

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

M. Weikert
Oberflächenstrukturieren mit ultra-
kurzen Laserpulsen

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen

von Dr.-Ing. Michael Weikert
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2005

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2006

ISBN 3-8316-0573-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung

In jüngerer Zeit steigt das industrielle Interesse an der Mikrostrukturierung von Oberflächen, beispielsweise zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften. Das Abtragen mit Laserstrahlung stellt eine flexible Möglichkeit zur Herstellung solcher Strukturen dar, beispielsweise beim so genannten Laserhonen von Zylinderlaufbahnen in Verbrennungsmotoren. Bei dieser Anwendung werden Ölförderstrukturen in die Zylinderwand eingebracht, wodurch Ölverbrauch und Partikelemission deutlich reduziert werden können.

Die heute üblicherweise eingesetzten Laserstrahlquellen arbeiten mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich, was zur Bildung von Schmelzschichten und Graten führt. Zahlreiche Veröffentlichungen zeigen, dass die Entstehung von Schmelze durch Verkürzung der Pulsdauer in den Femtosekundenbereich vermieden werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss grundlegender Prozessparameter beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen untersucht. Das Ziel war ein erweitertes Prozessverständnis im Hinblick auf eine mögliche industrielle Umsetzung. Die Experimente zeigten, dass eine weitgehend schmelzfreie Bearbeitung bei Pulsdauern unterhalb von 10 ps möglich ist, wenn eine Energiedichte knapp oberhalb der Abtragschwelle gewählt wird. Eine höhere Pulsenergie führt auch bei Femtosekundenpulsen zur Bildung von Schmelze, während die Pulsdauer unterhalb von etwa 10 ps einen eher geringen Einfluss auf die Entstehung von Schmelze hat. Aufgrund der geringen Energiedichte ist die Abtragsrate sehr gering. Eine Möglichkeit, die Abtragsrate bei gleich bleibender Qualität zu steigern, ist die Verwendung von Strahlquellen mit hoher Repetitionsrate.

Mit verfügbaren Laserstrahlquellen lassen sich Muster und Prototypen in kurzer Zeit herstellen, die Anwendung in der Serienfertigung wird jedoch von der Entwicklung industrietauglicher Laserstrahlquellen abhängig sein. Aus den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit lässt sich ableiten, dass für eine wirtschaftliche Anwendung Strahlquellen mit einer Repetitionsrate von einigen 100 kHz bei einer Pulsenergie von mehr als 20 μJ notwendig sind.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis	7
Verzeichnis der Symbole	9
Extended Abstract	13
1 Motivation und Zielsetzung	17
2 Stand der Technik und des Wissens	20
2.1 Abtragsverfahren	20
2.1.1 Mechanische Verfahren	20
2.1.2 Elektroerosive Verfahren (EDM)	22
2.1.3 Ätzverfahren	22
2.1.4 Elektronen- und Ionenstrahlabtragen	24
2.1.5 Laserabtragen	25
2.1.6 Kombination von Verfahren	26
2.1.7 Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen	26
2.2 Physikalische Grundlagen	27
2.2.1 Absorption elektromagnetischer Strahlung	28
2.2.2 Wärmetransport in Materie	30
2.2.3 Plasma und Materialdampf	32
2.3 Ergebnisse grundlegender Untersuchungen	33
3 Experimentelle Grundlagen	37
3.1 Erzeugung ultrakurzer Laserpulse	37
3.2 Eingesetzte Lasersysteme	42

3.3	Strahlführung und Strahlformung.....	44
3.4	Geometrierzeugung.....	46
3.5	Probenaufbereitung.....	56
4	Experimentelle Untersuchungen	63
4.1	Einfluss verschiedener Prozessparameter.....	63
4.1.1	Pulsdauer	63
4.1.2	Energiedichte.....	68
4.1.3	Pulsüberlapp	72
4.1.4	Multipass-Abtragen	79
4.1.5	Fokuslage	90
4.1.6	Repetitionsrate.....	93
4.2	Vergleich unterschiedlicher Lasersysteme	96
4.3	Anwendungsbeispiele	98
4.3.1	Probekörper für tribologische Untersuchungen	98
4.3.2	Einlaufstrukturen an Turbinenschaufeln	99
4.3.3	Herstellung von Druck- und Prägeformen	100
5	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Literatur- und Quellenverzeichnis	105

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Absorptionsgrad	-
C_e	Wärmekapazität der Elektronen	J/m ³ K
C_i	Wärmekapazität des Ionengitters	J/m ³ K
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
D	Strahldurchmesser auf der Fokussieroptik	m
d_F	Strahlfleckdurchmesser auf dem Werkstück	m
d_W	Wirksamer Strahlfleckdurchmesser	m
d_{zR}	Strahldurchmesser nach der Rayleigh-Länge	m
E	Leistungsdichte (Intensität)	W/m ²
F	F-Zahl, Fokussierzahl	-
f	Frequenz	1/s
f	Fokuslänge	m
f_p	Repetitionsrate	Hz
G	Elektron-Phonon-Kopplungskonstante	W/m ³ K
H	Energiedichte (Fluenz)	J/m ²
$\vec{j}_{th}$	Wärmestromdichte	W/m ²
k	Absorptionsindex	-
L	Resonatorlänge	m
l_{th}	Thermische Eindringtiefe (Diffusionslänge)	m
l_α	optische Eindringtiefe (Absorptionslänge)	m
M^2	Beugungsmaßzahl	-
N	Zählvariable	-

n	Brechungsindex	-
n_k	komplexer Brechungsindex	-
p	Anzahl der Pulse pro Längeninkrement	-
$\dot{q}$	Volumenleistungsdichte	W/m ³
R	Reflexionsgrad	-
s_P	Vorschub pro Puls	m
T	Transmissionsgrad	-
T_b	Siedetemperatur	K
T_e	Elektronentemperatur	K
T_i	Ionentemperatur	K
T_m	Schmelztemperatur	K
t	Strukturtiefe	m
t	Zeit	s
V	Volumen	m ³
$\dot{V}$	Volumenabtragsrate	m ³ /s
v	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
v_{eff}	effektive Vorschubgeschwindigkeit	m/s
w_o	Strahlradius in der Taille	m
w_f	Strahlradius	m
x	laterale Koordinate	m
y	laterale Koordinate	m
z	Anzahl der Überfahrten	-
z_R	Rayleigh-Länge	m
α	Absorptionskoeffizient	1/m
Φ	Einfallswinkel (gegen die Flächennormale gemessen)	°
α	Winkel der Einlaufschräge	°
$\Delta\nu$	Emissionsspektrum	1/s

λ	Wellenlänge	m
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
τ_{ep}	Elektronen-Phononen-Relaxationszeit	s
τ_H	Laserpulsdauer	s

Abkürzungen

AOM	Akkusto-optischer Modulator
CE	Lichtstreuung im Luftdurchbruch
CNC	Computernumerische Steuerung
ECM	Elektrochemisches Ätzen
EDM	Elektroerosionsabtragen
EDX	Energiedispersive Röntgenstrahlung
HSC	Hochgeschwindigkeitsfräsen
LSM	Laser-scanning Mikroskop
REM	Raster-Elektronenmikroskop

Extended Abstract

In recent years industry has shown a growing interest in micro-structuring of surfaces to improve the characteristics of macroscopic workpieces. Microcavities on the surface of parts moving against each other can e.g. improve their tribological behaviour. The first known industrial application of this technique is the so called laser-honing of cylinder walls in combustion engines. For this application, the cylinder wall is structured with micro cavities near the top dead center of the piston movement, decreasing the tendency of the oil-film to break down during the short standstill before the piston starts to move in the other direction. The outcome is a significant reduction of oil consumption and particle emission [1]. Nowadays Q-switch lasers are used, generally. However, the use of nanosecond laser pulses limits the quality of the structures due to the formation of recast during the ablation process. The reduction of the pulse duration into the femtosecond range is a promising technology to avoid the formation of recast and consequently increase quality and precision of the ablated structures [2].

Experimental results

During the ablation process material is ejected partially by evaporation and partially by melt ejection. Usually some of the molten material solidifies at the walls forming recast layers and burrs. Several publications promote the reduction of the volume ablated by melt expulsion by reducing the pulse duration [3, 4, 5, 6, 7]. Experimental results confirm these expectations, showing that it is possible to reduce burr height by using shorter laser pulses [8]. These observations confirm numerical calculations showing that completely recast free ablation of material should not be possible even with femtosecond pulses [9, 10]. But the calculations also show that at small energy density levels the thickness of the melt layer as well as the ejection velocity of the melt is reduced.

Experiments indicate that ablation without noticeable recast is possible with pulse durations of 10 ps and lower, if very low energy densities are used [11]. A groove machined with a comparably high energy density of 175 J/cm² shows a layer of recast material with a thickness of several micrometers and distinct burrs. Grooves produced with an energy density slightly above the ablation threshold show no signs of recast

material. The surface of the groove is covered by ripple structures frequently observed at near to threshold ablation with ultrashort pulses. At higher energy densities and longer pulses these structures are covered by a layer of recast material.

Due to the very low energy densities used for recast free structuring, process speed is very low. For an ablation depth of 10 to 25 μm a scanning feedrate of several mm/min is required, which is much too low for economical use. A common approach to increase ablation depth is the reduction of the scanning feedrate in order to increase the pulse overlap. This approach is only successful in a certain range of scanning speeds. For high scanning speeds the pulse overlap is too low to produce continuous grooves, the single pulses become appearing as a row of overlapping craters. At a very high pulse overlap, each pulse hits a substantial portion of the cavity which was already ablated by preceding pulses. This influences the coupling of energy at the ablation front, leading to irregularities in the ablation process. Additionally grooves with a high aspect ratio are usually filled with ablated material which could not be expulsed.

The width of the groove is influenced by the spot diameter on the workpiece surface. A simple approach to alter the spot diameter is to change the position of the focus with respect to the workpiece surface. Due to an effect commonly known as conical emission (CE), the laser beam is deformed in an air breakdown, resulting in a more divergent beam with irregular distribution of energy density and wavelength [12]. If the focus is positioned above the workpiece surface, these irregularities influence on the ablated structure to an extend increasing with distance. This effects can be avoided by positioning the focus below the surface.

Since for ablation without recast the energy density is limited, a remaining approach to increase the ablation rate is the use of a laser system with higher repetition rate. In the underlying experiments, laser sources with repetition rates up to 200 kHz were used. Over the examined range an approximately proportional relationship between the repetition rate and the ablation rate could be demonstrated. However, to reach the ablation rate and the feedrate of the industrial process using ns-lasers, a laser source with a repetition rate of several hundred kHz and a pulse energy of more than 20 μJ on the workpiece would be necessary.

Examples for possible applications

In combustion engines, where many parts are moving against each other, there is a large potential for improvement of the overall performance by reducing the friction between moving parts. Earlier experiments have shown that microstructures in the sur-

face of the moving parts can help to reduce friction. Laser micro structuring is a promising technology to produce such structures. As explained earlier, the ablation rate with existing laser sources is much too low to be economical for widespread industrial use. However, the existing systems have the ability to produce prototypes and samples for tribological tests in comparable short time. A number of cast iron rings were structured with different groove arrangements. Machining time for the rings was between 2 and 40 hours, depending on the arrangement of the grooves. Such rings are used for so called pin on ring experiments. In tribometrical examinations, a chromium ring is pressed against the structured surface of the rotating ring. The forces measured give an idea about the tribological coefficients of the surface. It could be shown, that laser-structuring of surfaces could improve the tribological behaviour in a large range.

Today printing and embossing tools are usually structured by mechanical or etching technologies. Lasers are already used to structure soft materials like laquer or rubber, but quality and economical issues prevented the use of lasers for metals like steel or copper. Femto- or picosecond lasers have the potential to fill this gap. As mentioned before, it is possible to produce structures without recast if an energy density of several J/cm² is selected. At this energy density level a number of pulses is necessary to produce the required dimple depth of 5 to 20 µm.

Summary

Reduction of the pulse duration is a way to reduce the formation of burrs and layers of molten material. Structures without noticeable amounts of recast could be produced with pulse durations between 120 fs and 10 ps if an energy density level slightly above the ablation threshold is selected. The very low ablation rate could be compensated to some extent by using laser systems with a high repetition rate.

1 Motivation und Zielsetzung

Der Laser hat sich in den vergangenen Jahren zu einem verlässlichen Werkzeug in der Fertigung entwickelt, viele Erzeugnisse sind ohne Lasermaterialbearbeitung nicht mehr denkbar. Gerade in der Fein- und Mikrotechnik hilft der Laser, vieles wirtschaftlich realisierbar zu machen, teilweise wird die Herstellung bestimmter Produkte durch die Lasertechnik überhaupt erst möglich. Aber nicht nur die Herstellung immer kleinerer Bauteile wird durch die Lasermaterialbearbeitung erleichtert. In jüngerer Zeit zeigt die Industrie ein zunehmendes Interesse an der Mikrostrukturierung von makroskopischen Werkstücken mit dem Ziel, die Bauteileigenschaften zu verbessern. Das Strukturieren mit Laserstrahlung ist hierfür ein vielversprechendes Fertigungsverfahren.

Ein zukunftsträchtiges Anwendungsfeld ist beispielsweise das Strukturieren von aufeinander gleitenden Oberflächen zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften [13, 14, 15]. Eine industrielle Anwendung ist z.B. das Laserhonen von Zylinderblöcken, das in Bild 1.1 dargestellt ist [16].

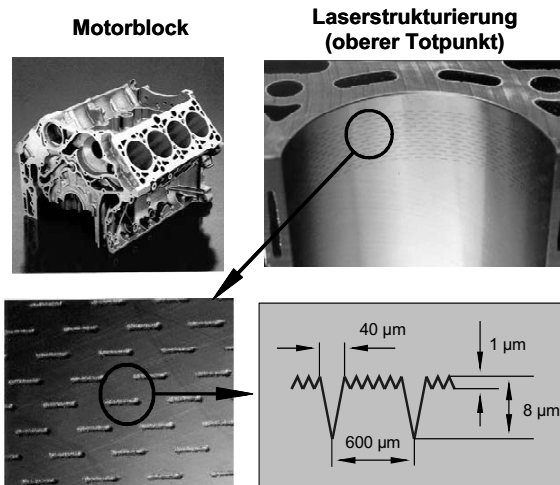


Bild 1.1: Laserhonen von Zylinderlaufbahnen, Quelle: Gehring.

Bei diesem Verfahren werden laserstrukturierte Taschen bzw. Nuten in die Zylinderwand von Verbrennungsmotoren eingebracht. Üblicherweise reißt der Ölfilm zwischen Kolben und Zylinderwand während der Richtungs- umkehr des Kolbens im oberen Totpunkt kurz ab. Die durch Laserhonen erzeugten Strukturen dienen als Ölreservoir und sorgen auch während dem kurzen Stillstand der Kolbenbewegung für eine

gleichmäßige Verteilung des Öls zwischen Kolben und Zylinderwand. Auf diese Weise können Reibung, Verschleiß und Ölverbrauch reduziert werden. Eine andere Serienanwendung der Laserstrukturierung ist das Texturieren von Festplatten in der Landezone des Lesekopfes [17]. Zur Vermeidung von Beschädigungen beim Transport werden die Leseköpfe von Festplatten beim Abschalten geparkt. Dazu wird der Lesekopf außerhalb der eigentlichen Speicherfläche auf der Plattenoberfläche aufgesetzt. Aufgrund der hohen Oberflächengüte kann es beim Wiederaufahren zu Adhäsion kommen, was bei den extrem hohen Geschwindigkeiten zu Problemen führen kann. Durch Laserstrukturieren werden kleine erhöhte Strukturen, sogenannte Sombbrero-Bumps, in die Oberfläche der Landezone eingebracht. Die tatsächliche Auflagefläche des Lesekopfes wird dadurch wesentlich verkleinert, was Reibung und Adhäsion deutlich mindert.

Für Laserverfahren, bei denen Material durch Verdampfen abgetragen werden soll, ist eine sehr hohe Spitzenleistung notwendig, weshalb hierfür hauptsächlich gepulst betriebene Lasersysteme eingesetzt werden. Abhängig von Material, Volumenabtragsrate und gewünschter Strukturpräzision kommen Lasersysteme mit unterschiedlichen Pulsdauern zum Einsatz, wobei die Präzision mit der Verkürzung der Pulsdauern tendenziell steigt. Aufgrund der notwendigen Stabilität und Zuverlässigkeit der Strahlquellen werden heute im industriellen Einsatz überwiegend Laser mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich eingesetzt. Beim Abtragen von Metallen mit Nanosekundenpulsen entsteht jedoch Schmelze, die sich teilweise in Schmelzschichten und Graten ablagert und die Strukturpräzision negativ beeinflusst. Verschiedene Veröffentlichungen zeigen, dass durch Verkürzen der Pulsdauer in den Femtosekundenbereich die Bildung von Schmelze vermieden werden kann [3, 18, 19]. Strahlquellen mit Pulsdauern im Femto- und Pikosekundenbereich sind zur Zeit noch relativ komplexe Systeme, was den Einsatz der Ultrakurzpulstechnologie auf den Labormaßstab beschränkt. Die Verfügbarkeit von industrietauglichen Laserstrahlquellen mit Pulsdauern im Femto- und Pikosekundenbereich ist in den kommenden Jahren zu erwarten.

Während in früheren Arbeiten gezeigt wurde, dass ein schmelzfreier Abtrag von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen grundsätzlich möglich ist, steht bei der vorliegenden Arbeit die industriennahe Umsetzung dieser Technologie im Vordergrund. Anhand zahlreicher Experimente sollen der Einfluss grundlegender Bearbeitungsparameter dargestellt und Zielparameter für geeignete, industrietaugliche Lasersysteme herausgearbeitet werden. Während bei früheren Untersuchungen zum Abtragen mit Femtosekundenpulsen häufig mit abbildenden Verfahren gearbeitet wurde, wird der Strahl im Rahmen der vorliegenden Arbeit direkt auf das Werkstück fokussiert. Diese Methode

wird bei den meisten industriellen Anwendungen eingesetzt und zeichnet sich gegenüber abbildenden Verfahren durch eine größere Flexibilität aus. Die Erzeugung ultrakurzer Laserpulse wird zu kürzeren Pulsen hin immer aufwändiger. Deshalb ist es im Hinblick auf industrietaugliche Lasersysteme von Bedeutung, bei welchen Pulsdauern eine ablagerungsfreie Bearbeitung möglich ist. Für eine wirtschaftliche Anwendung ist oft die Zeit entscheidend, weshalb in der vorliegenden Arbeit auch untersucht werden soll, wie die Bearbeitungsgeschwindigkeit gesteigert werden kann.

2 Stand der Technik und des Wissens

Das Laserabtragen aber auch das Laserbohren waren bereits Schwerpunkt von umfangreichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen. Dieses Kapitel ist als Zusammenfassung bekannter Erkenntnisse zu verstehen. In der vorliegenden Arbeit wird das Oberflächenstrukturieren durch Materialabtrag dargestellt. Abtrag bezeichnet hierbei das Entfernen dreidimensionaler Strukturen ausgehend von der Werkstückoberfläche. Als Abgrenzung zum Bohren werden beim Abtragen Vorgänge mit kleinem Aspektverhältnis betrachtet, das heißt die Tiefe der Strukturen ist geringer als die Breite bzw. der Durchmesser. Darüber hinaus werden beim Abtragen ausschließlich Strukturen betrachtet, die nicht in einem Durchbruch enden.

2.1 Abtragsverfahren

Schon lange vor Einführung der Lasermaterialbearbeitung war das Abtragen dreidimensionaler Strukturen eine grundlegende Fertigungstechnologie. Abhängig von den Abmessungen der abzutragenden Strukturen, der erforderlichen Präzision und der Abtragsrate stehen heute unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Im Folgenden sollen die wichtigsten Abtragsverfahren vorgestellt und miteinander verglichen werden.

2.1.1 Mechanische Verfahren

Mechanische Verfahren stellen die klassische Methode zur Formgebung von Werkstückoberflächen dar. Es wird zwischen spanlosen und spanabhebenden Verfahren unterschieden. Für die in dieser Arbeit betrachteten Strukturgrößen und Geometrien sind einerseits das Prägen, andererseits das Fräsen von Bedeutung.

Spanlose Bearbeitung

Das mechanische Prägen gehört zu den Kaltumformverfahren und ist hauptsächlich von der Herstellung von Münzen und Medaillen bekannt. Das Prägen kann genau genommen nicht den Abtragsverfahren zugeordnet werden, da kein Material entfernt

wird. Je nach Zielsetzung unterscheidet man zwischen Glatt- und Maßprägen. Während beim Glattprägen eine hohe Oberflächengüte angestrebt wird, steht beim Maßprägen eine enge Dickentoleranz im Vordergrund. Grundlage des Verfahrens ist ein Prägestempel, der das Negativ der abzutragenden Struktur trägt und mit hohem Druck auf die Werkstückoberfläche gepresst wird. Dieser Vorgang kann entweder schlagartig durch ein Hammerwerk oder durch eine andauernde Kraft über eine Presse erfolgen. Die Oberfläche des Prägestempels bildet sich dabei als Relief in der Werkstückoberfläche ab, weshalb der Prägestempel härter sein muss als das zu bearbeitende Material. Mit diesem Verfahren lassen sich die meisten Metalle bearbeiten, allerdings sind nur geringe Strukturtiefen erzielbar. Aufgrund der relativ hohen Kräfte eignet sich das Prägen nur für Bauteile mit hoher Steifigkeit. Ein weiterer Nachteil ist die begrenzte Lebensdauer der Werkzeuge, vorteilhaft sind hingegen die relativ geringen Anlagenkosten [20].

Spanabhebende Bearbeitung

Das am häufigsten angewandte Verfahren zum dreidimensionalen Volumenabtrag ist das mechanische Fräsen. Ein rotierender Fräser fährt dabei die abzutragende Kontur in einzelnen Bahnen ab. Das Fräsen ist ein Verfahren mit definierter Schneide, d.h. die Fräsergeometrie wird im Rahmen der Verfahrenstoleranzen in der Strukturgeometrie abgebildet. Durch eine geeignete Fräserauswahl sind annähernd beliebige dreidimensionale Geometrien möglich, die Ausbildung von scharfen Ecken ist jedoch durch Kinematik und Form des Fräasers eingeschränkt. Der kleinste erreichbare Innenradius liegt in der Größenordnung von etwa 0,5 mm, wirtschaftlich sinnvoll sind Radien ab etwa 5 mm [21]. Das in jüngerer Zeit entwickelte Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC) nutzt die Vorteile des Schleifens (hohe Schnittgeschwindigkeiten, geringe Spanvolumen und große Scherwinkel), um höhere Spanraten und eine höhere Oberflächengüte zu erreichen. Dies wird durch sehr hohe Spindeldrehzahlen von 60.000 bis 80.000 1/min, etwa fünfmal mehr als bei herkömmlichem Fräsen, erreicht. Um die hohe Schnittgeschwindigkeit während des Fräsens jederzeit zu gewährleisten, muss nach Möglichkeit immer am äußeren Umfang des Fräasers gearbeitet werden. Das wird üblicherweise durch eine Werkzeuanstellung realisiert, weshalb beim HSC-Fräsen teilweise bis zu sieben Achsen eingesetzt werden müssen. Um den Verschleiß der Schneidkanten möglichst gering zu halten, kommen als Werkstoff harte Materialien wie Hartmetall oder Diamant zum Einsatz. Heute sind bei der mechanischen Zerspaltung kleinste laterale Abmessungen von 10 – 1000 µm bei Aspektverhältnissen von 2-50 erreichbar. Die Oberflächengüte R_a liegt für Hartmetallfräser in der Größenordnung von 300 nm, mit Diamantfräsern sind 10 nm erreichbar [22]. Das mechanische Fräsen

ist heute gut entwickelt und in der industriellen Fertigung weit verbreitet. Der Vorteil liegt in der hohen Abtragsgeschwindigkeit, insbesondere für große Volumina und der nahezu beliebigen Materialauswahl. Nachteilig sind die relativ hohen Kräfte, die ein festes Einspannen des Werkstücks erforderlich machen.

