				
28	-0,2				
29	-0,3				
30	-0,4				
31	-0,5				

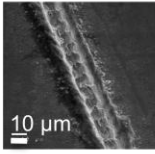

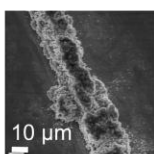

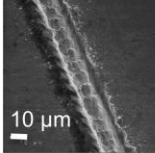

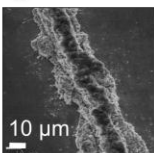

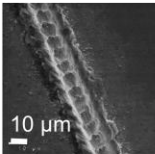

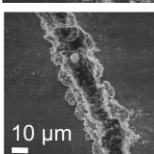

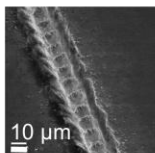

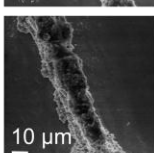

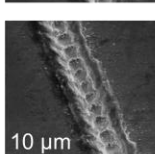

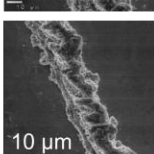
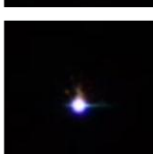
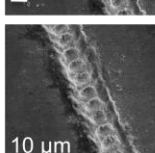

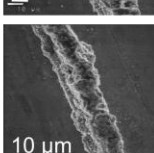

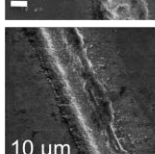

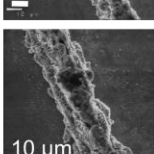

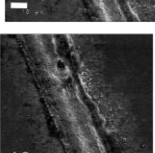

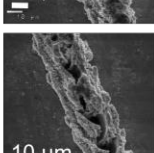



## Anhang D: 30CrMo6, REM- und Prozessleuchtaufnahmen für Bahnen bei variierender Fokus z-Zustellung pro Bahn

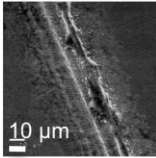

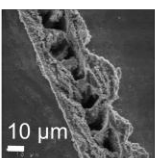
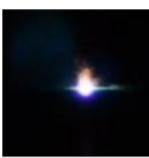
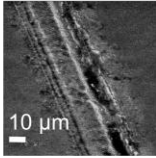

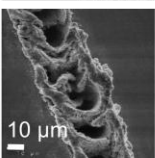

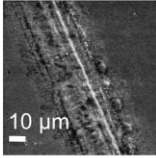

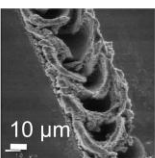

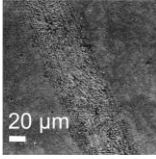

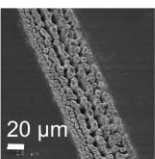

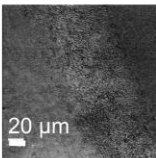

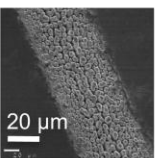

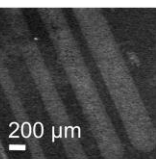

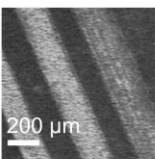

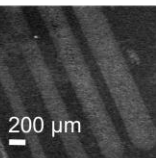

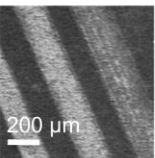

Parameter:  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links),  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts),  $z_{OF} = 0 \text{ mm}$

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
1	0,5				
2	0,4				
3	0,3				
4	0,2				
5	0,1				
6	0,08				
7	0,06				
8	0,05				

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
9	0,04				
10	0,03				
11	0,025				
12	0,02				
13	0,015				
14	0,01				
15	0,005				
16	0,00				

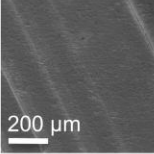

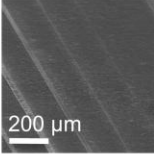

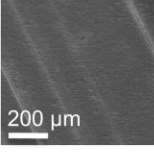
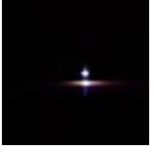
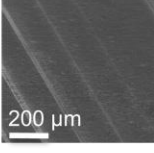

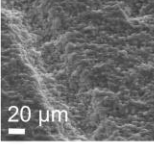

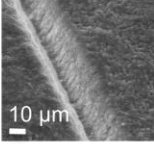

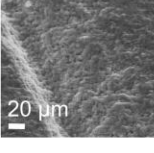
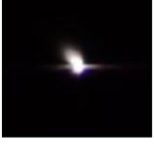
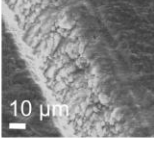

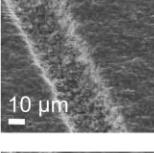
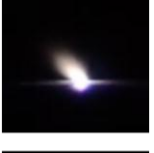
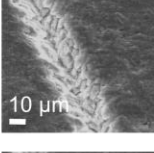
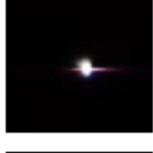
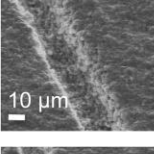
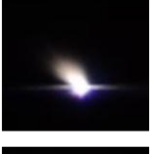
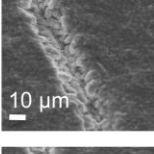
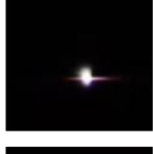
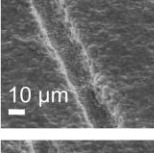

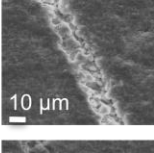

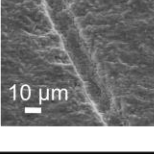
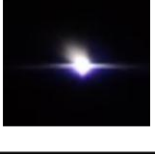
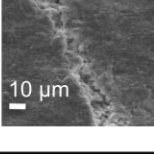
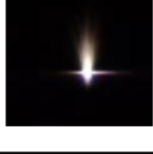
Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
17	-0,005				
18	-0,01				
19	-0,015				
20	-0,02				
21	-0,025				
22	-0,03				
23	-0,04				
24	-0,05				

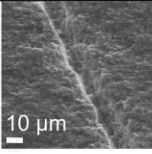

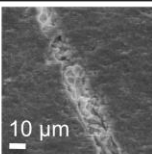
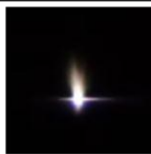
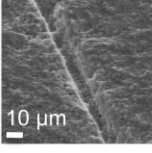

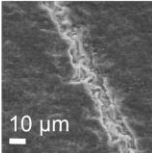
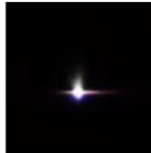
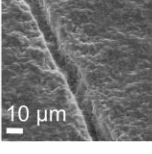

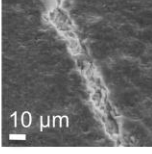
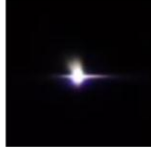
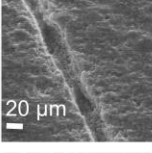

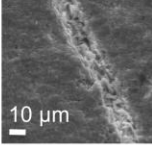
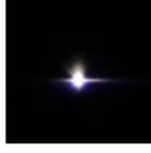
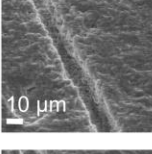

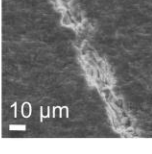
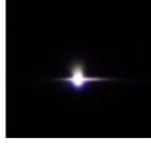
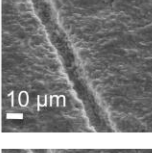
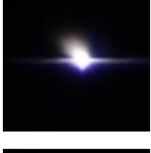
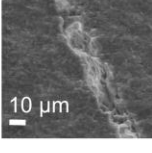
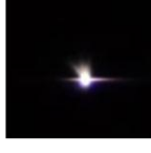
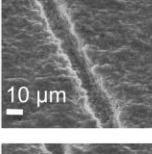

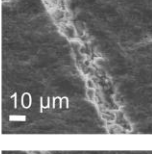
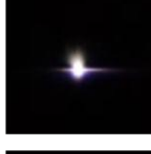
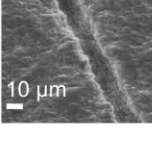

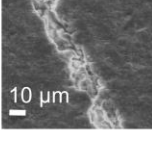



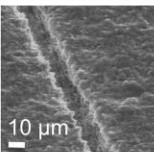

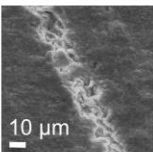

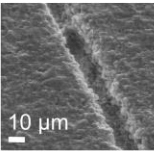

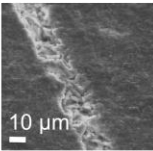

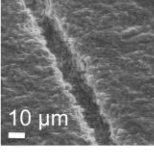

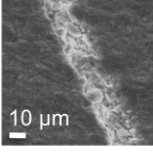

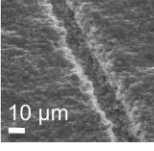

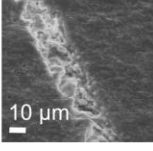
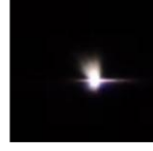
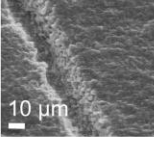