2.1.2 Elektroerosive Verfahren (EDM)

Das Verfahren der Elektroerosion, auch als Funkenerosion oder Electrical Discharge Machining (EDM) bezeichnet, nutzt die Energie elektrischer Entladungen zum Materialabtrag. Hierzu wird zwischen Werkstück und Elektrode eine pulsierende Gleichspannung angelegt, wobei das Werkstück die Kathode und die Elektrode die Anode bilden. Im Bearbeitungsspalt kommt es zu Entladungen, wobei jedes Mal sehr geringe Mengen des Materials verdampft werden. Die Bearbeitung findet in einer dielektrischen Flüssigkeit, üblicherweise leichtes Öl oder deionisiertes Wasser statt. Die Flüssigkeit hat die Aufgabe, Werkstück und Elektrode zu kühlen und das abgetragene Material abzutransportieren. Während der Bearbeitung findet sowohl am Werkstück als auch an der Elektrode ein Materialabtrag statt. Um den Elektrodenverschleiß möglichst gering zu halten, werden als Elektrodenwerkstoff edlere Metalle verwendet als für das Werkstück, üblich sind Wolfram oder Kupfer. Für den Abtrag von Kavitäten mit größerem Volumen werden häufig mehrere Elektroden nacheinander eingesetzt, um die gewünschte Präzision trotz Elektrodenverschleiß zu erreichen. Die kleinsten mittels EDM herstellbaren Strukturen liegen im Bereich von 15 μm bei einer Genauigkeit von etwa 2 μm . Die erreichbare Oberflächenrauigkeit liegt in der Größenordnung von $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ [21, 23]. Nachteilig ist, dass Erosionsverfahren nur bei elektrisch leitenden Werkstoffen angewandt werden können. Die Abtragsraten sind im Vergleich zum Fräsen relativ gering. Hinzu kommt der relativ große Aufwand für die Herstellung der Elektroden. Die Vorteile des Erodierens sind die weitgehend kraftfreie Energieeinbringung und eine im Vergleich zum Fräsen erhöhte Geometriefreiheit.

2.1.3 Ätzverfahren

Für sehr kleine und präzise Strukturen ist das Ätzen eine weit verbreitete Technologie. Bei Anwendungen in der Mikrosystemtechnik sind dabei Auflösungen im Nanometerbereich erreichbar. Aufgrund der breiten Anwendung in der Mikroelektronik ist das Ätzen von Halbleitermaterialien, hauptsächlich Silizium, sehr weit entwickelt. Allen Ätzverfahren gemeinsam ist das Aufbringen einer Maske auf die Werkstückoberflä-

che, um die gewünschte Struktur zu definieren. Hierzu stehen verschiedene Belichtungs- und Beschichtungsverfahren zur Verfügung. Je nach Vorgehen unterscheidet man zwischen Positiv- oder Negativverfahren. Die Maske hat die Aufgabe, die Materialpartien, die nicht weggeätzt werden sollen, zu schützen und besteht aus einem Material, das vom Ätzmedium nicht angelöst wird. Anschließend wird das Werkstück mit einem Ätzmedium in Verbindung gebracht. Beim klassischen, isotropen (nasschemischen) Ätzen löst das Ätzmedium Material in alle Richtungen gleichzeitig an, weshalb Unterschneidungen unter den Kanten der Maske entstehen. Bei anisotropen Ätzprozessen (Trockenätzen, Plasmaätzen) sind hingegen senkrechte Strukturkanten möglich. Da das Ätzmedium alle nicht durch die Maske geschützten Materialbereiche gleichmäßig abträgt, ist die Wahl der abzutragenden Geometrie stark eingeschränkt. Dreidimensionale Strukturen lassen sich nur schichtweise durch Aufbringen neuer Masken erzeugen. Die laterale Auflösung beim Ätzen ist vor allem von der Auflösung des Belichtungsverfahrens abhängig. Im Bereich der Halbleiterherstellung wird üblicherweise kurzwellige Laserstrahlung angewendet. Mit der Röntgenlithografie ist die derzeit höchste Auflösung erreichbar. Bei diesem Verfahren wird Synchrotronstrahlung zur Belichtung verwendet, die eine noch kürzere Wellenlänge als heute verfügbare Lasersysteme aufweist [24]. Neben den erwähnten geometrischen Einschränkungen sind vor allem der Aufwand zur Maskenherstellung und die geringe Ätzrate nachteilig. Außerdem werden beim Ätzen giftige Chemikalien verwendet, die entsprechenden Aufwand bei Handhabung und Entsorgung notwendig machen. Aus diesen Gründen wird das Ätzen hauptsächlich dort eingesetzt, wo die, im Vergleich zu den anderen hier vorgestellten Verfahren, wesentlich höhere Auflösung zum Tragen kommt.

2.1.4 Elektrochemisches Abtragen (ECM)

Das elektrochemische Abtragen, auch als elektrochemisches Fräsen bekannt, beruht auf dem Prinzip der Elektrolyse. Wird zwischen zwei Elektroden, die sich in einer Elektrolytlösung befinden, eine elektrische Gleichspannung angelegt, kommt es zu einer Redox-Reaktion. An der mit dem Minuspol verbundenen Elektrode (Kathode) findet die Reduktion, an der mit dem Pluspol verbundenen Elektrode (Anode) die Oxidation statt. Gleichzeitig entsteht ein Elektronenfluss von der Kathode zur Anode und damit kommt es zu einem Stromfluss zwischen den Elektroden. Bei geeigneter Materialauswahl der Elektroden sowie der Elektrolytflüssigkeit wird an der Anode Material abgetragen, an der Kathode Material abgeschieden [25, 26]. In der Galvanik wird die Elektrolyse eingesetzt um auf Bauteilen Beschichtungen, beispielsweise Chrom oder Kupfer, aufzubauen. Das Elektrochemische Abtragen nutzt hingegen die abtragende

Wirkung der Reaktion. Das abzutragende Werkstück wird als Anode, geschaltet, während die Kathode entsprechend der abzutragenden Struktur geformt ist. Bei Anlegen einer konstanten Gleichspannung wird die Anode ähnlich dem Ätzen von allen Seiten gleichmäßig abgetragen, unabhängig von der Geometrie der Kathode. Durch Einsatz von Masken können selektive Strukturen, wie z.B. Düsenlöcher von Tintenstrahldruckern, abgetragen werden. Bei optimaler Prozessführung sind auf diese Weise kleinste Strukturen von 10 μm möglich [27]. Eine weitere Möglichkeit, die Präzision zu steigern ist der Einsatz gepulster Gleichspannung. Dieses Prinzip macht sich die Abhängigkeit der Abtragsrate vom Potentialabfall im Elektrolyt zu Nutze. Die Kombination aus Anode, Kathode und Elektrolyt kann als Plattenkondensator aufgefasst werden, der sich nach Anlegen der Spannung zunächst auflädt. Erst nach der Aufladung ist die für die Elektrolyse notwendige Polarisierung erreicht und der Abtragsprozess kommt in Gang, weshalb der Abtrag zunächst dort beginnt, wo der Abstand zwischen Kathode und Anode am geringsten ist. Schaltet man die Spannung nach kurzer Zeit wieder ab, werden nur diese Bereiche wirkungsvoll abgetragen. So findet beispielsweise für Spannungspulse von 30 ns Länge ein Abtrag nur dort statt, wo der Elektrodenabstand weniger als etwa 1 μm beträgt. Experimentell wurden Strukturen mit Auflösungen von etwa 1 μm bei Pulslängen von etwa 2 ns dargestellt. Zu diesem Zweck wurden Kathoden angefertigt, mit denen vergleichbar einem Fingerfräser die abzutragende Kontur abgefahren wurde [27].

Das elektrochemische Ätzen lässt sich auf viele elektrisch leitfähigen Materialien anwenden. Neben reinen Metallen lassen sich auch dotierte Halbleitermetalle und verschiedene Metalllegierungen abtragen. Der Auswahl des Elektrolyts kommt dabei grundsätzlich eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere bei Edelstahllegierungen behindert eine dichte Oxidschicht die elektrochemische Auflösung. Durch Beimischung von Salz- und Flusssäure zum Elektrolyt wird die Passivierung der Edelstahloberfläche so weit geschwächt, dass eine elektrochemische Bearbeitung möglich wird. Da es sich beim elektrochemischen Abtragen um ein kraftfreies Verfahren handelt, bei dem außerdem keine Wärme erzeugt wird, kommt es zu keiner Schädigung des umliegenden Materials.

2.1.5 Elektronen- und Ionenstrahlabtragen

Ähnlich dem Laserstrahlabtragen ist das Abtragen mit Elektronen- bzw. Ionenstrahlung ein thermischer Prozess, bei dem Material durch Verdampfung und Schmelzaustrieb abgetragen wird. Die Elektronen- bzw. Ionenstrahlen werden über Magnetlinsen

gebündelt und erreichen Leistungsdichten von 10^8 bis 10^9 W/cm². Zum Bohren und Abtragen werden überwiegend gepulste Strahlen verwendet. Die Pulsdauern liegen in der Größenordnung weniger Millisekunden. Im Gegensatz zum Laser ist die Pulsspitzenleistung eines gepulsten Elektronen- bzw. Ionenstrahls nicht höher als die Dauerleistung eines kontinuierlichen Strahls. Im Bereich der Elektronenstrahlerzeugung ist ein Hochvakuum in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-7}$ bar notwendig. Der gebündelte Strahl kann nach der Magnetlinse auch bei höherem Druck geführt werden. Hierzu wird der Druck zwischen Elektronenstrahlkanone und Arbeitskammer über mehrere Druckstufen erhöht. Mittlerweile gibt es Elektronenstrahlanlagen, die bei Atmosphärendruck in der Arbeitskammer betrieben werden können. Die kleinsten erreichbaren Strukturgrößen liegen in der Größenordnung von etwa 30 µm bei Aspektverhältnissen von bis zu 1:17 [28].

2.1.6 Laserabtragen

Das Laserabtragen beruht auf dem Prinzip, Material an der Werkstückoberfläche durch Laserstrahlung lokal zu erwärmen. Beim üblicherweise eingesetzten Schmelz- bzw. Sublimationsabtragen wird Material aufgeschmolzen, verdampft und durch den Dampfdruck aus der Wechselwirkungszone getrieben. Teilweise wird zusätzlich ein koaxial zum Laserstrahl geführter Gasstrahl zur Unterstützung des Materialaustriebs angewendet. Aufgrund der relativ hohen notwendigen Leistungsdichte kommen ausschließlich gepulste Lasersysteme zur Anwendung. Beim Abtragen von Metallen wird die Strukturpräzision durch Ablagerungen in Form von Schmelzschichten und Graten beeinträchtigt. Bei einigen Keramiken ist aufgrund der nicht vorhandenen Schmelzphase ein echter Sublimationsabtrag möglich. In industriell eingesetzten Anlagen zum Laserabtragen werden heute üblicherweise gepulste Nd:YAG-Laser mit Pulsdauern von wenigen 100 ns und Leistungen von wenigen bis zu einigen 100 W eingesetzt [29]. Um die Herstellung von genau definierten Strukturkanten zu ermöglichen, wird der Einfallswinkel des Laserstrahls relativ zur Werkstückoberfläche gezielt verändert. Mit solchen Anlagen sind Genauigkeiten von 0,01 mm und Oberflächenrauigkeiten von 1,0 µm erreichbar.

Ein völlig anderer Ansatz liegt dem reaktiven Abtragen, auch als Laserspanen bezeichnet, zugrunde, mit dem vor allem Eisenwerkstoffe abgetragen werden können. Hier wird das Material nur bis knapp unterhalb der Schmelztemperatur erwärmt. Oberhalb der Zündtemperatur reagiert das Material mit Sauerstoff, der entweder aus der Umgebungsluft stammt oder aber extra zugeführt wird, zu Eisenoxid. Durch die unter-

schiedliche Volumenausdehnung entstehen Spannungen an der Trennfläche zwischen Metall und Oxid, was innerhalb eines geeigneten Parameterfensters dazu führt, dass sich das Oxid von der Struktur löst und z.B. mit Pressluft entfernt werden kann. Laserspanen bietet den Vorteil, dass die Bildung einer metallischen Schmelzphase vermieden wird [30, 31, 32], wodurch sich z.B. scharfkantige Strukturen erzeugen lassen. Nachteilig sind jedoch die relativ langsame Prozessgeschwindigkeit und die eingeschränkte Materialauswahl, weshalb dieses Verfahren im industriellen Einsatz bisher keine große Bedeutung erlangen konnte.

2.1.7 Kombination von Verfahren

Mit den dargestellten Verfahren lassen sich heute sehr gute Ergebnisse erzielen, weshalb alle Verfahren in der industriellen Fertigung eingesetzt werden. Mit dem Erodieren und Laserabtragen sind weitgehend beliebige Geometrien realisierbar, in Bezug auf die Abtragsrate ist das HSC-Fräsen im Vorteil.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der dargestellten Verfahren bietet sich insbesondere für das Abtragen großer Volumina eine Kombination verschiedener Verfahren an. Bekannt ist z.B. das Abtragen großer Materialvolumen mittels Fräsen und anschließender Feinbearbeitung (z.B. Einarbeiten von Schlitzten, Einsätzen bzw. geometrischer Details) durch EDM [21] bzw. Laserabtragen. In [33, 34] wird eine kommerziell erhältliche Anlage vorgestellt, bei der zunächst ein Volumenabtrag durch mechanische Frästechnik erfolgt. Anschließend wird das Werkstück in der selben Aufspannung durch Laserabtragen auf Endmaß bearbeitet. Die Zeitersparnis gegenüber reinem EDM-Verfahren liegt in der Größenordnung von 70 %.

2.1.8 Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen

In industriellen Anwendungen zum Laserabtragen werden bisher Lasersysteme mit Pulsdauern von einigen Nanosekunden und länger eingesetzt, entsprechende Lasersysteme sind heute in ausreichender Zuverlässigkeit verfügbar. Da es sich um thermische Prozesse handelt, entsteht beim Laserabtragen von Metallen Schmelze, die sich in Graten und Schmelzschichten ablagert. Im Laborbereich sind seit geraumer Zeit Lasersysteme mit kürzeren Pulsdauern bis in eine Größenordnung von einigen Femtosekunden verfügbar. Zur Unterscheidung der Pulsdauer-Regime werden Pulsdauern in der Größenordnung von einigen Nanosekunden häufig als kurze und Pulsdauern im Piko- und

Femtosekundenbereich als ultrakurze Laserpulse bezeichnet. Diese Bezeichnungsweise wird auch in der vorliegenden Arbeit angewandt.

Die physikalischen Zusammenhänge bei der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen wurden in der Literatur bereits ausführlich dargelegt. Im wesentlichen wurde dargestellt, dass sich die Vorgänge der Energieeinbringung bei Femtosekundenpulsen von denen bei längeren Pulsen unterscheiden. Die eingestrahlte Energie wird von den Elektronen aufgenommen und erst nach einer gewissen Relaxationszeit über Stöße an das Atomgitter abgegeben. Nach kurzer Zeit stellt sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen den Elektronen und dem Atomgitter ein. Sind die Laserpulse kürzer als die Relaxationszeit, so kann die absorbierte Energie fast vollständig deponiert werden, bevor die Energie durch Wärmeleitung in den Festkörper abfließen kann [18, 35, 36]. Verschiedene experimentelle Untersuchungen an Metallen haben die theoretischen Modelle bestätigt und gezeigt, dass ein weitgehend schmelzfreier Abtrag von Metallen mit Femtosekundenpulsen möglich ist [3, 4, 5, 6, 7]. In anderen Untersuchungen wurden temperaturempfindliche Materialien, wie z.B. transparente Dielektrika, Polymere oder Formgedächtnislegierungen mit Femtosekundenpulsen bearbeitet. Diese Materialien neigen bei der Bearbeitung mit längeren Laserpulsen zur Bildung von thermischen Spannungen, die im Extremfall Auslöser von Rissen und Sprüngen sein können. Mit Femtosekundenpulsen kann der Wärmeeintrag vermindert werden, wodurch die Laserbearbeitung solcher Materialien teilweise erst möglich wird. Ein weiteres Anwendungsfeld liegt in der Medizintechnik, wo z.B. Zahnschmelz oder Weichgewebe mit minimaler Schädigung umliegender Bereiche abgetragen werden können [19, 37, 38, 39].

Viele der dargestellten Beispiele können bisher nur im Labor dargestellt werden. Femtosekundenlaser sind heute noch relativ komplex und damit teuer. Stabilität und Zuverlässigkeit verfügbarer Systeme schließen daher den Einsatz von Femtosekundenlasern im industriellen Rahmen weitgehend aus. Aufgrund der Vorteile ultrakurzer Laserpulse beschäftigen sich zur Zeit verschiedene Laserhersteller mit der Entwicklung industrietauglicher Ultrakurzpuls laser. Es ist abzusehen, dass entsprechende Systeme in naher Zukunft zur Verfügung stehen werden.

2.2 Physikalische Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen die grundlegenden Wechselwirkungsmechanismen zwischen Laserstrahl und Werkstück betrachtet werden. Zunächst werden theoretische

Grundlagen über die Absorption von Laserstrahlung, den Wärmetransport im Werkstück sowie die Entstehung und Wirkung von laserinduziertem Plasma erläutert. Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse grundlegender Studien zum Laserabtragen vorgestellt und diskutiert.

2.2.1 Absorption elektromagnetischer Strahlung

Voraussetzung für die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Werkstück ist eine Übertragung der Energie vom Laserstrahl auf das Material. Die Energie des einfallenden Laserstrahls wird teilweise an der Materialoberfläche reflektiert. Ein Teil transmittiert durch das Werkstück, der verbliebene Anteil wird vom Werkstück absorbiert. Die einzelnen Anteile werden durch den Reflexionsgrad R , den Transmissionsgrad T bzw. den Absorptionsgrad A bestimmt. Für metallische Werkstoffe kann die Transmission vernachlässigt werden, solange es sich nicht um sehr dünne Folien handelt. Deshalb kann hier

$$A + R = 1 \quad (2.1)$$

gesetzt werden. Bei senkrechtem Einfall der Laserstrahlung kann der Reflexionsgrad R über

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.2)$$

aus den optischen Materialeigenschaften, dem Brechungsindex n und dem Absorptionsindex k , berechnet werden [40]. Nach dem Eindringen in das Werkstück nimmt die Energiedichte der Strahlung ab während die Energie an die Elektronen des Werkstücks abgegeben wird. Der Verlauf der Energiedichte entlang der Eindringtiefe z lässt sich berechnen als Dämpfung einer elektromagnetischen Welle und wird durch das Lambert-Beersche Gesetz in der Form

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (2.3)$$

beschrieben [41]. Die Stoffgröße α wird als Absorptionskoeffizient bezeichnet und lässt sich mit

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda} \quad (2.4)$$

aus der Wellenlänge der Strahlung λ und dem Absorptionsindex k bestimmen. Der Absorptionsindex k ist Bestandteil des komplexen Brechungsindex n_k zu:

$$n_k = n + ik. \quad (2.5)$$

Das Absorptionsverhalten eines Werkstücks kann auch über die Absorptionslänge (optische Eindringtiefe) l_α dargestellt werden. Die Absorptionslänge definiert sich als die Tiefe, in der die Intensität auf den Wert $1/e$ abgefallen ist und beträgt

$$l_\alpha = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot k}. \quad (2.6)$$

Die optische Wechselwirkung von Laserstrahlung führt im Material zu einer thermischen Erwärmung des Werkstücks. Diese lässt sich durch die Diffusionslänge (thermische Eindringtiefe) l_{th} beschreiben. Die Diffusionslänge ist der Weg, den eine Isotherme im Werkstück zurücklegt und wird über

$$l_{th} = 2 \cdot \sqrt{k \cdot t} \quad (2.7)$$

aus der Wechselwirkungszeit t und der Temperaturleitfähigkeit k bestimmt. Für metallische Werkstoffe und Pulsdauern bis hinab zu Nanosekunden ist die Diffusionslänge l_{th} meist größer als die Absorptionslänge l_α . Für eine Laserpulsdauer von 10 ps liegt jedoch die Diffusionslänge im Bereich von 0,1 bis 1 nm, während die optische Eindringtiefe der meisten Metalle im sichtbaren Spektralbereich in der Größenordnung von 10 nm liegt [42].

Die Wärmeleitungsvorgänge im Material können näherungsweise entweder als eindimensionales oder dreidimensionales Problem betrachtet werden. Die Diffusionslänge hilft hierbei abzuschätzen, wie das Problem zu behandeln ist. Wird in Gleichung (2.7) die Laserpulsdauer τ_H eingeführt, lassen sich zwei Fälle unterscheiden:

Ist während der gesamten Pulsdauer der Radius der bestrahlten Fläche $w_f \gg l_{th}$, so kann von einem eindimensionalen Problem ausgegangen werden. Der Wärmefluss findet hauptsächlich senkrecht zur Werkstückoberfläche statt.

Ist dagegen $w_f \ll l_{th}$, so kann von einer punktförmigen Wärmequelle ausgegangen werden, die Wärme breitet sich kugelförmig in das Werkstück aus.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde mit Brennfleckdurchmessern im Bereich einiger 10 μm gearbeitet, was bedeutet, dass für Pulsdauern von weniger als 10 ps von eindimensionaler Wärmeleitung ausgegangen werden kann.

Die bisherigen Betrachtungen gelten für den senkrechten Einfall der Laserstrahlung auf die Werkstückoberfläche. Die tatsächlichen Reflexions- bzw. Absorptionsgrade sind jedoch vom Einfallswinkel und der Polarisierung des einfallenden Laserstrahls abhängig. Bei schrägem Einfall wird im Allgemeinen die parallel zur Einfallsebene polarisierte Komponente stärker absorbiert. Während der Absorptionsgrad der senkrechten Komponente kontinuierlich abfällt, steigt er bei der parallelen Komponente bei zunehmendem Anstellwinkel an und erreicht beim sogenannten Brewsterwinkel ein Maximum. Danach fällt der Absorptionsgrad wieder ab, bis er bei einem Einfallswinkel von 90° null wird. Der Brewsterwinkel ist materialabhängig und liegt für Eisen bei etwa 80° [40].

2.2.2 Wärmetransport in Materie

Trifft Laserstrahlung auf ein metallisches Werkstück, so wird die Energie überwiegend von leicht beweglichen Elektronen absorbiert und zunächst in Form von kinetischer Energie gespeichert. Der vorherrschende Absorptionsprozess ist die inverse Bremsstrahlung. Dabei kollidieren die im elektrischen Feld oszillierenden Elektronen mit den Ionen, wodurch aus der gerichteten Schwingung eine ungerichtete Bewegung, also Wärme wird. Dieser Vorgang ist nach etwa 100 fs abgeschlossen [10]. Die Atomrümpfe und die schweren Ionen erwärmen sich nicht direkt über die Laserstrahlung, da sie für eine Schwingungsanregung zu schwer sind. Stattdessen wird das Festkörperlattice durch Stöße mit den schwingenden Elektronen erst allmählich erwärmt. Dies ist für Metalle wie Eisen nach etwa 0,5 ps der Fall, für Al oder Cu liegt die Zeit nur eine bis zwei Größenordnungen höher. Erst nach dieser Zeit sind Elektronen und Kristallgitter im thermodynamischen Gleichgewicht und die Annahme einer makroskopischen Temperatur sinnvoll. Für Pulsdauern zwischen 100 fs und 1 ps müssen die entsprechenden Vorgänge berücksichtigt werden [42].