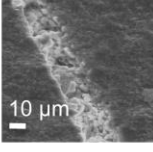
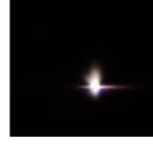
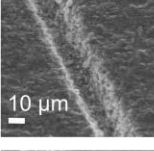
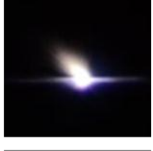
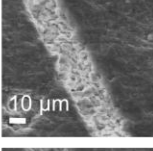
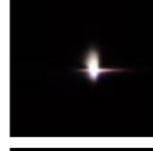
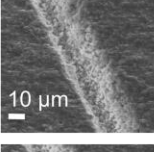

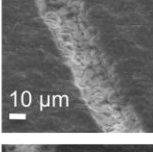
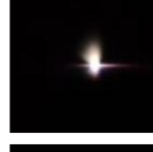
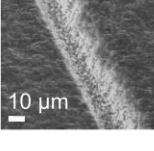
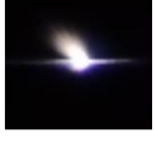
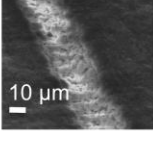
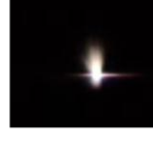
Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
25	-0,06				
26	-0,08				
27	-0,1				
28	-0,2				
29	-0,3				
30	-0,4				
31	-0,5				

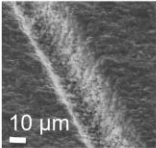

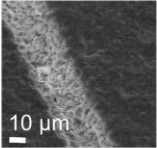

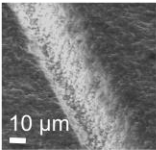

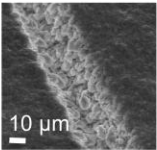

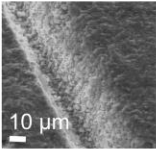

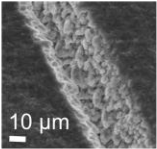

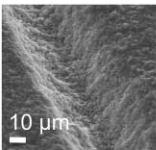
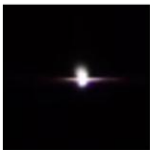
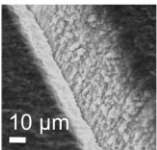

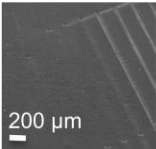
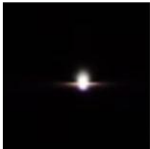
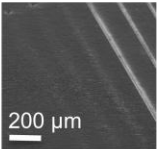

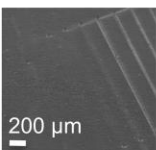

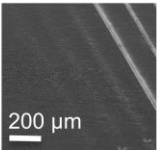

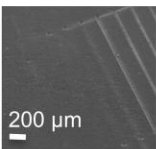

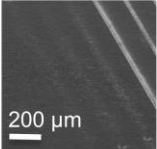

## Anhang E: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>, REM- und Prozessleuchtaufnahmen für Bahnen bei variierender Fokus z-Zustellung pro Bahn

Parameter:  $P_{av} = 40 \text{ mW}$ ,  $PA = 1 \mu\text{m}$  (links),  $PA = 0,1 \mu\text{m}$  (rechts),  $z_{OF} = 0 \text{ mm}$

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
1	0,45				
2	0,35				
3	0,25				
4	0,15				
5	0,05				
6	0,03				
7	0,01				
8	0,00				

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
9	-0,01				
10	-0,02				
11	-0,025				
12	-0,03				
13	-0,035				
14	-0,04				
15	-0,045				
16	-0,05				

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
17	-0,055				
18	-0,06				
19	-0,065				
20	-0,07				
21	-0,075				
22	-0,08				
23	-0,09				
24	-0,1				

Bahn	Fokus z-Pos.	PA = 1 $\mu\text{m}$		PA = 0,1 $\mu\text{m}$	
		REM	PL	REM	PL
25	-0,11				
26	-0,13				
27	-0,15				
28	-0,25				
29	-0,35				
30	-0,45				
31	-0,55				

## Anhang F: Zuordnung der Bahnnummer den Fokus z-Position für WC-12Co

*Tabelle 7-4: Zuordnungstabelle der Fokus z-Position zur ablatierten Bahn*

Bahn	1	2	3	4	5	6	
z-Pos. [mm]	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,08	
Bahn	7	8	9	10	11	12	
z-Pos. [mm]	0,06	0,05	0,04	0,03	0,025	0,02	
Bahn	13	14	15	16	17	18	
z-Pos. [mm]	0,015	0,01	0,005	0	-0,005	-0,01	
Bahn	19	20	21	22	23	24	
z-Pos. [mm]	-0,015	-0,02	-0,025	-0,03	-0,04	-0,05	
Bahn	25	26	27	28	29	30	31
z-Pos. [mm]	-0,06	-0,08	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5