Für Laserpulse unterhalb der oben genannten Relaxationszeiten kann die Temperatur des Materials nicht durch eine einfache Gleichung beschrieben werden, es muss der Thermalisierungsvorgang zwischen Elektronen und Atomrümpfen berücksichtigt werden. In einfacher Näherung kann dazu das Zwei-Temperatur-Modell herangezogen

werden, welches für die Temperatur der Elektronen T_e bzw. des Kristallgitters T_i eigene Wärmeleitungsgleichungen vorsieht:

$$\begin{aligned} C_e(T_e) \frac{dT_e(x,t)}{dt} &= -\nabla \cdot \vec{j}_{th,e}(x,t) - G(T_e - T_i) + \dot{q}(x,t) \\ C_i(T_i) \frac{dT_i(x,t)}{dt} &= -\nabla \cdot \vec{j}_{th,i}(x,t) + G(T_e - T_i) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dabei sind C_e bzw. C_i die Wärmekapazität des Elektronen- bzw. Ionengitters, $\dot{q}$ die Volumenleistungsdichte der eingestrahnten Energie. Mit G wird ein Kopplungsterm eingeführt, der die Temperaturen von Elektronen- und Ionengitter proportional zur Temperaturdifferenz verbindet. Für das Ionengitter kann der Wärmestrom $\vec{j}_{th,i}$ in erster Näherung vernachlässigt werden. Für den Wärmestrom $\vec{j}_{th,e}$ der Elektronen wird in der Literatur häufig der Term

$$\vec{j}_{th,e}(x,t) = -\lambda_{th,e} \nabla T_e(x,t) \quad (2.9)$$

gewählt. Die daraus resultierenden Gleichungen werden als parabolisches Zwei-Temperatur-Modell bezeichnet. Die Gleichungen (2.8) lassen sich nur für stark vereinfachte Grenzfälle analytisch lösen. Eine numerische Lösung des Problems ist hingegen

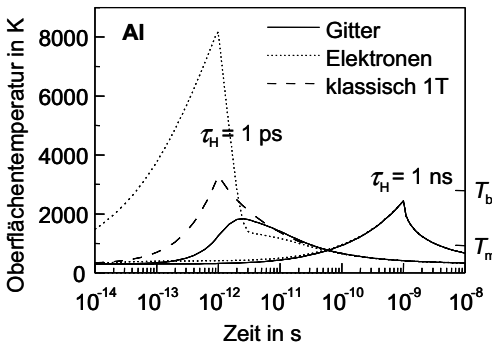


Bild 2.1: Zeitliche Entwicklung der Oberflächentemperatur von Aluminium bei Absorption eines Laserpulses von 1 ps ($H = 10 \text{ mJ/cm}^2$) bzw. 1 ns ($H = 100 \text{ mJ/cm}^2$) Dauer [10].

möglich und am Beispiel von Aluminium in Bild 2.1 dargestellt. Die Kurven zeigen die berechnete Entwicklung Oberflächentemperatur von Elektronen und Kristallgitter für zwei unterschiedliche Pulsdauern. Für eine Pulsdauer von 1 ns ist der Temperaturunterschied vernachlässigbar. Bei einer Pulsdauer von 1 ps zeigen die Elektronen hingegen zunächst eine deutliche Temperaturüberhöhung. Erst nach einer Zeitdauer, die in der Größenordnung der Pulsdauer liegt, beginnt die Übertragung der Energie an das Kristallgitter. Die Rechnung

zeigt, dass die Betrachtung nach dem klassischen Ein-Temperatur-Modell erst bei

Pulsdauern von mehr als 100 ps mit dem Zwei-Temperatur-Modell vergleichbare Werte liefert.

Zunächst ist die Wärme in einem räumlich eng begrenzten Bereich deponiert und verteilt sich anschließend hauptsächlich durch Wärmeleitung, wobei Diffusion und Strahlung zu berücksichtigen sind [43]. Die Wärmestrahlung gewinnt bei sehr hohen Temperaturen an Bedeutung.

2.2.3 Plasma und Materialdampf

Bei der Bearbeitung von Festkörpern mit intensiver Laserstrahlung muss die Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem abströmenden Plasma berücksichtigt werden. Plasma entsteht aus Ionen des bereits verdampften Materials, welches sich mit Expansionsgeschwindigkeiten von $10^4 - 10^5$ m/s ausbreitet [44]. Dies bedeutet bei einer Pulsddauer von 10 ns eine Ausdehnung von 0,1 bis 1 mm im Verlauf des Pulses. Ist der Ionisierungsgrad des Plasmas groß genug, wird die einfallende Laserstrahlung im Plasma absorbiert und abgeschirmt. Numerische Abschätzungen für eine Pulsdauer von 17 ns haben ergeben, dass nur etwa 30% der eingestrahnten Energie auf dem Werkstück ankommen [9]. Somit wird ein effizienter und definierter Energieeintrag behindert. Für eine Pulsdauer von 100 fs liegt der Ausbreitungsweg nur im Bereich von 1 – 10 nm. Da dies die Größenordnung der optischen Eindringtiefe der meisten Metalle ist, kann die Plasmaexpansion während des Laserpulses vernachlässigt werden.

Nicht vernachlässigt werden kann hingegen die Abströmung des abgetragenen Materials in der Zeit zwischen zwei Laserpulsen. Numerische und experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Materialdampfwolke aus ablatiertem Material bis zum nachfolgenden Laserpuls nicht vollständig aus der Wechselwirkungszone verflüchtigt hat [44, 45]. Bereits bei Repetitionsraten von 1 Hz ist beim nachfolgenden Puls ausreichend Materialdampf oberhalb der Wechselwirkungszone vorhanden, um einen ungestörten Energieeintrag zu behindern.

Werden ultrakurze Laserpulse in Luft fokussiert, wird eine Streuung und Aufweitung der Laserstrahlung im Bereich des Fokus beobachtet. Dieses Phänomen wird in der Literatur üblicherweise als Conical Emission (CE) bezeichnet [12, 46]. Grund für diese Streueffekte sind nichtlineare Effekte im Luftdurchbruch, der durch die hohe Energiedichte im Strahlfokus ausgelöst wird. Durch diese Effekte können sowohl eine räumliche Streuung, als auch eine Verkürzung der Wellenlänge einzelner Strahlanteile

beobachtet werden. Die Auswirkungen der CE treten nur bei Pulsdauern im Femtosekundenbereich auf und können auch beim Abtragen von Nuten nachgewiesen werden.

2.3 Ergebnisse grundlegender Untersuchungen

Die Untersuchung der grundlegenden physikalischen Zusammenhänge bei abtragenenden Laserprozessen war in der jüngeren Vergangenheit Inhalt zahlreicher Untersuchungen. Insbesondere die Vorgänge beim Laserpräzisionsbohren wurden intensiv erforscht. Dabei wurde, soweit die notwendigen Daten nicht experimentell zugänglich waren, auf Simulationsrechnungen zurückgegriffen. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sind zum Großteil auch für dreidimensionale Abtragsprozesse anwendbar.

Bei den hohen Leistungsdichten wie sie beim Laserabtragen auftreten, ändert sich die Temperatur im Werkstoff so schnell, dass sich wichtige Werkstoffkennwerte wie Wärmeleitfähigkeit oder Absorptionseigenschaften teilweise um Größenordnungen ändern. Da diese Werte unter solch extremen Bedingungen experimentell nur schwer messbar sind, wurden sie durch theoretische Modelle angenähert.

Die Einkopplung der Energie in das Werkstück ist vom Einfallswinkel abhängig. Beim Laserbohren, wo viele Laserpulse auf die selbe Stelle auftreffen, bildet sich nach einer größeren Anzahl von Laserpulsen eine charakteristische Bohrungsgeometrie aus. Eine zunehmend unterschiedliche Einkopplung über den Bohrungsradius führt schließlich zur Ausbildung einer Spitze in der Mitte der Bohrung. Diese Veränderungen werden auch für Änderungen der Bohrgeschwindigkeit im Verlauf des Bohrprozesses verantwortlich gemacht [10].

Bei längeren Pulsdauern entspricht die Erwärmungsdauer in etwa der Pulsdauer. Unterhalb von ca. 100 ps ist hingegen nicht mehr entscheidend, wie lange die Energie auf das Werkstück einwirkt, sondern nur noch wie viel Energie absorbiert wird. Simulationen haben gezeigt, dass das Aufschmelzen und der Materialaustrieb im Wesentlichen nach Ende des Laserpulses stattfinden. So lange benötigt die im Elektronensystem deponierte Energie, um durch Wärmeleitung auf das Festkörpergitter überzugehen. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass eine völlig schmelzfreie Bearbeitung unmöglich ist. In Bild 2.2 sind charakteristische Zeiten für Verdampfung, Erstarrung und Schmelzschichtdicke von Aluminium in Abhängigkeit der Pulsdauer dargestellt. Für dieses Material ist unterhalb von etwa 10 ps keine weitere Reduktion der Schmelzschichtdicke zu erkennen [10].

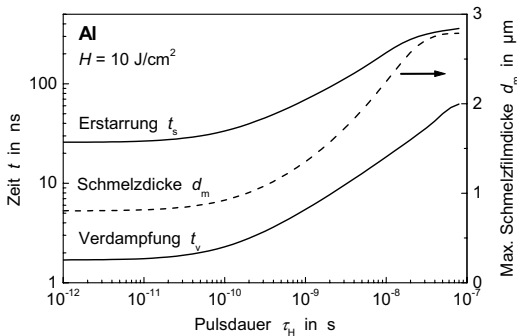


Bild 2.2: Charakteristische Zeiten für Verdampfung, Erstarren und maximale Schmelzfilmdicke von Aluminium in Abhängigkeit der Pulsdauer [10].

Wenn man davon ausgeht, dass die Schmelzebildung nicht völlig vermieden werden kann, können zumindest theoretisch auch bei Pulsdauern unterhalb der Relaxationszeit Schmelzschichten und Grate entstehen. Der Schmelzaustrieb findet dabei gegenüber dem Puls verzögert statt und dauert üblicherweise noch bis lange nach dem Puls an.

Durch eine Reduktion der Leistungsdichte kann die insgesamt ins Werkstück eingebrachte Energie und damit die Tendenz zur Gratabbildung reduziert werden. Diese Tatsache wird in Bild 2.3 anhand der maximalen Schmelzdicke in Abhängigkeit der Pulsdauer verdeutlicht. Die Schmelzschichtdicke steigt mit zunehmender Energiedichte, ein Effekt, der sich zu längeren Pulsdauern hin noch verstärkt. In Bild 2.4 ist die berechnete Abtragstiefe pro Puls für den selben Pulsdauerbereich aufgetragen. Für die Berechnung wurde die Energiedichte als konstant angenommen, weshalb die Leistungsdichte mit zunehmender Pulsdauer abnimmt. Sinkt die Leistungsdichte zu langen Pulsdauern hin unter die Abtragsschwelle, findet kein Abtrag mehr statt und die Kurven knicken nach unten ab. Vergleicht man die Kurven aus Bild 2.4 mit denen aus Bild 2.3 so fällt auf, dass bei längeren Pulsdauern auch dann noch bedeutende Mengen an Schmelze entstehen, wenn bereits kein Abtrag mehr stattfindet.

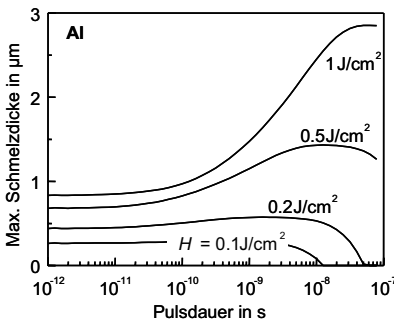


Bild 2.3: Berechnete Abhängigkeit der max. Schmelzdicke von der Pulsdauer [10].

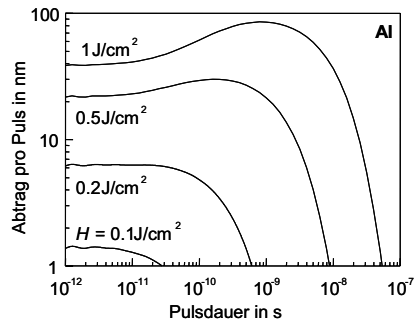


Bild 2.4: Berechnete Abhängigkeit der Abtragstiefe pro Puls von der Pulsdauer [10].

Auch wenn damit ein völlig schmelzfreier Materialabtrag zumindest theoretisch unmöglich ist, zeigen die Beobachtungen, dass die Schmelzdicke bei kurzen Pulsdauern und bei geringer Energiedichte minimal wird. In der Literatur wird die Energiedichte häufig in zwei unterschiedliche Abtragsregime eingeteilt [36]. Für niedrige Energiedichten korreliert die Abtragstiefe mit der optischen Eindringtiefe. Oberhalb einer materialabhängigen Schwelle bestimmt die Wärmeleitung durch Elektronendiffusion die Abtragstiefe. Bild 2.5 zeigt die bei Versuchen ermittelte Volumenabtragsrate in Abhängigkeit der Energiedichte beim Bohren von Stahl. Erhöht man die Energiedichte um eine Größenordnung, vergrößert sich gleichzeitig die Volumenabtragsrate um zwei Größenordnungen.

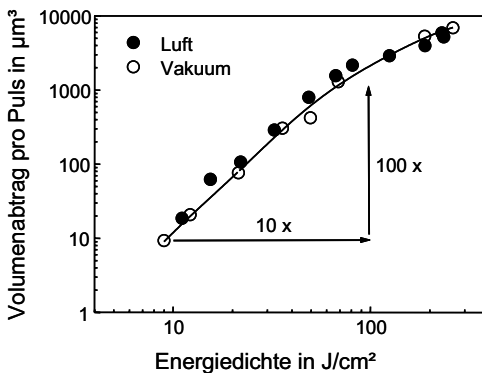


Bild 2.5: Volumenabtragsrate in Abhängigkeit der Energiedichte. Material: Stahl, Pulsdauer: 125 fs, Wellenlänge: 800 nm [46].

Die Energie-dichte hat also einen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit der Bearbeitung.

Die dargestellten Ergebnisse beeinflussen die Anwendung auf entscheidende Weise. Wenn die Schmelze bei geringer Energiedichte minimal wird, gleichzeitig aber auch die Abtragsrate abnimmt, kommt der sorgfältigen Auswahl der optimalen Bearbeitungsparameter eine zentrale Bedeutung zu. Im Hinblick

auf einen schmelzfreien Abtrag sollte die Energiedichte gering gewählt werden, gleichzeitig ist eine möglichst hohe Energiedichte zur Erzielung einer hohen Abtragsrate wünschenswert. Die Auswahl der optimalen Pulsenergie ist materialabhängig und muss deshalb abhängig von der Anwendung individuell getroffen werden.

3 Experimentelle Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird die Systemtechnik beschrieben, die bei den zugrunde liegenden Versuchen eingesetzt wurde. Die Laseranlage teilt sich in die Laserstrahlquelle, die Strahlführung und das Handhabungssystem für die zu bearbeitenden Werkstücke.

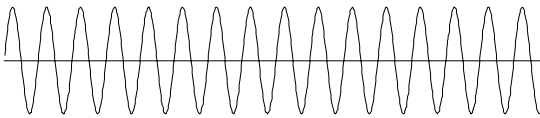
3.1 Erzeugung ultrakurzer Laserpulse

Die minimal erreichbare Pulsdauer bei Laserstrahlquellen hängt in erster Linie davon ab, wie die Laserpulse erzeugt werden. Im einfachsten Fall geschieht die Pulserzeugung durch gepulste Anregung, z.B. durch Blitzlampen. Auf diese Weise werden Pulsdauern im Mikrosekundenbereich erreicht. Kürzere Pulse können mit gütegeschalteten Lasersystemen (Q-switch-Lasern) erzeugt werden. Bei diesen Lasersystemen sorgt ein schnell schaltbarer Verschluss dafür, dass nur für sehr kurze Zeit Laserstrahlung aus dem Resonator ausgekoppelt wird. Üblicherweise kommen hierfür sogenannte Pockelszellen zum Einsatz. Diese bestehen aus Kristallen, die bei Anlegen einer Hochspannung ihre transmittiven Eigenschaften ändern. Ein weiterer Vorteil von gütegeschalteten Lasersystemen ist die Tatsache, dass das laseraktive Medium auch zwischen den Pulsen weiter gepumpt und angeregt wird. Die dabei gespeicherte Energie wird während des Pulses schlagartig freigesetzt, was eine deutlich höhere Pulsenergie ermöglicht, als bei gepulster Anregung. Nach dem Laserpuls schließt die Pockelszelle wieder und ermöglicht es, im laseraktiven Medium erneut Energie aufzubauen. Die kürzeste Pulsdauer kommerziell erhältlicher Lasersysteme liegt im Bereich weniger Nanosekunden.

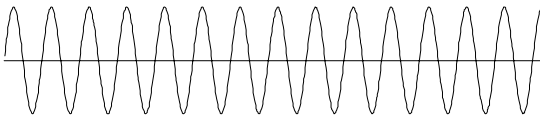
Seit geraumer Zeit sind Lasersysteme mit Pulsdauern im Piko- und Femtosekundenbereich bekannt. Neben Laborsystemen sind kommerzielle Systeme mit unterschiedlichen Spezifikationen erhältlich, teilweise mit ausreichend Pulsenergie zum Materialabtrag. Dabei handelt es sich um modengekoppelte Systeme mit nachgeschalteten Verstärkerstufen. Im Folgenden soll ein typischer Ultrakurzpulslaser am Beispiel des für

die vorliegenden Untersuchungen benutzten Systems dargestellt werden. Andere Systeme weichen teilweise vom beschriebenen Funktionsprinzip ab.

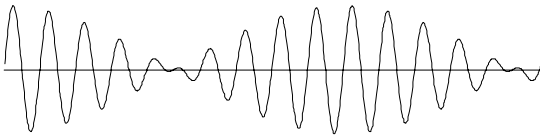
Pulsdauern im Piko- und Femtosekundenbereich lassen sich nicht mehr auf direktem Wege erzeugen, deshalb kommt in diesem Pulsdauerbereich die Technik der Modenkopplung zum Einsatz. Die Modenkopplung beruht auf dem Prinzip, dass sich mehrere unterschiedliche, im Resonator umlaufende Moden überlagern. In Bild 3.1 wird dieses Prinzip der Übersichtlichkeit halber nur an zwei sich überlagernden Moden verdeutlicht.



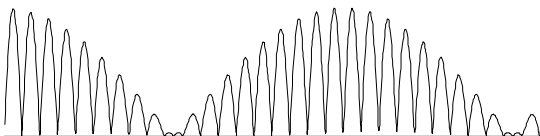
a: erster Mode



b: zweiter Mode



c: Schwebung



d: Intensität

Bild 3.1: Prinzip der Modenkopplung.

Die beiden Moden a und b überlagern sich und bilden die Schwebung c. Die Feldstärke der Schwebung ergibt sich aus der Summe der beiden Einzelwellen. Die resultierende Intensität (Bild d) entspricht dem Quadrat der Feldstärke.

Die Intensität einer Welle aus N überlagerten Moden hängt nach

$$E_{\max} = N^2 \cdot E_0 \quad (3.1)$$

quadratisch von der Anzahl der Einzelmoden ab [47]. Gleichzeitig hängt die Pulsdauer der resultierenden Pulse über

$$\tau_H = \frac{1}{N} \cdot \frac{2 \cdot L}{c} \quad (3.2)$$

linear von der Anzahl der Moden ab. Zur Verdeutlichung ist in Bild 3.2 die Intensitätskurve für 2, 10 und 50 überlagerte Moden dargestellt. Deutlich ist die Verkürzung des einhüllenden Pulses zu erkennen. Gleichzeitig wird die Intensität außerhalb der Maxima durch destruktive Interferenz mit zunehmender Zahl der Moden immer weiter unterdrückt.

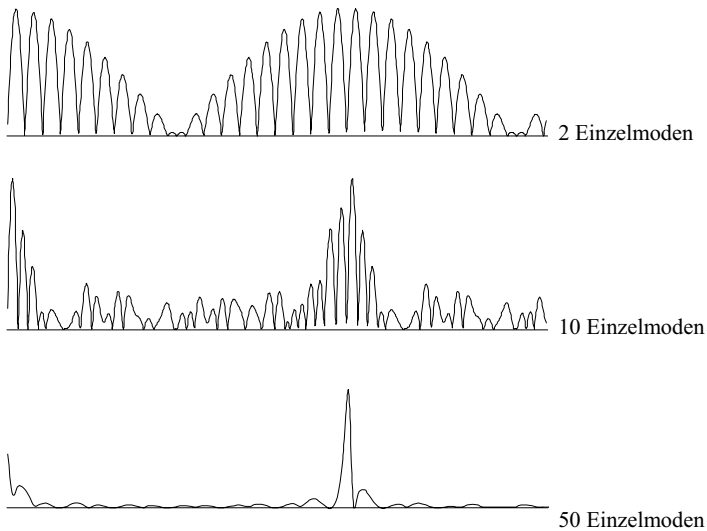


Bild 3.2: Pulsform nach Überlagerung von 2, 10 und 50 Einzelmoden (Ordinate ohne Maßstab).

Zur Erzielung einer geringen Pulsdauer ist also eine möglichst große Zahl von Moden notwendig.

Bei fester Resonatorlänge ist die Zahl der Moden über die Formel

$$\tau_H \geq \frac{1}{\Delta\nu} \quad (3.3)$$

vom Emissionsspektrum des laseraktiven Mediums (LAM) abhängig. Deshalb ist für eine ultrakurze Pulsdauer ein laseraktives Medium mit einer möglichst großen Bandbreite notwendig. Ti:Saphir ermöglicht mit einer Bandbreite von 680 nm bis 1100 nm Pulsdauern von etwa 6 Femtosekunden und stellt heute das am häufigsten eingesetzte Medium für die Erzeugung ultrakurzer Pulse dar [48].

Eine effektive Modenkopplung kann nur in Gang kommen, wenn eine möglichst große Zahl von Moden mit konstanter Phasenlage vorhanden sind. Deshalb muss dafür gesorgt werden, dass nur entsprechende Moden im Resonator umlaufen können und alle anderen blockiert werden. Dies kann prinzipiell auf zwei Arten erreicht werden: aktiv und passiv. Bei der aktiven Modenkopplung wird den Lasermoden im Resonator eine Phase der Frequenz

$$f = \frac{c}{2 \cdot L} \quad (3.4)$$

aufgeprägt. Dies kann zum Beispiel durch einen mit der Frequenz f angesteuerten akusto-optischen Modulator erfolgen. Bei der passiven Modenkopplung werden z.B. sättigbare Absorber eingesetzt, die nur bei sehr hohen Intensitäten transmittierende Eigenschaften bekommen. Moden niedriger Intensität werden im Absorber gefangen, nur wenn ein einzelner Mode die Schwellintensität überschreitet, wird der Absorber durchlässig. Solange der Absorber durchlässig ist, können Moden gleicher Phasenlage passieren und die Modenkopplung kann in Gang kommen. Bei dem für die vorliegenden Untersuchungen verwendeten Lasersystem wird ein akusto-optischer Modulator für die aktive Modenkopplung eingesetzt [49].

Laserpulse, die mittels Modenkopplung erzeugt werden, haben üblicherweise eine Pulsenergie im nJ-Bereich. Diese Energien sind viel zu gering für eine Materialbearbeitung und müssen daher um mehrere Größenordnungen verstärkt werden. Aufgrund der bei diesen Pulsdauern auftretenden hohen Intensitätsspitzen ist es nicht möglich, die Pulse direkt zu verstärken. Bei einer Leistungsdichte von mehr als 10 GW/cm² tendiert der Strahl zur destruktiven Selbstfokussierung [50]. Um diese Probleme zu umgehen, bedient man sich der CPA-Technik (Chirped Pulse Amplification), die aus der Radartechnik bekannt ist [51]. Bei dieser Technik wird der Laserpuls wie in Bild 3.3 dargestellt zunächst um etwa drei Größenordnungen reversibel gestreckt, wodurch

sich die Pulsspitzenleistung um die selbe Größenordnung erniedrigt. Die Streckung wird über ein Dispersionsgitter realisiert, das den Puls so in seine spektralen Anteile zerlegt, dass die verschiedenen Anteile unterschiedliche Wegstrecken zurücklegen müssen.

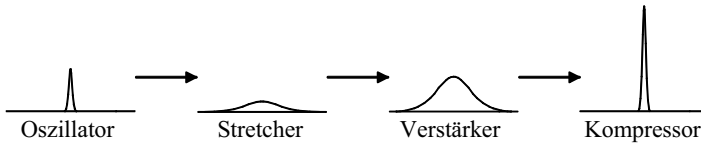


Bild 3.3: Prinzip der CPA-Technik.

Die so verlängerten Pulse können nun frei von nichtlinearen Effekten verstärkt werden. Gleichzeitig wird die Gefahr der Zerstörung des Verstärkermediums deutlich reduziert. In einem Kompressor wird die spektrale Streckung wieder rückgängig gemacht und der Puls damit wieder nahezu auf die Ausgangspulsdauer komprimiert. Nachteilig an der CPA-Technik ist die Beeinträchtigung des Strahlprofils durch die Pulsstreckung über Gitter, weshalb das Strahlprofil meist eine leicht ovale Form aufweist.

Die Verstärkung der Pulse geschieht in einem regenerativen Verstärker, der wie ein üblicher Laser aufgebaut ist. Als Verstärkermedium wird ein Titan-Saphir-Kristall eingesetzt. Bild 3.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Verstärkers.

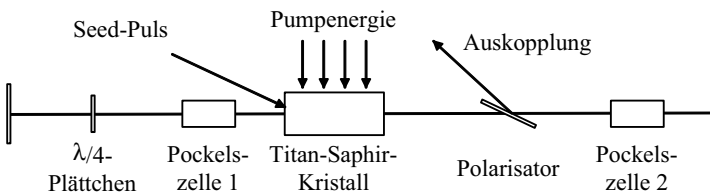


Bild 3.4: Funktionsprinzip des regenerativen Verstärkers.

Die gestreckten Pulse vom Oszillator (Seed-Pulse) werden durch Reflexion an der Endfläche des Titan-Saphir-Kristalls in den Resonator eingekoppelt. Solange die beiden Pockelszellen nicht aktiviert werden, läuft der Puls einmal im Resonator um und verlässt den Resonator über Reflexion am Polarisator wieder. Während des Umlaufs sorgt das $\lambda/4$ -Plättchen aufgrund zweimaligen Durchlaufens für eine Drehung der Polarisation um $\lambda/2$. Wird die Pockelszelle 1 aktiviert, was beim beschriebenen Lasersys-

tem auf ein Triggersignal vom Pumpplaser hin geschieht, so wirkt die Pockelszelle ebenfalls wie ein $\lambda/4$ -Plättchen und hebt die Wirkung des zweiten Durchlaufs durch das $\lambda/4$ -Plättchen wieder auf. Dadurch wird der Puls am Polarisator nicht reflektiert, kann im Resonator umlaufen und wird bei jedem Umlauf weiter verstärkt. Der Verstärkungsfaktor bei jedem einzelnen Umlauf liegt bei etwa 3-4, insgesamt wird der Puls um den Faktor 10^6 verstärkt [50]. Nach einer ausreichenden Anzahl von Umläufen wird die Pockelszelle 2 aktiviert, wodurch die Polarisation des Pulses durch doppeltes Durchlaufen wieder um $\lambda/2$ verdreht wird. Dadurch wird der Puls wieder am Polarisator reflektiert und ausgekoppelt. Die Pockelszellen werden dabei durch entsprechende Hochspannungstreiber mit einer Genauigkeit von unter einer Nanosekunde angesteuert. Der Verstärker wird bei dem dargestellten System durch einen frequenzverdoppelten, diodengepumpten Nd:YAG-Laser gepumpt.

3.2 Eingesetzte Lasersysteme

Für abtragende Laserprozesse werden fast ausschließlich gepulste Lasersysteme verwendet. Für die Mikrobearbeitung bieten sich besonders Festkörper-Lasersysteme an. CO_2 -Laser können aufgrund der langen Wellenlänge für die Präzisionsbearbeitung nicht ausreichend fokussiert werden. Außerdem ist der Absorptionsgrad von Metallen bei der Wellenlänge von Festkörperlasern höher. Bisherige Untersuchungen zur abtragenden Bearbeitung wurden überwiegend im Pulsdauerbereich oberhalb weniger Nanosekunden sowie im Bereich von wenigen hundert Femtosekunden durchgeführt. Grund dafür ist vor allem die Tatsache, dass Lasersysteme bezüglich der Parameter Pulsdauer, Pulsenergie und Repetitionsrate nur auf einen relativ eingeschränkten Parameterbereich eingestellt werden können. Um unterschiedliche Parameterbereiche abdecken zu können, wurden die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Versuche mit unterschiedlichen Lasersystemen durchgeführt. Durchgehend wurden Systeme mit einer hohen Strahlqualität eingesetzt, um eine möglichst gute Fokussierbarkeit zu erreichen. Zu Vergleichszwecken wurden außerdem Versuche mit kommerziell erhältlichen, gütegeschalteten Nd:YAG Festkörperlasern bei Pulsdauern von 15 ns bzw. 150 ns durchgeführt. In Tabelle 3.1 sind die Parameter der eingesetzten Lasersysteme zusammengefasst.

Typ	Spectra-Physics Hurricane	Coherent RegA 9000	Versuchsmuster	Lambda Physik Starline	Haas Vectormark
Laseraktives Medium	Ti:Saphir	Ti:Saphir	Nd:YVO ₄	Nd:YAG	Nd:YAG
Pulsdauer	120 fs – 7 ps	200 fs	10 ps	15 ns	150 ns
Wellenlänge	800 nm	800 nm	1064 nm	1064 nm	1064 nm
Maximale Pulsfolgefrequenz	1.000 Hz	250.000 Hz	20.000 Hz	2.000 Hz	60.000 Hz
Maximale Pulsenergie	1 mJ	5 µJ	0,5 mJ	3,5 mJ	4 mJ

Tabelle 3.1: Wichtige Parameter der eingesetzten Lasersysteme.

Der größte Teil der Versuche wurde mit dem im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Femtosekunden-Lasersystem durchgeführt. Bei diesem Lasersystem handelt es sich um eine kommerziell erhältliche Strahlquelle, die die Möglichkeit bietet, die Pulsdauer bei annähernd konstanten Strahlparametern im Bereich von etwa 120 fs bis 7 ps zu variieren. Dies wird durch eine variable Komprimierung der über CPA-Technik verstärkten Pulse erreicht. Damit ist es möglich, den Einfluss der Pulsdauer in diesem physikalisch wichtigen Bereich zu untersuchen. Die Strahlquelle hat eine maximale Pulsenergie von 1 mJ bei einer Repetitionsrate von 1 kHz. Im Rahmen der Untersuchungen stellte sich heraus, dass für eine gute Bearbeitungsqualität eine um 1-2 Größenordnungen geringere Pulsenergie ausreichend ist. Im Gegenzug war von Interesse, ob eine effektivere Bearbeitung durch eine wesentlich höhere Repetitionsrate erreicht werden kann. Für weiterführende Versuche wurden deshalb Strahlquellen mit höherer Repetitionsrate bei geringerer Pulsenergie herangezogen. Weiterhin konnte herausgefunden werden, dass beim Strukturieren der untersuchten Metalle unterhalb einer Pulsdauer von wenigen Pikosekunden nur noch eine geringe Verbesserung der Bearbeitungsqualität erzielbar ist. Um das Potential der Bearbeitung in diesem Pulsdauerbereich abzuschätzen, wurde alternativ ein Lasersystem mit einer Pulsdauer im Pikosekundenbereich eingesetzt.

Pulsdauern im Piko- und Femtosekundenbereich lassen sich nur mit aufwändiger Technik erzeugen, die schnell an die physikalischen Grenzen stößt. Im Bezug auf die Repetitionsrate sind Pockelszellen meist das limitierende Element. Neueste Entwicklungen lassen Repetitionsraten in der Größenordnung von 50 kHz realistisch erscheinen.

nen. Ein anderer Ansatz zur Erzielung hoher Repetitionsraten ist die Verwendung eines akkusto-optischen Modulators (TeO_2) anstelle der üblichen Pockelszellen. Ein kommerziell erhältliches System wendet diese Technologie an, um Repetitionsraten von bis zu 250 kHz bei einer Pulsenergie von etwa 5 μJ zu erreichen [52]. Diese Pulsenergie reicht bei entsprechender Fokussierung aus, die Abtragsschwelle zu überschreiten. Allerdings ist der dabei erzielte Fokusedurchmesser sehr gering, weshalb die Vergleichbarkeit mit Experimenten, die bei höheren Pulsenergien durchgeführt wurden, eingeschränkt ist. Dieses Lasersystem wurde deshalb nur eingesetzt, um generell zu untersuchen, inwieweit sich hohe Repetitionsraten auf den Bearbeitungsprozess auswirken.

Wie bereits dargelegt, sind Pulsdauern im Femtosekundenbereich nur mit relativ großem Aufwand zu erzeugen. Lasersysteme für Pulsdauern in der Größenordnung weniger Pikosekunden können einen einfacheren Aufbau haben, weshalb solche Systeme preiswerter und zuverlässiger sein können. Im Laufe der Untersuchungen stand das Versuchsmuster einer Pikosekunden-Strahlquelle mit Nd:YVO_4 -Oszillator zur Verfügung. Zur passiven Modenkopplung wird hier ein sättigbarer Halbleiterabsorber eingesetzt, womit eine Pulsdauer von etwa 6,5 ps bei einer Repetitionsrate von 80 MHz erreicht wird. Im Gegensatz zu einem typischen fs-System wird der Puls ohne zeitliche Streckung direkt verstärkt. Dazu wird ein Puls über einen Pulspicker ausgekoppelt und über einen regenerativen Verstärker auf eine für die Materialbearbeitung ausreichende Energie gebracht. Auch im Verstärker wird ein Nd:YVO_4 -Kristall als laseraktives Medium eingesetzt, welcher von Laserdioden gepumpt wird. Das Lasersystem erreicht Pulsdauern von 10 ps bei einer Repetitionsrate von 20 kHz und einer maximalen Pulsenergie von etwa 500 μJ [53].

3.3 Strahlführung und Strahlformung

Für die Strahlführung von der Strahlquelle zur Wechselwirkungszone werden Spiegel eingesetzt. Aufgrund der sehr hohen Spitzenleistungen im Mega- und Gigawattbereich ist eine Strahlführung über Fasern ausgeschlossen. Die verwendeten Spiegel sind Substrate aus Quarzglas, die mit einer an die Laserwellenlänge angepassten, dielektrischen Beschichtung versehen sind.

Die eingesetzten Ultrakurzpulslaser können nur bei maximaler Leistung stabil betrieben werden, daher ist laserseitig keine Veränderung der Leistung vorgesehen. Für die Versuche war es dagegen notwendig, die Laserleistung gezielt einstellen zu können.

Zur Einstellung der Laserleistung wurde ein externer Abschwächer eingesetzt, dessen Funktionsprinzip in Bild 3.5 skizziert wird. Dieser Abschwächer besteht aus einem Glassubstrat, das mit einer winkelabhängig transmittierenden Beschichtung versehen ist. Mit zunehmendem Einfallswinkel nimmt die Transmission ab und gleichzeitig die Reflexion zu. Hinter dem eigentlichen Abschwächer wird ein zweites Plättchen identischer Stärke angeordnet, um den Strahlversatz aufgrund der Lichtbrechung auszugleichen. Beide Plättchen sind auf ineinander greifende Zahnräder montiert, somit ist für beide Plättchen derselbe Einfallswinkel gewährleistet. Die vom Abschwächer reflektierte Strahlung wird an der Innenseite des Gehäuses absorbiert. Aufgrund des relativ großen Strahldurchmessers von mehr als 10 mm und der geringen mittleren Leistung erfolgt keine spürbare Erwärmung des Gehäuses.

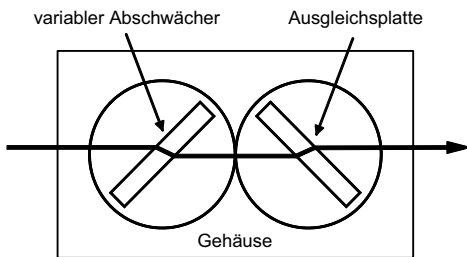


Bild 3.5: Variabler Abschwächer: Prinzipskizze.

Für eine präzise Materialbearbeitung ist ein genügend kleiner Strahldurchmesser im Fokus wünschenswert. Der theoretisch erreichbare Fokusbereich hängt über

$$d_f = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D} \cdot (M^2) \quad (3.5)$$

neben der Wellenlänge λ und der Fokusslänge f auch vom Strahldurchmesser D auf der fokussierenden Optik ab [41]. Der Quotient

$$F = \frac{f}{D} \quad (3.6)$$

wird auch als F-Zahl oder Fokussierzahl bezeichnet. Um einen möglichst kleinen Fokusbereich zu erhalten, können nun entweder Wellenlänge bzw. Fokusslänge reduziert, oder aber der Strahldurchmesser auf der Fokussieroptik vergrößert werden. Die Wellenlänge ist durch das Lasersystem festgelegt, die Fokusslänge kann aus Handhabungsgründen nicht beliebig verkleinert werden. Der Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse kann dagegen durch Aufweiten in einem Teleskop relativ einfach vergrößert

bert werden, solange der Durchmesser der fokussierenden Elemente ausreichend groß gewählt wurde. Ergänzend dazu reduziert ein Aufweiten die Energiedichte, was sich auf Belastung und Lebensdauer der Strahlführungselemente positiv auswirkt. Für die vorliegenden Versuche wurde der Rohstrahl unmittelbar nach dem Strahlaustritt durch ein einfaches Galilei-Teleskop aufgeweitet. Beim Galilei-Teleskop gibt es im Gegensatz zum Kepler-Teleskop keinen Zwischenfokus, in dem es aufgrund der hohen Energiedichte zu einem Luftdurchbruch kommen kann. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Versuche mit unterschiedlichen Lasersystemen zu erzielen, wurde die Aufweitung so gewählt, dass der Strahldurchmesser auf der Fokussieroptik stets in der Größenordnung von 12-13 mm lag. Meist war dazu eine Aufweitung um den Faktor 4 notwendig.

Zur präzisen Materialbearbeitung ist es notwendig, den Laserstrahl gezielt ein- und ausschalten zu können. Dabei ist es wünschenswert, dass die Strahlparameter ab dem ersten Laserpuls konstant sind. Bei gütegeschalteten Lasersystemen ist es möglich, den Strahl durch gezielte Ansteuerung der Pockelszelle ein- bzw. auszuschalten. Bei modengekoppelten Ultrakurzpulslasersystemen ist der Laser häufig nicht direkt ansteuerbar. Bei dem Lasersystem Hurricane kann von außen beeinflusst werden, ob der Seedpuls in den regenerativen Verstärker eingekoppelt wird, d.h. ob die Pockelszelle 1 in Bild 3.4 schaltet. Dadurch ist bei diesem Lasersystem ein nahezu pulsgenaueres Ein- und Ausschalten des Strahls möglich. Für Lasersysteme bei denen das nicht möglich war, wurde ein externer, magnetisch betätigter mechanischer Shutter eingesetzt. Der verwendete Shutter hat eine Anstiegszeit von 200 μ s, was dem zeitlichen Pulsabstand bei einer Repetitionsrate von 5 kHz entspricht. Der Shutter kann mit einer maximalen Frequenz von 250 Hz betrieben werden, was die kleinste Anzahl der Pulse, die ausgekoppelt werden können, einschränkt. Die Apertur des verwendeten Shutters liegt bei nur 4 mm, weshalb der Shutter im Rohstrahl, vor dem aufweitenden Teleskop angeordnet werden musste.

3.4 Geometrieerzeugung

Für eine präzise und reproduzierbare Materialbearbeitung ist ein angemessenes Probenhandling notwendig. Dies gilt sowohl für die Positionierung des Werkstücks relativ zum Laserstrahl, als auch für die Bewegung des Werkstücks während der Bearbeitung. Für die vorliegenden Versuche wurde eine CNC-gesteuerte Dreiachs-Anlage eingesetzt. Aufgrund der nahezu kraftfreien Bearbeitung ist es ausreichend, die Proben mit einem Vakuum-Chuck zu fixieren. Zur Bauteilpositionierung wird eine CCD-Kamera

verwendet, die über einen Strahlteiler in den Strahlengang der Laserstrahlung eingespiegelt wird. Als Strahlteiler wurde einer der Umlenkspiegel herangezogen. Da die Umlenkspiegel auf die Laserwellenlänge abgestimmte Beschichtungen haben, wird ausreichend Strahlung anderer Wellenlängen transmittiert, so dass eine visuelle Beobachtung des Werkstücks möglich ist. Das gesamte System aus Strahlquelle, Strahlführung und Bauteilhandhabung ist auf einer durchgehenden Granitplatte montiert, um eine starre Anordnung zu gewährleisten. Zur mechanischen Entkopplung ist die Granitplatte auf passiven, luftgefüllten Dämpfungselementen gelagert.

Zum Abtragen beliebiger Geometrien ist es notwendig, das üblicherweise annähernd rotationssymmetrische Strahlprofil in die gewünschte Geometrie zu übertragen. Beim Laserabtragen kann dies auf zwei verschiedene Arten geschehen. Man unterscheidet zwischen der Maskenprojektion und dem Direktschreibeverfahren. Die beiden Verfahren sind in Bild 3.6 dargestellt.

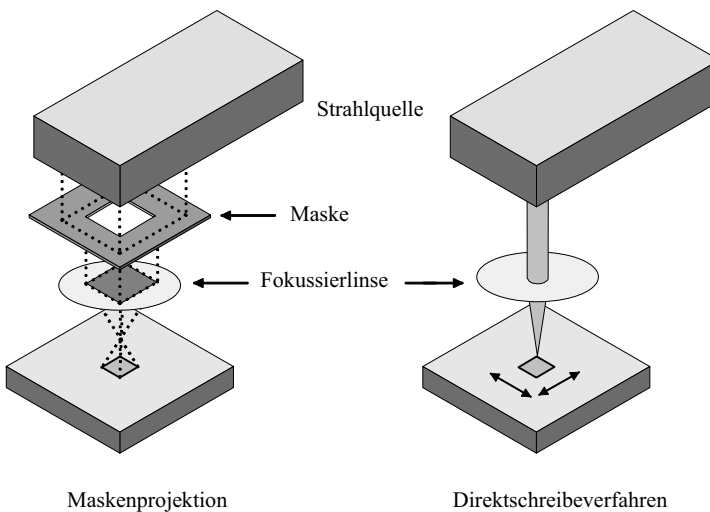


Bild 3.6: Prinzip der Maskenprojektion (links) und des Direktschreibeverfahrens (rechts).

Bei der Maskenprojektion wird die Geometrie einer Maske auf das Werkstück abgebildet. Jeder Puls trägt dabei die vollständige Bearbeitungsfläche ab, die Tiefe wird über die Anzahl der Laserpulse eingestellt. Bei diesem Verfahren wird ein Teil der Laserstrahlung an der Maske absorbiert oder reflektiert, weshalb nur ein Teil der Laserenergie tatsächlich zum Abtragen zur Verfügung steht. Im Gegensatz dazu steht das

Direktschreibverfahren, bei dem die Geometrie mit dem fokussierten Laserstrahl regelrecht abgefahren wird vergleichbar mit einem Fingerfräser. Bei diesem Verfahren wird die gesamte Strahlenergie zum Abtrag ausgenutzt. Die Maskenprojektion eignet sich vor allem für Verfahren, bei denen sich bestimmte Geometrien häufig wiederholen. Die Flexibilität ist hierbei eingeschränkt, da für jede Geometrie eine eigene Maske angefertigt werden muss. Das Direktschreibverfahren ist dagegen sehr flexibel. Mit einer geeigneten Steuerung können beliebige Geometrien abgefahren und gegebenenfalls schnell verändert werden. Andererseits kann die Bearbeitungsgeschwindigkeit nicht beliebig gesteigert werden, da die Geometrie vollständig abgefahren werden muss. Für Prozesse, die nur eine geringe Pulsenergiedichte erfordern, beispielsweise beim Beschriften oder bei Belichtungsaufgaben für die Lithografie, hat die Maskenprojektion deshalb einen klaren Geschwindigkeitsvorteil. Hier reicht teilweise ein einzelner, energiereicher Laserpuls um den Prozess abzuschließen. Aufgrund der im Vergleich zum fokussierten Strahl geringeren Tiefenschärfe der Maskenabbildung, ist das abbildende Verfahren für hohe Aspektverhältnisse weniger gut geeignet. Für das Direktschreibverfahren sind Laserstrahlen mit guter Fokussierbarkeit notwendig, deshalb ist der Einsatz bestimmter Lasertypen, z.B. Excimerlaser nur mit dem Verfahren der Maskenprojektion möglich.

Alle Experimente der vorliegenden Arbeit wurden im Direktschreibverfahren durchgeführt. Die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück kann durch Bewegung des Werkstücks, des Laserstrahls oder einer Kombination davon erfolgen. Für die vorliegenden Versuche wurde abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit entweder das Werkstück oder der Laserstrahl bewegt, aber niemals beide gleichzeitig. Die Bewegung des Laserstrahls wurde über Galvanometerscanner realisiert. Der Vorteil dieser Methode liegt in einer hohen Beschleunigung und einer hohen Endgeschwindigkeit. Bedingt durch die geringen Drehwinkel der Spiegel ist die Genauigkeit beim Einsatz von Galvanometerscannern jedoch eingeschränkt. Bei den eingesetzten Scannersystemen liegt die Genauigkeit auf dem Werkstück in der Größenordnung von $5\text{ }\mu\text{m}$.

Alternativ bietet sich an, bei feststehendem Laserstrahl das Werkstück zu bewegen. Hierzu wurde ein luftgelagerter x-y-Tisch mit Glasmaßstäben zur Positionsbestimmung verwendet. Bei dieser Methode muss das Gewicht der Probe und des Tisches mit beschleunigt werden, was sich auf die Dynamik des Systems auswirkt. Aufgrund der Glasmaßstäbe kann mit dem x-y-Tisch jedoch um etwa eine Größenordnung genauer positioniert werden, als mit dem Scanner. Beim Einsatz eines Scanners wurde der x-y-Tisch lediglich zur Werkstückpositionierung verwendet. Die Fokussieroptik war an

einer zusätzlichen z-Achse befestigt, womit der Fokus relativ zur Werkstückoberfläche exakt eingestellt werden konnte.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Bearbeitung hat der Lichtfleckdurchmesser auf der Werkstückoberfläche. Er bestimmt die Energiedichte sowie die Nutbreite und hat Einfluss auf den Pulsüberlapp. Üblicherweise wird der Abstand zwischen Werkstück und fokussierender Optik so eingestellt, dass der kleinste Strahldurchmesser im Bereich der Wechselwirkungszone liegt, d.h. der Strahlfokus liegt auf der Werkstückoberfläche. Wird die Fokusebene gegenüber der Werkstückoberfläche verschoben, wird der Lichtfleckdurchmesser auf der Werkstückoberfläche größer. Gleichzeitig reduziert sich mit zunehmendem Strahlfleckdurchmesser die Energiedichte. Beides zusammen wirkt sich auf die Geometrie abzutragender Strukturen aus. Charakteristische Größe ist dabei die Rayleighlänge z_R , die über

$$z_R = F \cdot d_f \quad (3.7)$$

von der Fokussierzahl F und dem Strahldurchmesser d_f abhängt. Die Rayleighlänge markiert den Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld der Strahlpropagation. In dieser Entfernung fällt die Energiedichte auf die Hälfte ab, der Strahldurchmesser vergrößert sich um den Faktor

$$d_{zR} = \sqrt{2 \cdot d_f} \quad (3.8)$$

Je größer die Rayleighlänge ist, desto größer ist der Bereich, in dem die Fokusslage relativ zur Werkstückoberfläche verschoben werden kann, ohne das Bearbeitungsergebnis wesentlich zu beeinflussen. Für die Materialbearbeitung sollte deshalb immer angestrebt werden, die Wechselwirkungszone innerhalb der Rayleighlänge zu positionieren.

Beim Direktschreibverfahren werden kleinste erzielbare Strukturgröße und Präzision durch den Lichtfleckdurchmesser bestimmt. Für eine gegebene Anwendung ist es dabei nicht immer sinnvoll, einen möglichst geringen Lichtfleckdurchmesser anzustreben. Beim Strukturieren von Näpfchen bzw. Nuten ist es beispielsweise vorteilhaft, den Lichtfleckdurchmesser an die gewünschte Strukturgeometrie anzupassen. Sind Pulsüberlapp $\ddot{U}$ und Repetitionsrate f_p vorgegeben, bestimmt sich die Vorschubgeschwindigkeit nach (3.9) zu

$$v = (1 - \ddot{U}) \cdot f_p \cdot d_f \quad (3.9)$$

d.h. die Vorschubgeschwindigkeit hängt direkt vom Lichtfleckdurchmesser ab. Sofern genügend Leistung zur Verfügung steht, bietet es sich deshalb im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit an, den größtmöglichen Lichtfleckdurchmesser zu wählen, der für die geforderte Präzision noch ausreichend ist. In der Serienfertigung ist es nahe liegend, dazu die Strahlführung entsprechend anzupassen. Für einfache Versuche bietet sich an, lediglich die Lage der Strahltaille relativ zur Werkstückoberfläche zu verschieben.

An dieser Stelle ist es angebracht, auf den Zusammenhang zwischen der Leistungsdichte auf dem Werkstück und dem Strahldurchmesser hinzuweisen. Die Leistungsdichte ist bei realen Lasersystemen nur in Sonderfällen über den gesamten Strahlquerschnitt konstant. Bei den für die vorliegenden Untersuchungen eingesetzten Lasersystemen folgt die Leistungsdichteverteilung im Querschnitt annähernd einer Gaußkurve. Die insgesamt über den Strahlquerschnitt vorhandene Leistung ist jedoch konstant, d.h. bei einer Änderung des Strahlfleckdurchmessers ändert sich auch die Leistungsdichte über den Strahlquerschnitt. Für die Praxis bedeutet das, wenn der Strahlfleckdurchmesser auf der Werkstückoberfläche vergrößert wird, z.B. um einen größeren Nutquerschnitt abzutragen, muss die Pulsenergie entsprechend erhöht werden, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten.

In den vorhergehenden Betrachtungen wurde der Lichtfleckdurchmesser als feste Größe angenommen. In der Anwendung ist jedoch zu berücksichtigen, auf welchem Wirkdurchmesser d_W die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie stattfindet. Ein Materialabtrag findet nämlich nur dann statt, wenn die Leistungsdichte oberhalb der Abtragsschwelle liegt. Im Fall einer gaußförmigen Energiedichteverteilung gibt es einen Bereich am Rand des Strahlprofils, in denen die Leistungsdichte unter der Abtragsschwelle liegt. Erhöht man nun die Leistung steigt die Leistungsdichte auch in Randbereichen des Strahls über die Abtragsschwelle, der Wirkdurchmesser vergrößert sich entsprechend. Bild 3.7 verdeutlicht den beschriebenen Zusammenhang.

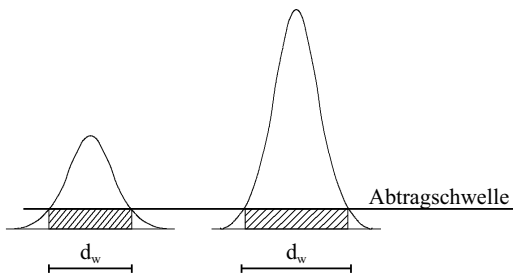


Bild 3.7: Zusammenhang zwischen Leistung und Wirkdurchmesser.

Bei der Oberflächenstrukturierung sind drei grundsätzlich unterschiedliche Fälle zu unterscheiden. Wird der Strahl während der Bearbeitung nicht relativ zum Werkstück bewegt, entsteht ein Näpfchen, dessen Form vom Durchmesser und der Intensitätsverteilung des Lichtflecks auf der Werkstückoberfläche abhängt. Die Tiefe des Näpfchens hängt hauptsächlich von der Pulsenergie und der Anzahl der Pulse ab. Das Abtragen von Näpfchen ist mit dem Beginn des Perkussionsbohrens vergleichbar. Nutenstrukturen entstehen, wenn der Laserstrahl mit einer Relativgeschwindigkeit über das Werkstück bewegt wird. Die Nuttiefe kann durch geeignete Parameterwahl, hauptsächlich Pulsenergie und Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst werden. Durch mehrfaches Überfahren der Nut auf der selben Spur kann die Nut stufenweise tiefer abgetragen werden. Der Nutquerschnitt bildet sich in Abhängigkeit von der Intensitätsverteilung aus und liegt abhängig von den Bearbeitungsparametern zwischen einer v-Form und einer u-Form. Die Querschnittsgeometrie von Nuten und Näpfchen wird überwiegend von der Intensitätsverteilung im Laserstrahl beeinflusst und kann während der Bearbeitung nur in eingeschränktem Maß beeinflusst werden. Komplexere Strukturen sind nur durch gezielten dreidimensionalen Abtrag möglich. Hierzu wird die Geometrie üblicherweise in parallelen Bahnen abgetragen. Eine dreidimensionale Geometrie entsteht durch schichtweisen Abtrag, vergleichbar mit dem Fräsen, weshalb das Laserabtragen teilweise auch als Laserfräsen bezeichnet wird. In Bild 3.8 sind die drei prinzipiellen Vorgehensweisen beim Oberflächenstrukturieren abgebildet.

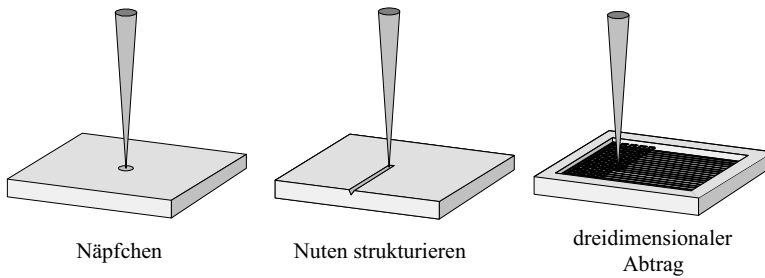


Bild 3.8: Prinzipielle Darstellung der unterschiedlichen Verfahren beim Oberflächenstrukturieren.

Für die vorliegenden Versuche wurden unterschiedliche Strukturen nach allen drei beschriebenen Verfahren abgetragen. Auf die spezifischen Unterschiede wird gegebenenfalls eingegangen.

Bei gepulsten Lasersystemen entstehen dreidimensionale Strukturen durch Aneinanderfügen von kleinen Abtragsstrukturen, üblicherweise runde Krater, deren Grundfläche in Form und Größe von dem auf die Werkstückoberfläche auftreffenden Strahlprofil abhängt. Zur Beschreibung der Vorgänge an der Abtragsfront soll der Abtrag von Nutenstrukturen, die durch eine eindimensionale Vorschubbewegung entstehen, näher betrachtet werden. Der Nutquerschnitt ist im Rahmen der verfahrensbedingten Toleranzen konstant und kann in bestimmten Grenzen durch entsprechende Formung des Strahlflecks und der Energiedichteverteilung auf der Werkstückoberfläche beeinflusst werden. Zentrale Kenngröße ist dabei der Vorschub pro Puls s_p , der über

$$s_p = \frac{v}{f_p} \quad (3.10)$$

von der Repetitionsrate f_p der Laserstrahlquelle und der Vorschubgeschwindigkeit v bestimmt wird. Um eine gleichmäßige Struktur zu erhalten, ist es notwendig, dass sich die aufeinander folgenden Laserpulse zu einem gewissen Grad überlappen, wobei sich die in Bild 3.9 gezeigten Größen ergeben.

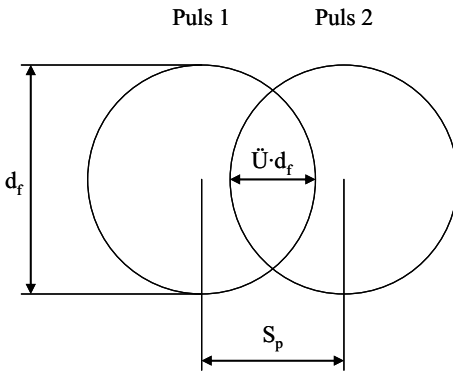


Bild 3.9: Bestimmung des Pulsüberlapps.

Entscheidend für einen gleichmäßigen Abtrag ist der Pulsüberlapp $\ddot{U}$, der sich wie folgt berechnet:

$$\ddot{U} = 1 - \frac{S_p}{d_f} = 1 - \frac{v}{f_p \cdot d_f} \quad (3.11)$$

Abhängig von den Verfahrensparametern gibt es für jeden Laserstrukturierprozess einen optimalen Pulsüberlapp, der typischerweise zwischen 20 und 80% liegt. Da der Pulsüberlapp und damit die Vorschubgeschwindigkeit vom Strahlfleckdurchmesser bestimmt werden, ist es häufig sinnvoll, den Strahlfleckdurchmesser im Rahmen der gewünschten Präzision eher größer zu wählen, um eine höhere Vorschubgeschwindigkeit realisieren zu können. Der Pulsüberlapp beeinflusst hauptsächlich, wie viele Pulse auf ein einzelnes Längeninkrement der abgetragenen Nut treffen und bestimmt damit maßgeblich die Nuttiefe t . Die Anzahl der Pulse p , die auf ein Längeninkrement treffen, berechnen sich zu

$$p = \frac{d_f \cdot f_p}{v} \quad (3.12)$$

Die Abtragstiefe vergrößert sich, je mehr Pulse pro Längeninkrement auftreffen. Die Einkoppelbedingungen an der Nutfront verändern sich in Abhängigkeit des Einlaufwinkels. Die vereinfachten geometrischen Zusammenhänge sind in Bild 3.10 dargestellt.

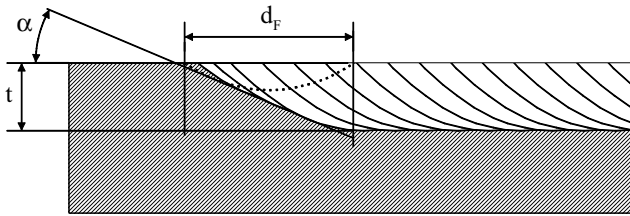


Bild 3.10: Prinzipielle Darstellung der Einlaufgeometrie.

Die Länge der Einlaufschräge entspricht dem Strahlfleckdurchmesser, die Tiefe ist von der Anzahl der Pulse, die auf diese Länge fallen abhängig. Der Einlaufwinkel beträgt

$$\tan \alpha = \frac{t}{d_F} \quad (3.13)$$

Nach den Fresnel-Gleichungen ist die Absorption im Werkstück vom Auftreffwinkel Φ abhängig. Nach [40] lassen sich diese für Metalle auf die Näherungslösung

$$A_p = \frac{4 \cdot n \cdot \cos \Phi}{n^2 + k^2 + 2 \cdot n \cdot \cos \Phi + \cos^2 \Phi + 1} \quad (3.14)$$

für die parallele sowie

$$A_s = \frac{4 \cdot n \cdot \cos \Phi}{n^2 + k^2 + 2 \cdot n \cdot \cos \Phi + \cos^2 \Phi} \quad (3.15)$$

für die senkrechte Polarisierung vereinfachen. An der Abtragsfront kann näherungsweise $\alpha = \Phi$ gesetzt werden. Für Eisen bei Raumtemperatur sind in der Literatur die Materialkonstanten $n = 3,9$ und für $k = 4,4$ zu finden [40]. In Bild 3.11 ist der nach diesen Gleichungen berechnete Verlauf von Einlaufwinkel und Absorption in Abhängigkeit von der Nuttiefe für einen typischen Strahlfleckdurchmesser von $18 \mu\text{m}$ dargestellt.

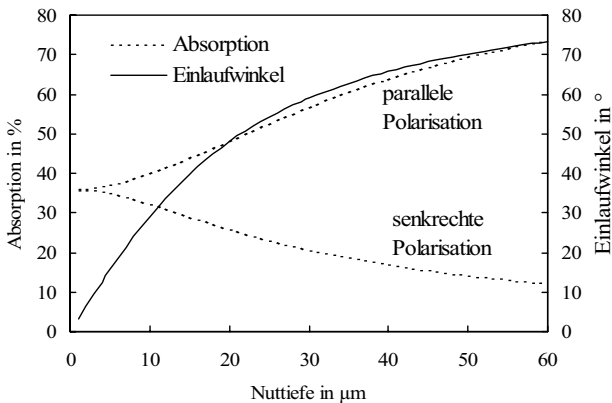


Bild 3.11: Berechneter Verlauf der Absorption in Abhängigkeit von der Nuttiefe, Strahlfleckdurchmesser: 18 μm , Annahme: Material: Eisen, $n = 3,9$, $k = 4,4$.

Bei senkrechter Polarisation nimmt die Absorption mit zunehmender Nuttiefe ab, bei paralleler Polarisation nimmt sie dagegen zu. Im Versuch ist deshalb zu erwarten, dass die Nut bei einer parallel zur Vorschubrichtung orientierten Polarisation tiefer wird. Gleichzeitig wird an den Nutflanken, wo die Polarisation gegenüber der Abtragsfront um 90° gedreht auftrifft, weniger Energie absorbiert. Insgesamt ist deshalb zu erwarten, dass die Nut bei paralleler Polarisation schmaler und tiefer ausfällt als bei senkrechter Polarisation.

Die dargestellten Verhältnisse gelten für den idealisierten Fall gleichmäßiger Bedingungen. In der Praxis kommen jedoch häufig geringe Abweichungen vom Idealzustand vor. Unregelmäßigkeiten beim Abtragsprozess können dazu führen, dass der Abtrag an verschiedenen Stellen tiefer ausfällt als an anderen. Gründe dafür können beispielsweise Leistungsschwankungen, Ungenauigkeiten bei der Positionierung des Strahls auf dem Werkstück oder Inhomogenitäten bei der Energieeinkopplung sein. Bei ungünstigen Bedingungen können ausgeprägte Vertiefungen im Strukturgrund auftreten, an denen sich die Einkoppelbedingungen in Folge erst recht ändern. In Bild 3.12 ist dargestellt, wie sich die Reflexionsbedingungen in einer Vertiefung mit zunehmender Tiefe ändern. Nach (2.1) wird bei jedem Kontakt mit dem Werkstück ein Teil der Strahlung vom Material absorbiert, die verbliebene Energie wieder reflektiert. Solange die Vertiefung flach ist, wird die reflektierte Strahlung von der Werkstück-

oberfläche weg reflektiert. Überschreitet der Flankenwinkel einen bestimmten Wert, trifft die reflektierte Strahlung erneut auf Material, wo weitere Energie vom Werkstück absorbiert wird. Wird der Flankenwinkel der Vertiefung noch größer, tritt Mehrfachreflexion auf. Die Strahlung wird in der Vertiefung regelrecht gefangen und nach unten geleitet.

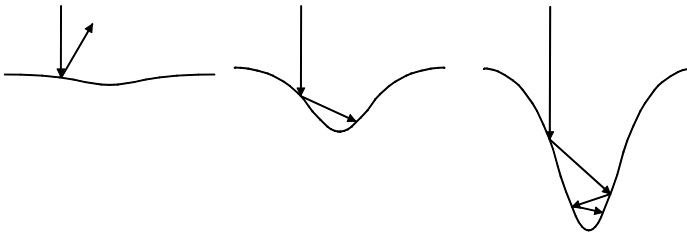


Bild 3.12: Prinzip der Mehrfachreflexion.

Dieser Vorgang wiederholt sich jedes Mal, wenn ein Laserpuls die Vertiefung trifft. Der zum Abtragen notwendige Pulsüberlapp führt dazu, dass eine Vertiefung im Strukturgrund bereits bei einfachem Abfahren der Struktur von mehreren Pulsen nacheinander getroffen wird. Aufgrund der dargestellten Vorgänge werden Vertiefungen, sobald sie einmal entstanden sind, stärker abgetragen als der umgebende Strukturgrund. Im Gegensatz beispielsweise zum mechanischen Fräsen ist der Laserabtragsprozess deshalb nicht in der Lage, entstandene Unregelmäßigkeiten wieder auszugleichen. Deshalb muss beim Laserabtragen von vornherein darauf geachtet werden, sich den Idealbedingungen möglichst weit anzunähern.

3.5 Probenaufbereitung

Die Experimente der vorliegenden Arbeit wurden auf Flachproben durchgeführt. Als Werkstoffe kamen verschiedene Stahllegierungen sowie Grauguss zum Einsatz. Diese Werkstoffe haben eine große Bedeutung für mögliche Anwendungen zum Laserstrukturieren. Die Zusammensetzung der eingesetzten Eisenwerkstoffe ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Element	Chem. Symbol	100 Cr 6 1.2067 (Kaltarbeitsstahl)	Ck 101 1.1274 (Federstahl)	GG 25 (Grauguss mit Lamellengraphit)
Kohlenstoff	C	0,95 - 1,1	0,95 - 1,05	3,5
Silizium	Si	0,15 - 0,35	0,15 - 0,35	3,3
Mangan	Mn	0,25 - 0,45	0,4 - 0,6	0,6
Phosphor	P	$\leq 0,03$	$\leq 0,035$	1,3
Schwefel	S	$\leq 0,03$	$\leq 0,035$	0,08
Chrom	Cr	1,35 - 1,65	-	-

Tabelle 2: Zusammensetzung der eingesetzten Eisenwerkstoffe [54, 55].

Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass es bei den Abtragsergebnissen sowohl qualitativ als auch quantitativ nur zu geringfügigen Unterschieden zwischen den einzelnen Stahlsorten kommt. Selbst Grauguss verhält sich sehr ähnlich. Die dargestellten Ergebnisse können demnach auch auf andere Eisenwerkstoffe übertragen werden. Die quantitativen Werte können dabei geringfügig variieren, größere Abweichungen sind jedoch nicht zu erwarten.

Für die Auswertung der erzeugten Strukturen standen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Bei Näpfchenstrukturen wurden Tiefe und Durchmesser mit dem Lichtmikroskop vermessen. Bei dieser Methode wird eine Genauigkeit von etwa 1-2 μm erreicht. Für ausgewählte Strukturen kam das Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) zum Einsatz, damit konnte die Geometrie einzelner Näpfchen genau erfasst und vermessen werden.

Zur Vermessung von Nutenstrukturen wurden Querschliffe angefertigt. Dazu wurden die Proben senkrecht zur Nutlängsachse durchgesägt. Zum Schleifen wurden die Proben in Epoxidharz eingebettet, um den Schleifvorgang zu erleichtern sowie Kantenverrundung und Materialausbrüche zu reduzieren. Die Schnittkante wurde anschließend geschliffen und poliert. Durch Ätzen der polierten Fläche konnte das Materialgefüge sichtbar gemacht werden. Dadurch ist es möglich, Zonen von aufgeschmolzenem und wieder erstarrtem Material zu identifizieren und zu quantifizieren. Zur Vermessung

der Querschnitte wurden am Lichtmikroskop Bilder von den Querschnitten aufgenommen, die anschließend digitalisiert und mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware Optimas vermessen wurden.

Bei flächig abgetragenen Strukturen ist die Rauigkeit im Strukturgrund der abgetragenen Fläche ein Faktor zur Beurteilung der Abtragsqualität. Zur Vermessung der Rauigkeit standen zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Mit einem Tastschnittgerät vom Typ Perthometer S6 der Firma Mahr wurden mit einem mechanischen Messtaster ebene Schnitte der Werkstückoberfläche aufgenommen. Der eingesetzte Taster hat eine Tastspitze aus Diamant mit einem Spitzenwinkel von 90° und einem Spitzenradius von $5\text{ }\mu\text{m}$. Bedingt durch die Ausbildung der Tastspitze als Kugelfläche ist es nicht möglich, Strukturabmessungen unterhalb des Spitzenradius aufzulösen. Weiterhin ist es nicht möglich, Flanken zu erfassen, die zur Senkrechten einen Winkel von 45° oder weniger einnehmen. Mit diesem Messgerät wurde die gemittelte Rautiefe R_z nach DIN EN ISO 4288 ermittelt [56]. Die mit diesem Gerät gemessenen Rauigkeitswerte sind jeweils nur für eine bestimmte Schnittebene gültig, Sie variieren deshalb je nach Lage der Schnittebene. Um eine verlässliche Aussage über die Rauigkeit der gesamten Fläche treffen zu können, wurden für jede Struktur jeweils 5 Messungen in unterschiedlichen, parallelen Ebenen durchgeführt. Die Schnittebene wurde grundsätzlich quer zur Vorschubrichtung gewählt, in dieser Richtung tritt normalerweise die größere Rauigkeit auf. Die in der vorliegenden Arbeit angegebenen Messwerte stellen das arithmetische Mittel dar. Üblicherweise wurden Quadrate mit einer Kantenlänge von 2 mm abgetragen. Bei dieser Größe sind die Strukturen ausreichend groß, um eine verlässliche Beurteilung und Vermessung zu ermöglichen. Andererseits liegt die Bearbeitungszeit bei den verwendeten Bearbeitungsparametern noch in akzeptablen Größenordnungen, denn gerade beim Abtragen von flächigen Strukturen steigt die Bearbeitungszeit bei ungünstigen Bearbeitungsparametern stark an. Aufgrund der geringen Abmessungen der Strukturen konnte nicht die vorgesehene Messstrecke nach DIN EN ISO 4288 angewendet werden. Es wurde stattdessen immer die kleinste in der Norm vorgesehene Messstrecke verwendet, die bei $0,8\text{ mm}$ liegt. Die Messwerte sind deshalb untereinander ohne weiteres vergleichbar, weichen jedoch von normgerecht gemessenen Werten teilweise erheblich ab.

Als weiteres Messverfahren stand ein Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) zur Verfügung. Beim konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop wird ein kleiner Bereich der zu untersuchenden Werkstückoberfläche mit einem fokussierten Laserstrahl beleuchtet. Das reflektierte Streulicht wird mit einem Strahlteiler separiert und nach Durchquerung einer als Raumfilter wirkenden Lochblende von einem optischen Detektor erfasst.

Durch diese Abbildung wird erreicht, dass nur Probenbereiche detektiert werden, die in der Fokusebene liegen. Auf diese Weise ist es möglich, durch schichtweises Ab-scannen die Topografie der Probenoberfläche zu erfassen. Mit dem verwendeten Gerät ist eine laterale Auflösung von ca. $0,3\text{ }\mu\text{m}$ und eine vertikale Auflösung von etwa $0,1\text{ }\mu\text{m}$ erreichbar. Aus dem gewonnenen Datensatz kann die Oberfläche nachgebildet und vermessen werden. Neben Längen, Flächen und Volumen ist es auch möglich, die Oberflächenrauigkeit zu bestimmen. In Hinblick auf vergleichbare Messwerte wurde die Rauigkeit wie beim mechanischen Tastschnittverfahren rechnerisch längs einer Linie bestimmt.

Für eine objektive Beurteilung ist ein Vergleich der beiden Messmethoden, die in Bild 3.13 einander gegenübergestellt sind, notwendig. Es fällt auf, dass die Messung mit dem LSM grundsätzlich eine größere Rauigkeit ergibt als die Messung mit dem mechanischen Tastschnittgerät. Dies ist durch die Tatsache bedingt, dass die Tastspitze des mechanischen Messtasters aus geometrischen Gründen sehr kleinen Vertiefungen nicht folgen kann und deshalb eine gewisse Glättung der Messwerte erfolgt. Der Laserstrahl des LSM kann hingegen auch kleineren Vertiefungen folgen, was zu höheren Rauheitswerten führt. In Bild 3.13 und Bild 3.14 sind die Rauigkeitsmesswerte für unterschiedliche Pulsdauern bzw. eine zunehmende Anzahl von Überfahrten dargestellt.

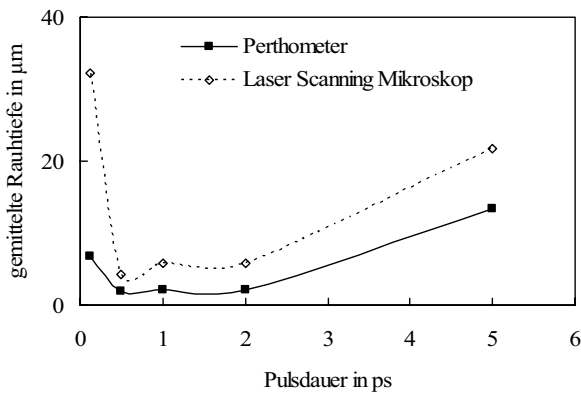


Bild 3.13: Vergleich von Rauigkeitsmessverfahren. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm^2 , Vorschub: 900 mm/min, Bahnversatz: $15\text{ }\mu\text{m}$, 40 Überfahrten, Material: Ck 101.

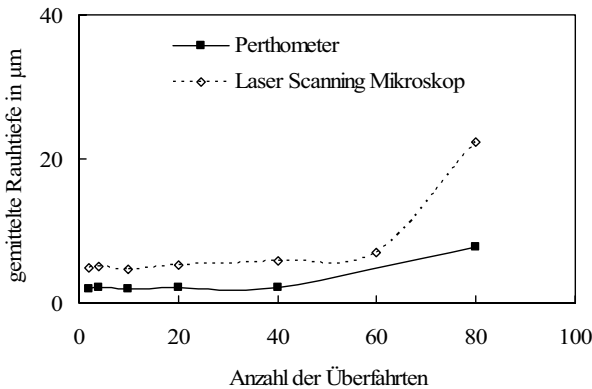


Bild 3.14: Vergleich von Rauigkeitsmessverfahren. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 1 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm², Vorschub: 900 mm/min, Bahnversatz: 15 µm, Material: Ck 101.

Auffällig ist die starke Zunahme der Messwerte für die LSM-Messung bei größeren Rauigkeiten.

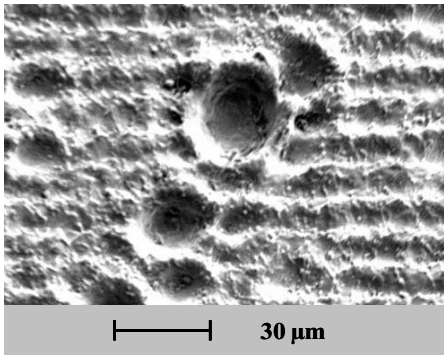


Bild 3.15: REM-Aufnahme der abgetragenen Oberfläche. Material: Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 5 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm², Vorschub: 900 mm/min, Bahnversatz: 15 µm, Material: Ck 101.

Bild 3.15 verdeutlicht, wie es zu diesen Abweichungen kommt. Bei diesen Bearbeitungsparametern bilden sich in der Oberfläche Unebenheiten aus, die vom mechanischen Messtaster im Gegensatz zum Laserstrahl des LSM nicht mehr exakt erfasst werden können.

Um eine ausreichende Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten, wurden in der vorliegenden Arbeit nur Rauigkeitswerte angegeben, die mit dem mechanischen Messverfahren gemessen wurden.

Aufgrund der weitaus besseren Verfügbarkeit des Messgerätes über die Dauer der Untersuchungen wurde das mechanische Verfahren gewählt, obwohl kleine Strukturdetails nicht erfassen werden konnten.

Im Anschluss an die rein geometrische Vermessung der Proben wurden von ausgewählten Strukturen Aufnahmen mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) angefertigt. Das REM bietet im Gegensatz zum Lichtmikroskop die Möglichkeit, Bilder mit hoher Tiefenschärfe auch bei Vergrößerungsfaktoren von 1000 und mehr aufzunehmen. Diese Bilder sind für eine Beurteilung der Bearbeitungsqualität sehr gut geeignet und sagen oft mehr über die Bearbeitungsvorgänge aus als reine Messdaten.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Einfluss verschiedener Prozessparameter

4.1.1 Pulsdauer

In experimentellen Untersuchungen wurde mehrfach gezeigt, dass Metalle mit Femtosekundenpulsen praktisch schmelzfrei abgetragen werden können [4, 5, 6, 57]. Theoretische Untersuchungen bestätigen eine Reduktion der Schmelze durch Verkürzung der Pulsdauer und lassen aber auch bei sehr kurzen Pulsdauern zumindest eine dünne Schmelzschicht erwarten. Gleichzeitig nimmt die Dicke der Schmelzschicht nach diesen Untersuchungen bei geringer Energiedichte stark ab. Im Experiment muss deshalb die Energiedichte stets berücksichtigt werden. Schmelze tritt beim Materialabtrag einerseits in Schichten von wiedererstartetem Material, andererseits als Grat an den Strukturkanten in Erscheinung. Für eine industrielle Anwendung haben Grate häufig eine größere Bedeutung als Schmelzschichten. Während Schmelzschichten normalerweise am Grundmaterial anhaften und damit weniger Nachteile für die Funktion darstellen, stören Grate, die über die Oberfläche herausragen, oft die Funktion. Aus diesem Grunde soll das Hauptaugenmerk der folgenden Betrachtungen den Graten gelten. Die Grathöhe lässt sich gut mit dem Tastschnittgerät bestimmen, indem quer zur Strukturkante gemessen wird. Für die Messung der absoluten Grathöhe sind die Nachteile des mechanischen Tastschnittverfahrens von untergeordneter Bedeutung. Zur Erlangung verlässlicher Werte wurde die Grathöhe jeweils an mindestens 5 Positionen gemessen und anschließend das arithmetische Mittel aus den Einzelwerten bestimmt. In Bild 4.1 ist die Grathöhe an der Kante von flächigen Strukturen, die mit unterschiedlichen Pulsdauern in Stahl abgetragen wurden, dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Strahlparameter der für diese Untersuchungen eingesetzten Lasersysteme konnten die Parameter nicht direkt übernommen werden. Die geometrischen Bearbeitungsparameter Vorschub und Bahnversatz wurden für jedes Lasersystem auf minimale Rauigkeit und Gratbildung optimiert. Dieses Vorgehen führte zu unter-

schiedlichen Abtragstiefen pro Überfahrt. Die Anzahl der Überfahrten wurde deshalb jeweils so angepasst, dass bei allen Systemen Strukturen mit einer Tiefe von insgesamt $40\text{ }\mu\text{m}$ abgetragen wurden.

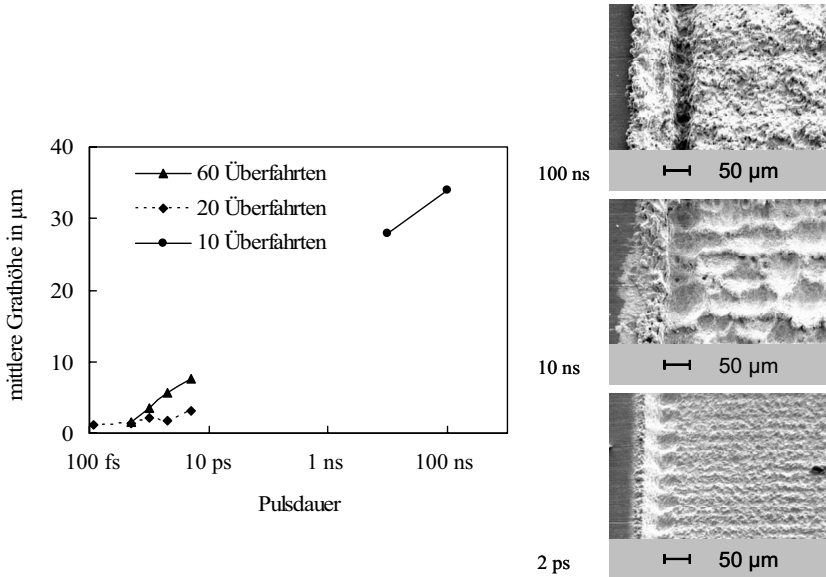


Bild 4.1: Grathöhe beim Abtragen von flächigen Strukturen mit unterschiedlichen Pulsdauern. Die Anzahl der Überfahrten ist auf eine mittlere Strukturtiefe von $40\text{ }\mu\text{m}$ angepasst. Energiedichte: 197 J/cm^2 , Material: Ck101.

Obwohl dadurch die Vergleichbarkeit der Werte eingeschränkt ist, ist deutlich zu erkennen, dass die Grathöhe zu kürzeren Pulsen hin stetig abnimmt. Gleichzeitig ist auf den REM-Aufnahmen in Bild 4.1 eine abnehmende Schmelzschichtdicke zu erkennen. Wie durch die theoretischen Untersuchungen vorausgesagt, ist bei diesen Versuchen auch bei der kürzesten Pulsdauer ein Grat sowie eine Schmelzschicht nachweisbar. Wird die Pulsenergie bis auf einen Wert knapp oberhalb der Abtragsschwelle reduziert, sind hingegen keine Spuren von Schmelze nachweisbar. In Bild 4.2 sind Nuten dargestellt, die mit einer Energiedichte von 4 J/cm^2 abgetragen wurden. Bei keiner der Nuten sind Anzeichen für das Entstehen von Schmelze zu finden; die Strukturkanten sind relativ scharfkantig. Dagegen ist an den Strukturflanken eine nicht ganz regelmäßige Wellenstruktur erkennbar. Solche Strukturen sind typisch für das Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen und können bei den meisten Werkstoffen beobachtet werden. Die Entstehung dieser so genannten Ripples wurde bisher hauptsächlich Inhomogeni-

täten in der Leistungsdichteverteilung aufgrund von Interferenzeffekten zugeschrieben. Untersuchungen aus jüngerer Zeit deuten hingegen auf das regelrechte Anwachsen dieser Nanostrukturen aus abgetragenen Material durch kohäsive Kräfte hin. Durch selbstorganisierende Effekte entstehen quasi-regelmäßige Strukturen, wobei Größe und Abstand der Strukturen mit zunehmender Energie größer werden [58]. Die Bilder zeigen außerdem, dass die Pulsdauer im dargestellten Bereich keinen Einfluss auf das Vorhandensein von Schmelzeablagerungen hat. Auch bei einer Pulsdauer von 5 ps konnten keine Anzeichen von Schmelze entdeckt werden.

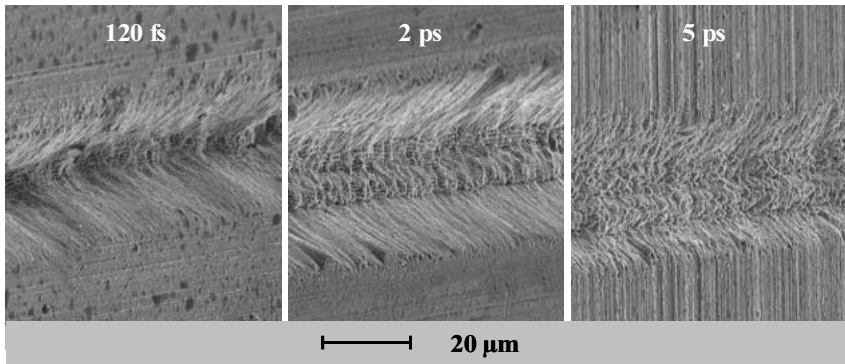


Bild 4.2: Vergleich des Nutenabtrags bei unterschiedlichen Pulsdauern. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 2 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, Vorschub: 0,3 mm/min, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Die Laserstrukturierung von Grauguss ist unter anderem im Motorenbau von industrieller Bedeutung. Die Nuten in Grauguss in Bild 4.3 sind mit den selben Parametern wie die Nuten in Bild 4.2 abgetragen worden.

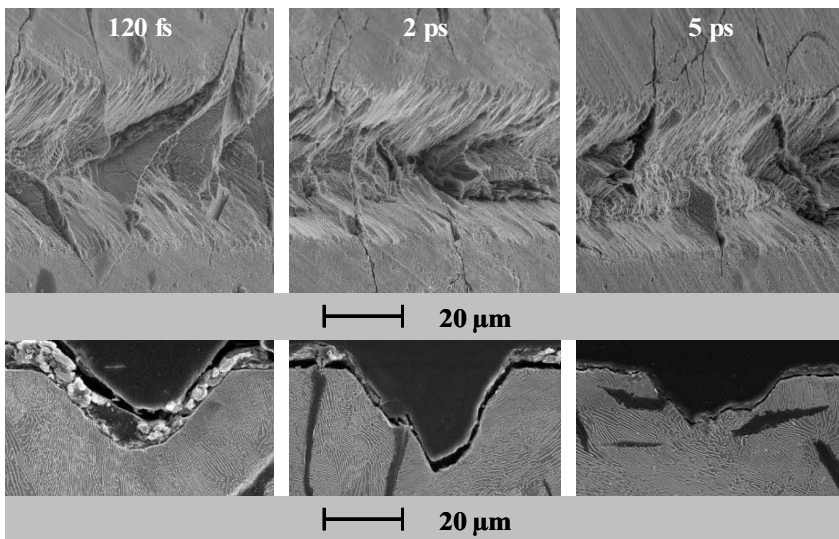


Bild 4.3: Vergleich des Nutenabtrags bei unterschiedlichen Pulsdauern. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 2 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Vorschub: 0,3 mm/min, 1 Überfahrt, Material: GG25.

Wie bei Stahl sind bei der Strukturierung von Grauguss keine Anzeichen von Schmelzeablagerungen zu erkennen. Der Nutgrund ist allerdings weniger gleichmäßig ausgebildet als bei Stahl, was hauptsächlich darauf zurückzuführen ist, dass die Graphitlamellen des Gusswerkstoffs freigelegt wurden. Entgegen den Vermutungen in früheren Veröffentlichungen, die Materialeigenschaften würden bei ultrakurzen Pulsen keine Rolle mehr spielen, wird das Graphit in geringerem Maße abgetragen, als der umgebende Eisenwerkstoff.

Um den Einfluss der Pulsdauer auf die Abtragsrate zu untersuchen, wurden flächige Strukturen abgetragen und ausgemessen. Bild 4.4 zeigt die Abtragstiefe sowie die Rauigkeit des Strukturgrundes beim Abtragen von Taschen. Die Abtragstiefe nimmt zu kurzen Pulsdauern hin stetig zu, was sich über die zunehmende Pulsspitzenleistung erklären lässt.

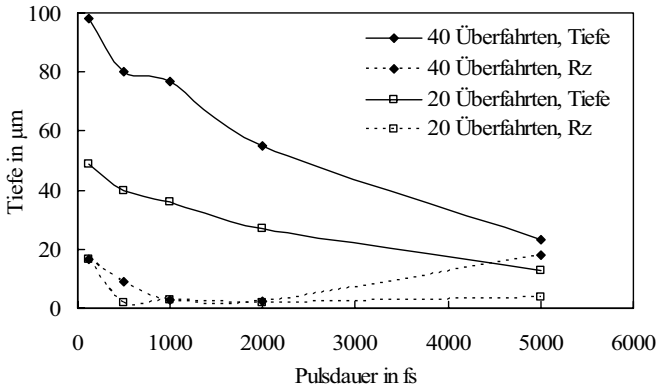


Bild 4.4: Vergleich von Strukturtiefe und Rauigkeit beim Abtrag flächiger Strukturen. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 256 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm , Vorschub: 900 mm/min, Bahnversatz: 15 μm , Material: Ck 101.

Die Rauigkeit des Strukturgrundes zeigt bei einer Pulsdauer von etwa 1–2 ps ein Minimum. Grund dafür sind zahlreiche lochartige Vertiefungen im Strukturgrund, die vorrangig bei kürzeren und längeren Pulsdauern auftreten. Zur Verdeutlichung sind in Bild 4.5 REM-Aufnahmen von ausgewählten Strukturen dargestellt. Außerhalb dieser Vertiefungen ist der Strukturgrund unabhängig von der Pulsdauer relativ glatt. Zu längeren Pulsdauern hin nimmt die Rauigkeit des Strukturgrundes und die Zahl der Vertiefungen zu. Die Entstehung der lochartigen Vertiefungen wird in Kapitel 4.1.3 näher erläutert.

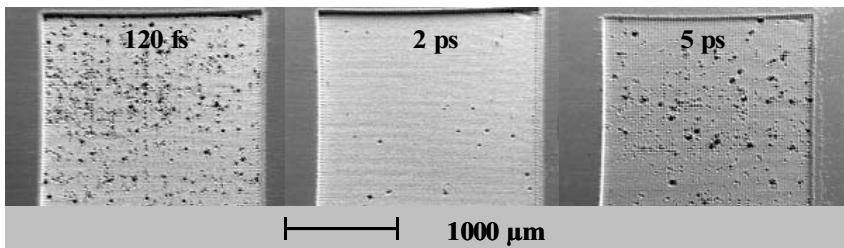


Bild 4.5: Vergleich der Pulsdauer beim Abtragen flächiger Strukturen. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm , Vorschub: 900 mm/min, Bahnversatz: 15 μm , 40 Überfahrten, Material: Ck 101.

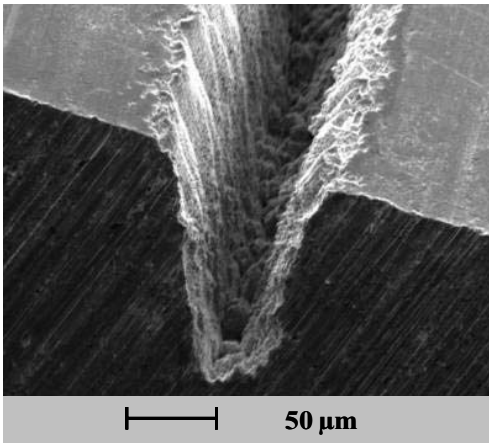


Bild 4.6: Nut in Grauguss. Wellenlänge: 1064 nm, Pulsdauer: 10 ps, Energiedichte: 5 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, Vorschub: 12 mm/min, 1 Überfahrt, Material: GG25.

Die Versuche zeigen, dass auch bei einer Pulsdauer von 5 ps eine schmelzfreie Bearbeitung der untersuchten Werkstoffe möglich ist. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden Experimente mit einer Pulsdauer von bis zu 10 ps durchgeführt. Bild 4.6 macht deutlich, dass auch mit einer Pulsdauer von 10 ps eine Bearbeitung möglich ist, die keine Anzeichen von Schmelze zeigt. Dabei ist jedoch eine geringfügig reduzierte Qualität und eine geringere Abtragsrate in Kauf zu nehmen.

4.1.2 Energiedichte

Bei der Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen können zwei grundsätzlich verschiedene Energiedichteregime beobachtet werden. Bei der Bearbeitung mit hoher Energiedichte entsteht eine Schmelzschicht mit einer Dicke von wenigen μm. An den Strukturkanten lagert sich wiedererstartete Schmelze in Form von Graten an. Wird die Energiedichte auf einen Wert knapp oberhalb der Abtragschwelle reduziert, ist ein Abtrag möglich, der keine Anzeichen von Schmelzschichten oder Graten zeigt. In Bild 4.7 sind zwei Nuten gegenübergestellt, die mit Laserpuls in den entsprechenden Energiedichteregimes abgetragen wurden.

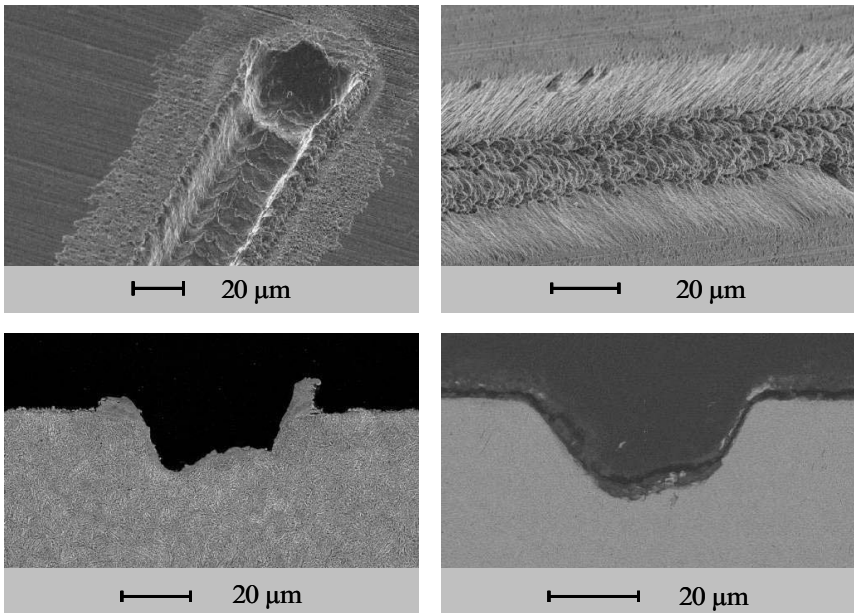


Bild 4.7: Nuten in Stahl. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 2 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 175 J/cm² (links), 4 J/cm² (rechts), Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, 1 Überfahrt, Material: Stahl.

Die Nut im linken Bild wurde mit einer Pulsenergie von 175 J/cm² strukturiert. Das schmelzflüssige Material wurde an den Nutflanken nach oben getrieben und ist teilweise als Grat oberhalb der Nutkante erstarrt. Innerhalb der Nut ist eine Schicht aus wiedererstarrender Schmelze mit einer Dicke von wenigen µm an der Struktur von erstarrtem Schmelzfluss zu erkennen. In der unmittelbaren Umgebung der Nut sind Rückstände von ablatiertem Material auf der Werkstückoberfläche erkennbar. Dagegen zeigt die im rechten Bild dargestellte Nut, die bei einer Energiedichte von 4 J/cm² strukturiert wurde, keine Anzeichen von Schmelze. Die Kante ist frei von Graten und die Nutflanken zeigen keine Anzeichen von Schmelzfluss. Im Querschnitt konnte keine wiedererstarrende Schmelze gefunden werden. Ob eine Schmelzschicht mit einer Dicke im Nanometerbereich vorhanden ist, konnte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Eine solch dünne Schmelzschicht wäre für eine mögliche Anwendung jedoch weitgehend irrelevant. In den folgenden Ausführungen wird deshalb von Schmelzfreiheit ausgegangen, wenn keine Schmelzschicht nachweisbar ist.

Bild 4.8 zeigt Nuten, die mit zunehmender Energiedichte oberhalb der Abtragsschwelle abgetragen wurden. Bei diesen Versuchen wurde die Vorschubgeschwindigkeit so eingestellt, dass eine konstante Nuttiefe erreicht wurde. Dabei ist zu beachten, dass die Energiedichte über den Strahlquerschnitt näherungsweise eine gaussförmige Verteilung aufweist und deshalb im Zentrum des Strahlprofils am höchsten ist.

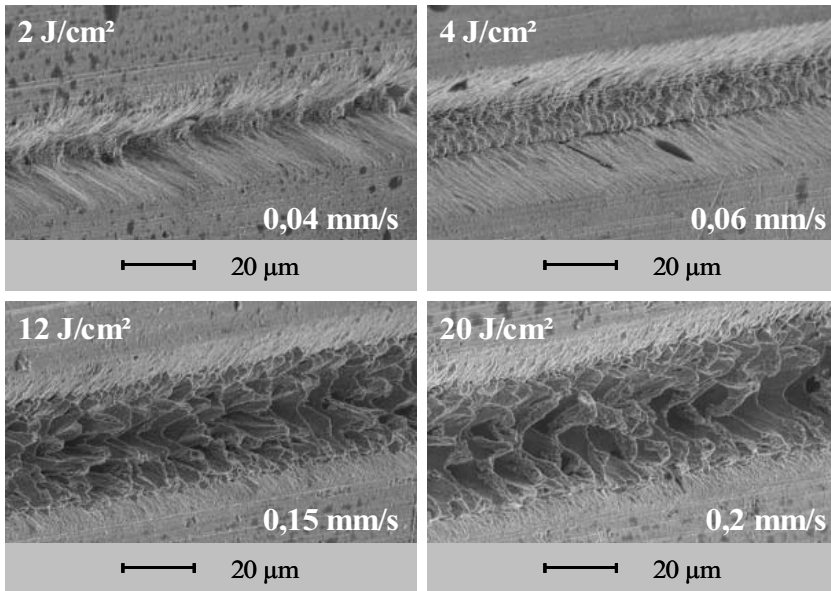


Bild 4.8: Nuten in Stahl. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 2 J/cm² (links oben), 4 J/cm² (rechts oben), 12 J/cm² (links unten) und 20 J/cm² (rechts unten), Vorschubgeschwindigkeit: 0,04 mm/s (links oben), 0,06 mm/s (rechts oben), 0,15 mm/s (links unten) und 0,2 mm/s (rechts unten), Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Bei einer Energiedichte von 2-4 J/cm² sind keine Anzeichen von Schmelze zu erkennen. Der Nutquerschnitt ist bei 4 J/cm² deutlich größer, was sich mit der höheren Energiedichte klar erklären lässt. Bei einer Energiedichte von ≥ 12 J/cm² sind im Zentrum der Nut bereits deutliche Anzeichen von Schmelze erkennbar, was darauf hindeutet, dass die Energiedichte im Zentrum der Nut für eine schmelzfreie Bearbeitung zu hoch ist. In diesem Bereich nimmt die Nuttiefe auch bei zunehmender Energiedichte nicht mehr zu, stattdessen nimmt die Unregelmäßigkeit zu. Die Ränder der Struktur zeigen auch bei höheren Energiedichten Schmelzfreiheit, da in diesem Be-

reich die Energiedichte noch unterhalb der kritischen Schwelle liegt. Außerhalb der Nut sind ab 12 J/cm^2 Materialablagerungen erkennbar.

Für eine industrielle Umsetzung des Verfahrens ist abgesehen von der Qualität auch die Geschwindigkeit des Abtrags relevant. Die Nuttiefe wurde durch Schliffe quer zur Nutachse bestimmt. Bei stark unregelmäßigen Strukturen wie z.B. in den unteren Bildern von Bild 4.8 wurde die Nuttiefe an der jeweils tiefsten Stelle gemessen. In Bild 4.9 ist die Nuttiefe in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit für niedrige Energiedichte dargestellt. Eine typische Abtragstiefe in der Größenordnung von 10 bis $20 \mu\text{m}$ wird bei einer Vorschubgeschwindigkeit von wenigen mm/min erreicht.

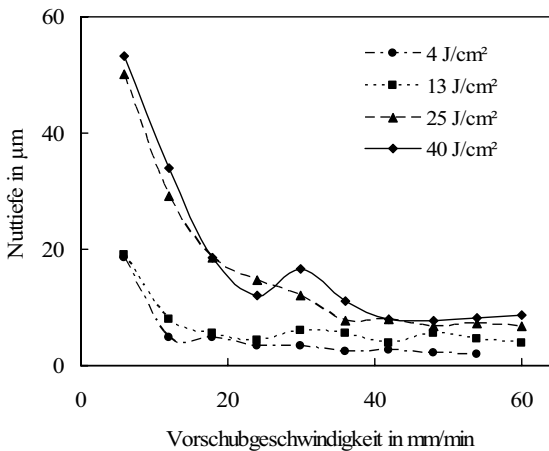


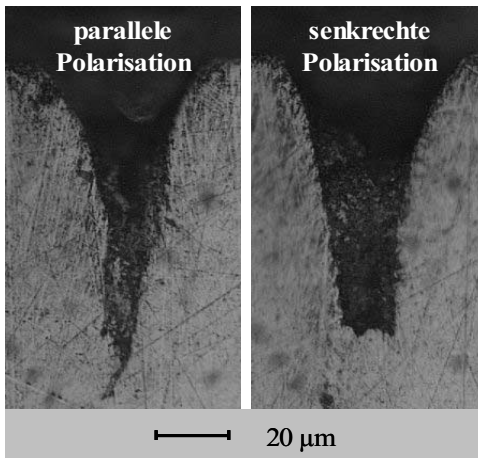
Bild 4.9: Nuttiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei Einzelüberfahrten. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 2 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Strahlfleckdurchmesser: 18 μm , 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Zum Vergleich sei erwähnt, dass die Abtragsrate industrieller Anwendungen mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich etwa drei Größenordnungen höher liegt.

4.1.3 Pulsüberlapp

Der Abtrag mehrdimensionaler Strukturen kommt im hier angewandten Direktschreibverfahren dadurch zustande, dass der Laserstrahl die abzutragende Struktur Bahn für Bahn abfährt. In Kapitel 3.4 wurden bereits die theoretischen Zusammenhänge beim Abtragen von Nuten betrachtet. Danach ist zu erwarten, dass die Nut bei Polarisation parallel zur Vorschubrichtung schmaler und tiefer ausfällt, als bei Polarisation senkrecht zur Vorschubrichtung. Die beiden in Bild 4.10 gezeigten Nutquerschnitte bestätigen diese theoretischen Überlegungen. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Nuten

mit Material angefüllt sind, welches nicht aus der Nut ausgetrieben wurde.



Ein einfacher Ansatz zur Erhöhung der Nuttiefe ist die Erhöhung des Pulsüberlapps durch Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit. Dieser Ansatz ist beim Nutenstrukturieren jedoch nur bis zu einem gewissen Grad erfolgreich. Bei höheren Aspektverhältnissen wird die Nut auch bei weiterer Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit nicht tiefer, der Nutgrund wird jedoch zunehmend unregelmäßig und ist mit Material angefüllt. Bild 4.11 zeigt eine Nut, die bewusst mit sehr geringer Vorschubgeschwindigkeit abgetragen wurde.

Bild 4.10: Nutquerschnitt bei unterschiedlicher Orientierung der Polarisation. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 5 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Vorschub: 0,6 mm/min, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

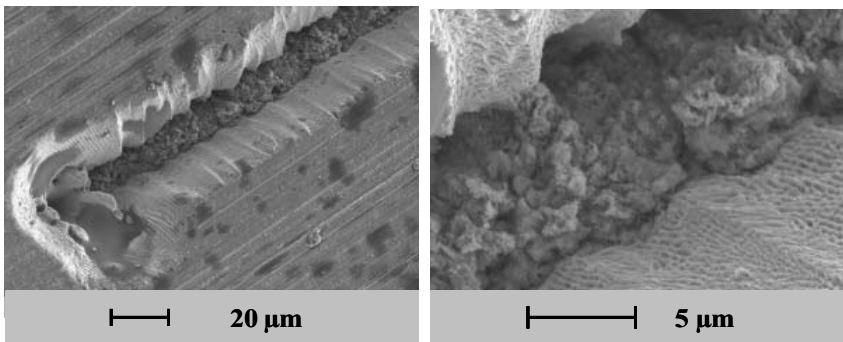


Bild 4.11: Typische Nut bei sehr langsamer Vorschubgeschwindigkeit. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 2 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Vorschub: 0,3 mm/min, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Um die Zusammensetzung des Materials zu untersuchen wurden EDX-Messungen der Materialzusammensetzung gemacht. In Bild 4.12 ist ein Querschnitt der in Bild 4.11 dargestellten Nut sowie EDX-Spektren für das Material im Strukturgrund und für das Grundmaterial dargestellt.

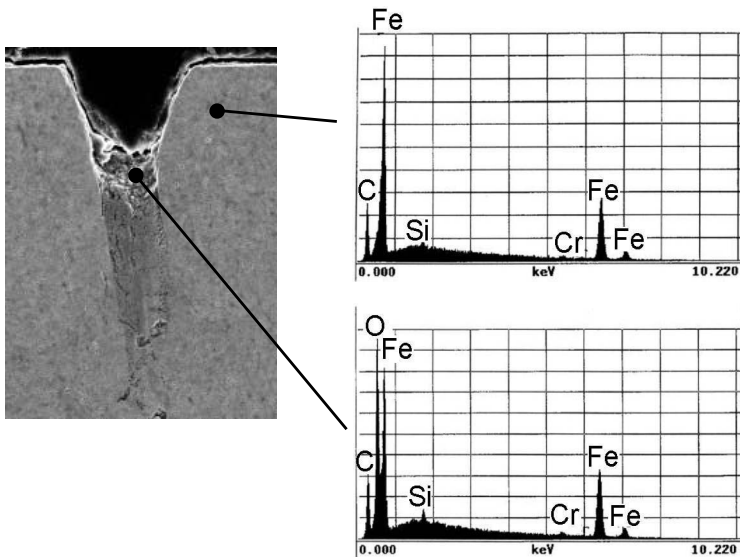


Bild 4.12: Chemische Zusammensetzung in der Nut. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 2 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μ m, Vorschub: 0,3 mm/min, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Im Vergleich zum Grundmaterial ist im redeponierten Material eine deutliche Erhöhung des O₂-Anteils zu erkennen. Das deutet auf eine Oxidation des Materials mit dem Sauerstoff aus der Umgebungsatmosphäre hin. Ein Grund dafür ist die Tatsache, dass bei hohem Pulsüberlapp eine relativ große Anzahl von Laserpulsen bereits abgetragenes und nicht ausgetriebenes Material trifft. Teilweise bereits wiedererstartete Schmelze wird so erneut aufgeschmolzen und hat wiederholt Gelegenheit zu oxidieren.

Ein weiteres Problem beim Abtragen tiefer Nuten ist das Auftreten von Mehrfachreflexionen ab einem Einlaufwinkel von etwa 45°. Bei den in Bild 3.11 dargestellten Verhältnissen ist dies ab einer Nuttiefe von etwa 20 μ m der Fall. Ab diesem Winkel trifft der reflektierte Anteil der Strahlung, wie in Bild 4.13 abgebildet, wieder auf das Material, wo erneut ein Materialabtrag stattfindet.

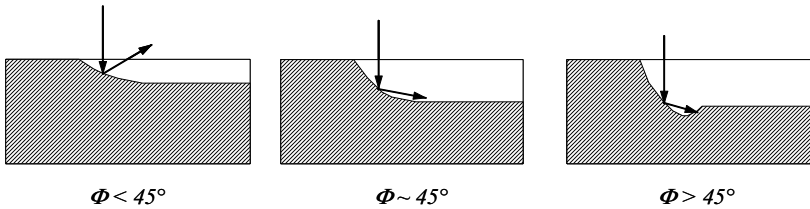


Bild 4.13: Schematische Darstellung der Reflexion an der Abtragsfront.

Unter ungünstigen Umständen kann sich, wie im rechten Bild skizziert, hinter der Abtragsfront eine Vertiefung bilden, in der die Strahlung erneut reflektiert wird. Die reflektierte Strahlung wird sozusagen in der Vertiefung gefangen und trägt durch Mehrfachreflexion zum weiteren Abtrag innerhalb der Vertiefung bei. Der hohe Pulsüberlapp sorgt dafür, dass auch

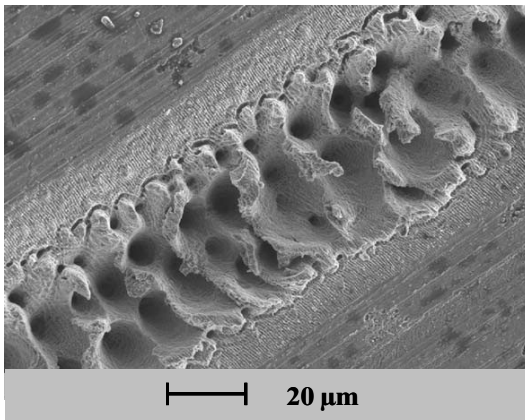


Bild 4.14: Bildung von Vertiefungen anstelle einer durchgängigen Nut bei sehr hohem Pulsüberlapp. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 20 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Vorschub: 1,8 mm/min, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

ein Teil der Energie von nachfolgenden Pulsen in die entstandene Vertiefung reflektiert wird und dazu beiträgt, diese weiter zu vergrößern. In ungünstigen Fällen bildet sich anstelle einer durchgehenden Nut eine Reihe von einzelnen Vertiefungen aus, wie in Bild 4.14 beispielhaft dargestellt. Da die Ausbildung der Ablationsfront während dem Abtragsvorgang gewissen Schwankungen unterworfen ist, wird die Verteilung der entstehenden Vertiefungen innerhalb der Nut von statistischen Vorgängen bestimmt. Liegt die

Energiedichte in der Nähe der Schwelle zum thermisch bestimmten Abtrag, kann es in Folge der Mehrfachreflexionen lokal zum Überschreiten dieser Schwelle kommen. Aus diesem Grund sind in der Umgebung der Vertiefungen teilweise Spuren von Schmelzfluss bzw. Schmelzschichten nachweisbar.

Zu Mehrfachreflexionen kann es auch bei geringeren Abtragstiefen kommen, wenn aus anderen Gründen lokal steile Materialflanken entstehen, wie in Bild 4.15 illustriert. In diesem Fall werden die im Grauguss eingelagerten Graphitlamellen weniger stark abgetragen, als das umgebende Metall. Dadurch kommt es an den Graphitflanken zur Reflexion von Laserstrahlung in das umliegende Material. Aufgrund des hohen Pulsüberlapps werden die entstandenen Unregelmäßigkeiten schnell größer.

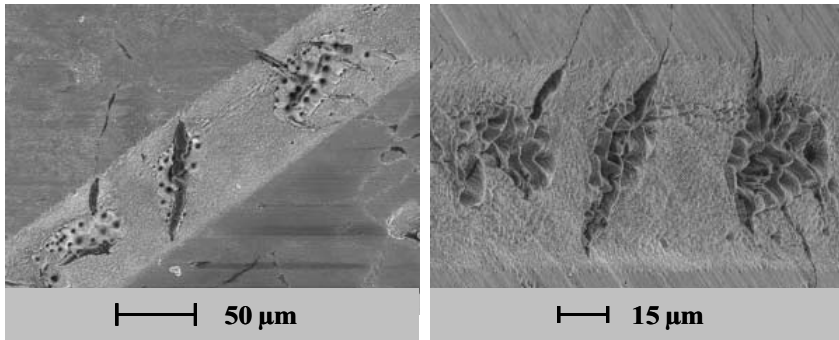


Bild 4.15: Einfluss von Graphitlamellen auf den Abtrag von Grauguss. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 5 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 16 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Vorschub: 18 mm/min, 1 Überfahrt, Material: GG 25.

In der Umgebung der Graphitlamellen entstehen Ansammlungen von Vertiefungen. Beim Betrachten der Aufnahme sind in der Umgebung der Vertiefungen Spuren von Schmelzfluss zu erkennen, während die Nut ansonsten keine Anzeichen von Schmelze zeigt. Die dargestellte lokal begrenzte Ansammlung von Vertiefungen tritt nur in einem eng begrenzten Parameterfenster auf. Bei ungünstigeren Bedingungen sind die Vertiefungen gleichmäßig in der Nut verteilt.

Bisher wurde die Strukturierung von Nuten durch eindimensionale Vorschubbewegungen betrachtet. Beim Abtragen dreidimensionaler Strukturen werden die Vorgänge komplexer. Diese Strukturen werden in parallelen Bahnen abgetragen, wobei der Spurabstand als Verfahrensparameter hinzukommt. Neben der Grathöhe und der Schmelzschichtdicke stellt die Rauigkeit der abgetragenen Fläche ein weiteres einfach messbares Merkmal zur Beurteilung der Bearbeitungsqualität dar. Beim Abtragen flächiger Strukturen gibt es einen optimalen Pulsversatz, bei dem eine minimale Rauigkeit der abgetragenen Fläche erreicht wird. Für die folgenden Versuche wurden Vorschubgeschwindigkeit und Bahnversatz so aufeinander abgestimmt, dass der Pulsüberlapp in Vorschubrichtung mit dem Bahnversatz identisch war. Bild 4.16 zeigt Abtrags-

tiefe, gemittelte Rautiefe und Abtragsrate für zunehmenden Pulsversatz bei niedriger Pulsenergie, in Bild 4.17 ist der dazugehörige Strukturgrund für ausgewählte Punkte dargestellt. Die Abtragstiefe ist bei dieser Energie sehr gering. Um dennoch Abtragstiefen zu erhalten, die mit den nachfolgenden Versuchen vergleichbar sind, wurden die Strukturen für diese Versuchsreihe mit 25 Überfahrten strukturiert.

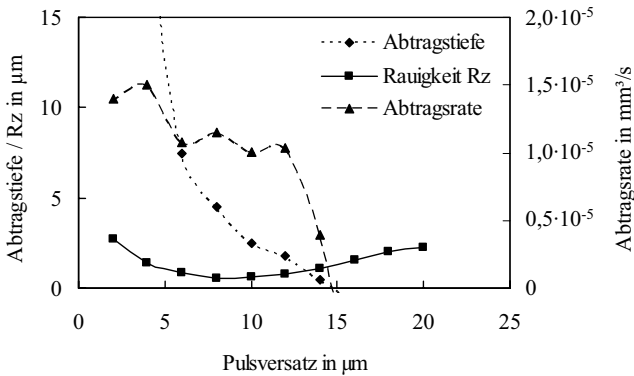


Bild 4.16: Abtragstiefe, gemittelte Rautiefe und Abtragsrate für unterschiedlichen Pulsüberlapp. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 8 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm , 25 Überfahrten. Material: 100 Cr 6.

In den vorliegenden Versuchen wird die Rauigkeit bei einem Pulsversatz von etwa 8 bis 10 μm minimal. Bei einem größeren Pulsversatz werden die einzelnen Pulse erkennbar, wie in Bild 4.17 (rechts) zu sehen ist. Gleichzeitig nimmt die Abtragstiefe ab, bis schließlich kein messbarer Abtrag mehr stattfindet. Ab einem Pulsabstand von etwa 15 μm besteht die Oberfläche nur noch aus nebeneinander liegenden Abtragskratern, zwischen denen das Material stehen bleibt. Die Abtragsrate fällt in diesem Bereich steil ab. In der anderen Richtung, zu geringerem Pulsversatz hin, nehmen Abtragstiefe und Rauigkeit bedingt durch den hohen Pulsüberlapp zu. Zu geringerem Pulsversatz hin steigt die Abtragsrate nur noch wenig an. Der Grund liegt im starken Abstieg der Bearbeitungszeit, die umgekehrt proportional zum Quadrat des Pulsversatzes ansteigt. Aus Gründen der Effizienz ist es also nicht unbedingt notwendig, den Pulsüberlapp sehr gering zu wählen.

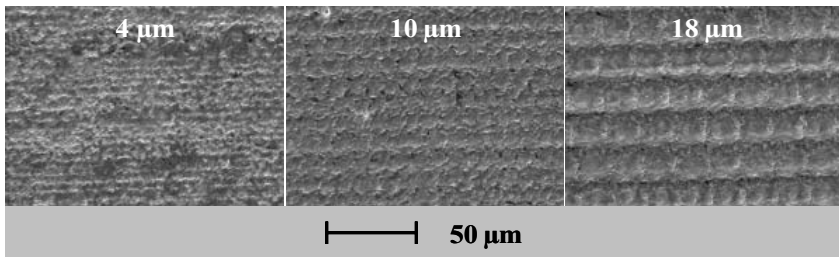


Bild 4.17: Bilder des Strukturgrunds beim Abtragen mit unterschiedlichem Pulsversatz. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 8 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, 25 Überfahrten. Material: 100 Cr 6.

Bei hoher Pulsenergie treten prinzipiell die selben Effekte auf, sind aber teilweise unterschiedlich ausgeprägt. Dies zeigt sich in Bild 4.18, wo zum Vergleich die selben Werte wie oben für eine hohe Energiedichte dargestellt sind. Bild 4.19 zeigt den zugehörigen Strukturgrund.

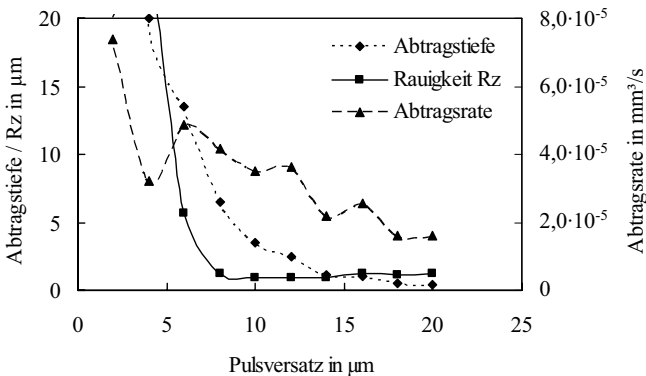


Bild 4.18: Abtragtiefe, gemittelte Rautiefe und Abtragsrate für unterschiedlichen Pulsüberlapp. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Auffällig ist der starke Anstieg der Rautiefe zu geringem Pulsversatz hin. Bei hoher Energiedichte tritt der bereits beim Nutzenstrukturieren beschriebene Effekt der Mehrfachreflexion in den Vordergrund und führt bei zu geringem Pulsversatz zu extrem unregelmäßigen Oberflächen, wie in Bild 4.19 ganz links dargestellt ist. Bei ausrei-

chendem Pulsversatz ist hingegen auch bei hoher Energiedichte ein glatter Abtrag möglich. Im mittleren und rechten Bild ist außerdem zu erkennen, dass wellenförmige Strukturen entstehen, die auf eine Schmelzschicht hindeuten.

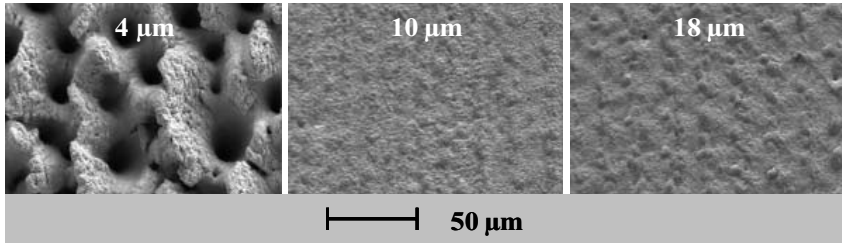


Bild 4.19: Bilder des Strukturgrunds beim Abtragen mit unterschiedlichem Pulsversatz. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Der Vergleich von Bild 4.16 und Bild 4.18 lässt erkennen, dass das Minimum der Rauigkeit bei hoher Energiedichte etwas höher liegt. Das liegt daran, dass bei höherer Pulsenergie der Durchmesser des Bereichs des Strahlflecks, der oberhalb der zum Abtragen notwendigen Energiedichte liegt, größer ist. Aus diesem Grund geht die Abtragstiefe bei den Versuchen mit hoher Energiedichte im betrachteten Bereich nicht auf null zurück. Zusammenfassend zeigt sich, dass der Pulsversatz in einem bestimmten Bereich ein Optimum erreicht. Bei niedriger Pulsenergie kann auch außerhalb dieses Optimums ein akzeptabler Abtrag stattfinden, während bei hoher Energiedichte ein Abweichen vom Optimum teilweise extreme Auswirkungen hat. Der optimale Pulsversatz ist vom Strahlfleckdurchmesser abhängig und liegt im vorliegenden Fall bei etwa 8-10 µm, was einem Pulsüberlapp von etwa 45 – 55 % entspricht. Dies bestätigt zahlreiche andere Versuchen, in denen sich gezeigt hat, dass der optimale Überlapp in Bezug auf die Rauigkeit im Strukturgrund in der Größenordnung von 40 – 70 % liegt.

4.1.4 Multipass-Abtragen

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel dargestellt, sind dem Aspektverhältnis einer Nut Grenzen gesetzt. Bei Einzelüberfahrten ist es nur bis zu einem gewissen Grad möglich, die Tiefe der Nut durch Verringern der Vorschubgeschwindigkeit zu erhöhen. Eine Möglichkeit, zu höheren Aspektverhältnissen zu kommen, ist das sogenannte Multipass-Abtragen. Bei dieser Verfahrenstrategie wird die Struktur mit höherer Vorschubgeschwindigkeit, dafür aber mehrfach abgefahren. Wird die Vorschubgeschwin-

digkeit proportional zur Anzahl der Überfahrten z erhöht, bleibt die effektive Bearbeitungsgeschwindigkeit

$$v_{\text{eff}} = \frac{v}{z} \quad (4.1)$$

rein rechnerisch konstant. Aufgrund von Nebenzeiten, die notwendig sind, den Laserstrahl an den Ausgangspunkt der nachfolgenden Bahn zu positionieren, steigt die tatsächliche Bearbeitungszeit jedoch mit der Anzahl der Überfahrten an. Die Nebenzeit ist sehr stark von der eingesetzten Systemtechnik und der gewählten Verfahrenstrategie abhängig, ist aber normalerweise gering im Vergleich zur der Zeit, in der der eigentliche Abtrag stattfindet. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde die Sprungzeit in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Auch beim Multipass-Abtragen sind die Verhältnisse für niedrige und für hohe Energiedichte unterschiedlich. Zunächst sollen die Verhältnisse bei hoher Energiedichte betrachtet werden. Die Daten in Bild 4.20 zeigen die Nuttiefe und die Querschnittsfläche von Nuten, die mit einer unterschiedlichen Anzahl von Überfahrten abgetragen wurden. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde dabei so gewählt, dass die effektive Geschwindigkeit konstant blieb.

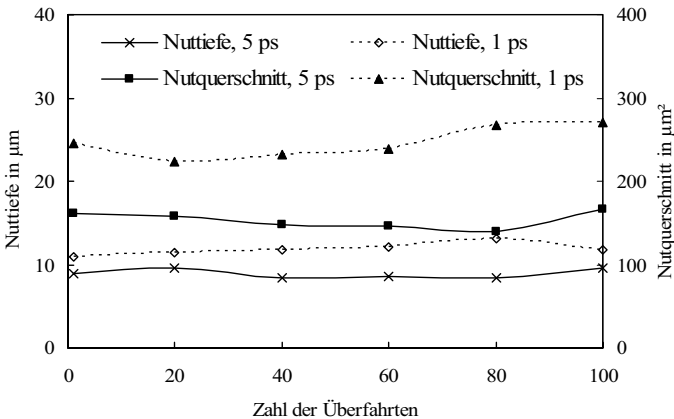


Bild 4.20: Nuttiefe und Nutquerschnitt bei einer unterschiedlichen Anzahl von Überfahrten. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 118 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, effektiver Vorschub: 60 mm/min, Material: GG25.

Es ist zu erkennen, dass sowohl Nutquerschnitt als auch Nuttiefe weitgehend unabhängig von der Zahl der Überfahrten sind. Wesentlicher Faktor für das quantitative Abtragsverhalten ist die effektive Geschwindigkeit. Weiterhin ist zu erkennen, dass Abtragstiefe und Nutquerschnitt bei der kürzeren Pulsdauer größer sind. Im Gegensatz zu den quantitativen Verhältnissen in Bild 4.20 offenbart die Betrachtung der Abtragsqualität deutliche Unterschiede. In Bild 4.21 sind Bilder von Querschnitten bzw. REM-Aufnahmen von Nuten zu sehen, die mit einer unterschiedlichen Zahl von Überfahrten strukturiert wurden. Der Austrieb der bei dieser Pulsenergie deutlich erkennbaren Schmelze zeigt ein unterschiedliches Verhalten. Wird die Nut mit einer einzigen Überfahrt strukturiert, verbleibt viel Schmelze in der Nut, nur ein Teil wird ausgetrieben. Wird die Nut dagegen bei gleicher effektiver Geschwindigkeit mit 40 Überfahrten strukturiert, wird ein großer Teil der Schmelze nach oben ausgetrieben und erstarrt als Grat an den Kanten der Nut. Bei 160 Überfahrten wird die Schmelze fast vollständig aus der Nut ausgetrieben, der Grat ist höher als bei 40 Überfahrten.

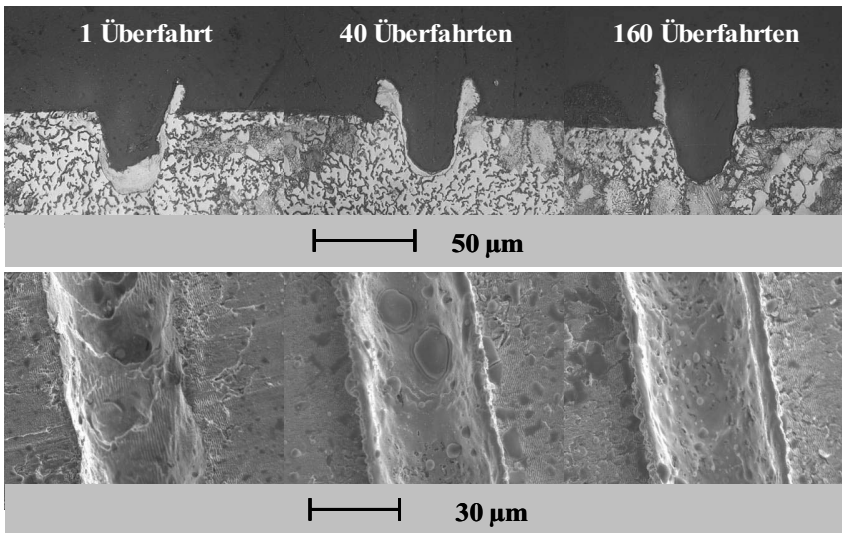


Bild 4.21: Nutquerschnitt bei unterschiedlicher Anzahl von Überfahrten. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 1 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 86,5 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, effektiver Vorschub: 30 mm/min, Material: GG25.

Grund dafür ist die Tatsache, dass bei mehrfachem Überfahren die Abtragstiefe einer einzelnen Überfahrt und damit die Dicke der Schmelzschicht aufgrund der höheren

Vorschubgeschwindigkeit wesentlich geringer ist. Durch das wiederholte Abfahren der Struktur wird die Schmelzschicht immer wieder abgetragen. Dabei wird das schmelzflüssige Material immer wieder nach oben aus der Nut ausgetrieben, wo es sich an den Kanten der Nut als Grat ablagert, der bei jeder Überfahrt wächst. Wie in den beiden rechten Bildern von Bild 4.21 gut zu erkennen ist, ist der Grat bei der höheren Zahl der Überfahrten schmaler als bei der niedrigeren. Auch dies hängt mit dem geringeren Schmelzvolumen pro Abtragsschicht zusammen.

Für die folgende Darstellung wird näherungsweise angenommen, dass die Abtragstiefe beim Multipass-Abtragen mit konstantem effektivem Vorschub nicht von der Anzahl der Überfahrten abhängt. Unter diesen Bedingungen kann der in Bild 4.7 dargestellte Einlaufwinkel in Abhängigkeit der Zahl der Überfahrten bestimmt werden. Für Strahlfleckdurchmesser und Nuttiefe wurden typische Werte angenommen. Aus dem Einlaufwinkel wurde anschließend die Absorption für senkrechte und für parallele Polarisation berechnet (siehe Bild 4.22).

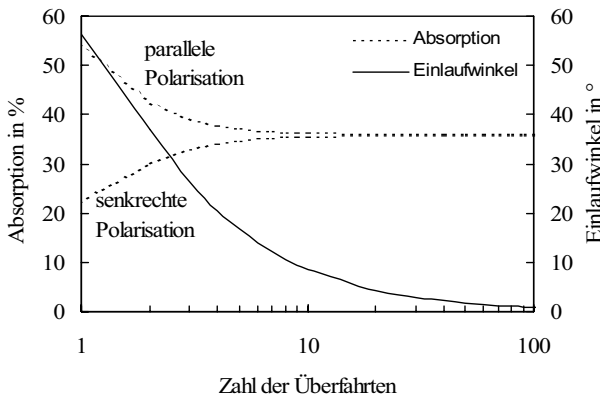


Bild 4.22: Berechnete Absorption in Abhängigkeit der Zahl der Überfahrten. Nuttiefe: 60 μm , Strahlfleckdurchmesser: 40 μm .

Die Absorption ist ab etwa 10 Überfahrten konstant. Bei weniger Überfahrten steigt die Absorption für parallele Polarisation an bzw. fällt für senkrechte Polarisation ab. Dies lässt für wenige Überfahrten eine Abhängigkeit der Nutgeometrie von der Polarisation erwarten, bei einer größeren Anzahl von Überfahrten sollte die Polarisation keinen Einfluss auf die Nutgeometrie haben. Es ist zu beachten, dass sich die Kurven für andere als die zugrunde liegenden Parameter entsprechend verschieben.

In Bild 4.23 sind Nutbreite und Nuttiefe beim Multipass-Abtragen mit unterschiedlicher Zahl der Überfahrten bei geringer Energiedichte aufgetragen. Die Kurve für senkrechte Polarisation zeigt eine qualitative Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Nuttiefe bei zunehmender Zahl der Überfahrten zunächst ansteigt. Ab etwa 100 Überfahrten nimmt die Nuttiefe auch bei einer weiteren Vergrößerung der Zahl der Überfahrten nicht mehr zu. Die Nutbreite verändert sich mit der Zahl der Überfahrten nur unwesentlich. Die Kurve für parallele Polarisation zeigt hingegen keine Übereinstimmung mit Bild 4.22, was später anhand der Nutquerschnitte diskutiert werden soll. Die Nutbreite ist bei paralleler Polarisation meistens geringfügig größer als bei senkrechter Polarisation, dagegen ist die Nuttiefe etwas geringer.

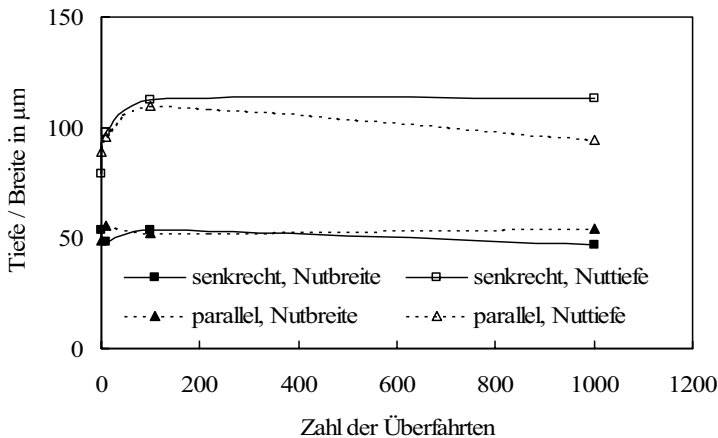


Bild 4.23: Nuttiefe und Nutbreite beim Multipass-Abtragen. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 5 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, effektiver Vorschub: 0,6 mm/min, Material: GG 25.

Bild 4.24 zeigt den Querschnitt durch vier Nuten aus obigem Diagramm bei Polarisation senkrecht zur Vorschubrichtung. Die Form des Nutquerschnitts ändert sich beim Multipass-Abtragen mit niedriger Energiedichte von einer annähernden u-Form zu einer ausgeprägten v-Form. Dies deckt sich mit Beobachtungen die beim Laserbohren gemacht wurden [10]. Da jede einzelne Überfahrt nur eine relativ geringe Tiefe abträgt ist die Materialmenge, die aus der Nut geschleudert werden muss, deutlich geringer. Die Nuttiefe nimmt mit steigender Anzahl der Überfahrten geringfügig zu.

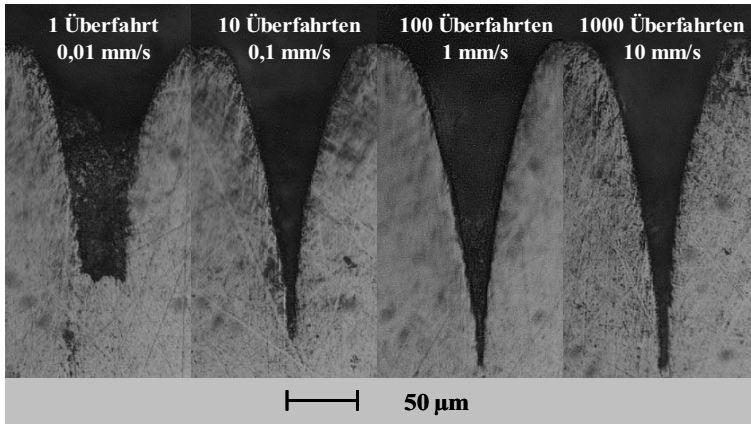


Bild 4.24: Nutquerschnitte beim Multipass-Abtragen. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 5 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, effektiver Vorschub: 0,6 mm/min, Polarisationsrichtung: senkrecht zur Vorschubrichtung, Material: GG 25.

In Bild 4.25 sind die Nutquerschnitte bei identischen Parametern aber mit einer Polarisation parallel zur Vorschubrichtung dargestellt.

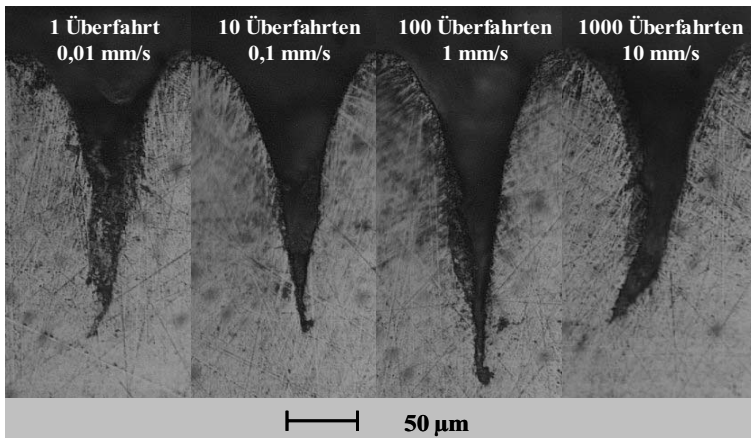


Bild 4.25: Nutquerschnitte beim Multipass-Abtragen. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 5 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, effektiver Vorschub: 0,6 mm/min, Polarisationsrichtung: parallel zur Vorschubrichtung, Material: GG 25.

Im Gegensatz zur senkrechten Polarisierung tendieren die Nuten zum Auswandern in großer Tiefe. Dieser Effekt wurde auch schon beim Laserbohren beobachtet und findet immer senkrecht zur Polarisierungsebene statt [7, 59]. Das Bild zeigt auch, warum die Nuttiefe bei paralleler Polarisierung zu einer Überfahrt hin nicht weiter ansteigt, wie das nach den Überlegungen anhand von Bild 4.22 zu vermuten wäre. Die gewählte Vorschubgeschwindigkeit ist so niedrig, dass die in Kapitel 4.1.3 dargestellten Vorgänge die Abtragstiefe begrenzen, obwohl die Absorption zunimmt. Ein schmaler Kanal am Nutgrund weist darauf hin, dass dort unten zwar noch Energie ankommt, aufgrund der Vorgänge bei extrem niedriger Vorschubgeschwindigkeit bildet sich jedoch keine saubere Nut aus.

Die Untersuchungen zeigen die Überlegenheit des Multipassabtrags bei Strukturieren von Nuten mit niedriger Energiedichte. Dabei sollte die Polarisierung möglichst senkrecht zur Vorschubrichtung orientiert sein. Im Vergleich dazu hat die Zahl der Überfahrten beim Strukturieren mit hoher Energiedichte, hauptsächlich einen Einfluss auf die Dynamik des Schmelzbades, jedoch kaum auf die Geometrie des Nutquerschnitts.

Beim Abtragen flächiger Strukturen wird in zwei Dimensionen gearbeitet, weshalb der Einfluss der Polarisierung weitgehend ausgeglichen wird. Bild 4.26 zeigt die Abtragstiefe beim Abtragen flächiger Strukturen. Erwartungsgemäß nimmt die Abtragstiefe proportional zur Zahl der Überfahrten zu.

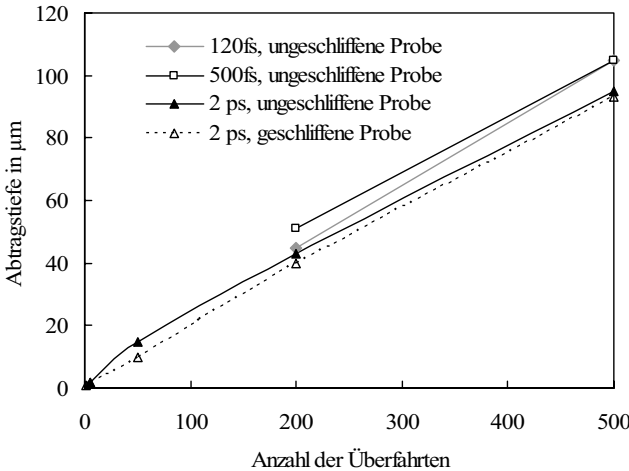


Bild 4.26: Abtragen von flächigen Strukturen: Abtragstiefe beim Multi-pass-Abtragen bei unterschiedlichen Pulsdauern. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 4 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Material: Nickelbasislegierung.

Bei diesen Versuchen wurde zunächst eine Probe mit einer relativ großen Rauigkeit in der Größenordnung von $R_z = 12 \mu\text{m}$ verwendet. Bild 4.27 zeigt die gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Überfahrten. Es ist erkennbar, dass die Rauigkeit im Grund der abgetragenen Struktur mit einer zunehmenden Anzahl der Überfahrten abnimmt. Im Vergleich zur unbearbeiteten Werkstückoberfläche, dargestellt durch die gepunktete Linie, tritt also ein Glättungseffekt ein. Zum Vergleich wurde eine weitere Probe vor der Bearbeitung auf eine gemittelte Rautiefe von weniger als $R_z = 1 \mu\text{m}$ geschliffen. In diesem Fall nimmt die Rauigkeit mit zunehmender Zahl der Überfahrten zu. Die Rautiefe einer abgetragenen Fläche wird also zunächst von der Oberflächenrauigkeit der unbearbeiteten Werkstückoberfläche bestimmt. Wird das Material in vielen Überfahrten abgetragen, so spielen zunehmend die Verfahrensparameter eine Rolle. Die Rauigkeitswerte streben einem Wert zu, der bei den vorliegenden Versuchen in der Größenordnung von 5 – 8 µm liegt.

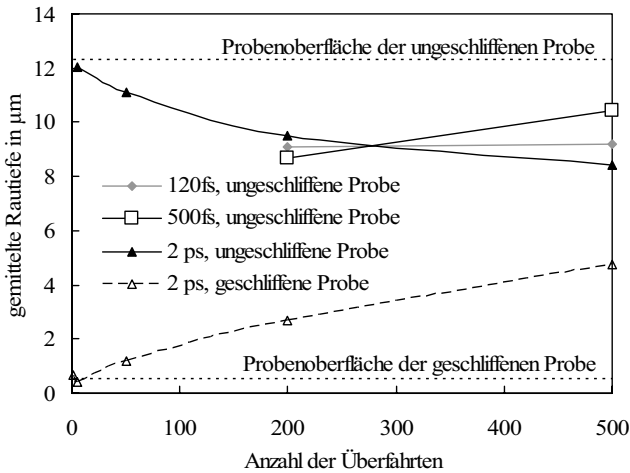


Bild 4.27: Gemittelte Rautiefe R_z beim Multipass-Abtragen bei unterschiedlichen Pulsdauern. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 4 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, Material: Nickelbasislegierung.

Beim Multipass-Abtragen mit hohen Pulsenergiedichten konnte teilweise beobachtet werden, dass sich im Strukturgrund ausgeprägte Löcher bilden. Die Tendenz zur Bildung solcher Vertiefungen ist abhängig von den Bearbeitungsparametern und beim Abtrag von flächigen Strukturen besonders ausgeprägt. Im Extremfall führen diese Vertiefungen dazu, dass überhaupt kein durchgehender Strukturgrund erkennbar ist. Die Entstehung von solchen Vertiefungen wird durch eine lokal erhöhte Abtragstiefe ausgelöst. Auslöser können beispielsweise sein:

- Schmutzpartikel auf der Werkstückoberfläche,
- Lokal erhöhter Pulsüberlapp aufgrund von Beschleunigungs- oder Abbremsvorgängen führt zu Löchern im Bereich der Strukturkante,
- Lokal erhöhter Pulsüberlapp aufgrund von Schwankungen der Vorschubgeschwindigkeit,
- Inhomogenitäten im Werkstoff,
- Schwankung der Pulsenergie.

Sobald in der Struktur eine Vertiefung entstanden ist, führen die bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnten Mehrfachreflexionen dazu, dass sich die Vertiefung immer stärker ausbildet.

In Bild 4.28 ist eine flächige Struktur dargestellt, die mit einer relativ hohen Pulsenergiedichte abgetragen wurde. Die Struktur im linken Bild wurde in Umgebungsatmosphäre bearbeitet. Es gibt Hinweise darauf, dass Material, welches von früheren Überfahrten in der Struktur verblieben ist, die Einkopplung der Laserstrahlung lokal beeinflusst, wodurch an diesen Stellen Unregelmäßigkeiten entstehen. Aufgrund von Vielfachreflexionen wird eine einmal entstandene Vertiefung bei jeder Überfahrt weiter vertieft, was zu beschriebener Lochbildung führt. Bei der Struktur im rechten Bild wurde während der Bearbeitung ein schwacher Druckluftstrom über die Struktur geleitet. Durch diese Maßnahme wurden abgetragene Partikel unmittelbar nach dem Abtrag aus der Wechselwirkungszone entfernt und der Absaugung zugeführt. Bei dieser Struktur sind deutlich weniger Vertiefungen zu erkennen, eine Bestätigung für den Einfluss von Schmutzpartikeln auf den Abtrag.

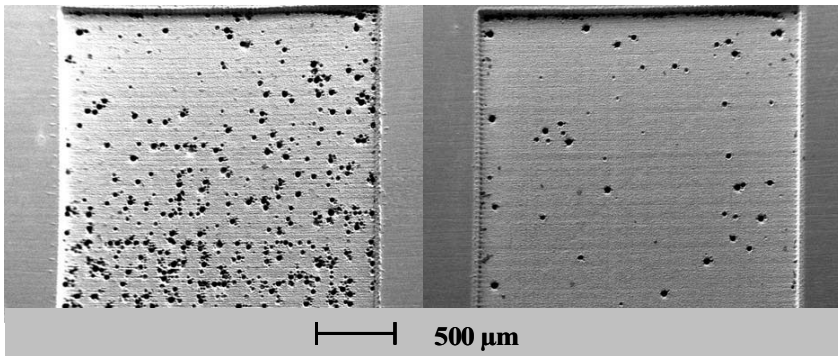


Bild 4.28: Abtrag von flächigen Strukturen. Links: Bearbeitung in Umgebungsatmosphäre, rechts: Bearbeitung im Druckluftstrom. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 500 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 197 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 μm, 40 Überfahrten, Material: Ck 101.

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Struktur abgesehen von den Löchern relativ glatt ist. Zur Verdeutlichung zeigt Bild 4.29 auf dem linken Bild einen Schmutzpartikel im abgetragenen Strukturgrund. Die Umgebung zeigt noch keine Spuren einer Vertiefung, was darauf hindeutet, dass dieser Schmutzpartikel erst nach der letzten Überfahrt auf der Struktur liegen blieb. Im rechten Bild ist eine ausgebildete Vertiefung zu sehen, an der rechten Kante sind geringe Spuren von Schmelzespritzern zu erkennen.

Normalerweise wäre zu vermuten, dass ein Partikel auf der Werkstückoberfläche Strahlung abschattet und deshalb an dieser Stelle eine Erhöhung entsteht. Dieser Effekt wird jedoch davon überlagert, dass Laserstrahlung an den Flanken des Fremdkörpers auf die Werkstückoberfläche reflektiert wird. Auf diese Weise entsteht eine Linsenwirkung, die in der Umgebung des Schmutzpartikels zu erhöhtem Abtrag führt. Bei Eisenwerkstoffen wird der Effekt durch die Tatsache unterstützt, dass der Absorptionsgrad von Oxiden höher liegt als der des reinen Eisen [32]. Wenn es sich bei dem Schmutzpartikel um ein oxidiertes Material handelt, wovon im Normalfall auszugehen ist, nimmt der Schmutzpartikel mehr Energie auf, als das umliegende Material.

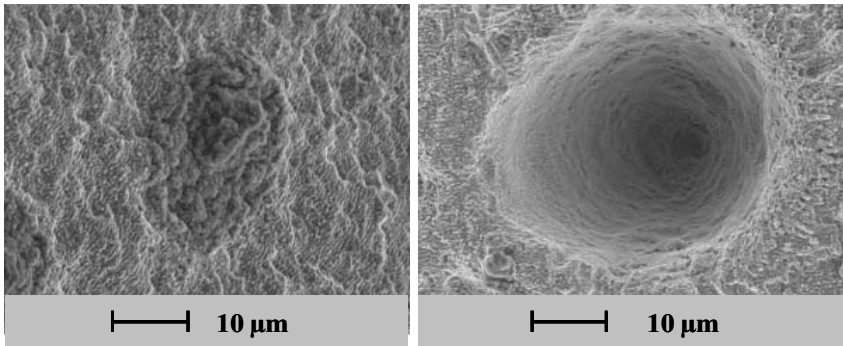


Bild 4.29: Schmutzpartikel als Auslöser von Vertiefungen. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Energiedichte: 197 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Pulsversatz: 15 µm, 20 Überfahrten, Material: Ck 101.

Oft häufen sich die dargestellten Vertiefungen an den Rändern von abgetragenen Strukturen. Eine solche Situation ist in Bild 4.30 dargestellt. Die Häufung der Löcher an den Strukturkanten ist auf die Erhöhung des Pulsüberlapps aufgrund von Beschleunigungs- und Abbremsseffekten am Ende einer Abtragsbahn zurückzuführen. Hinzu kommen Reflexionen an der Strukturwand, die vom Strahl gestreift wird.

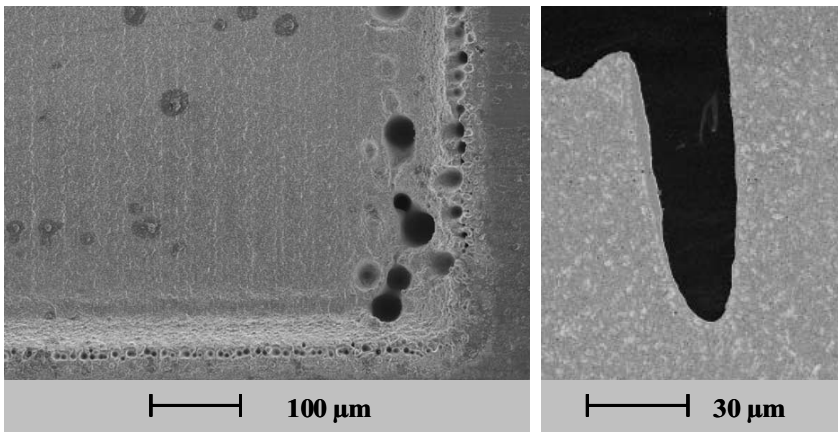


Bild 4.30: Anhäufung von Vertiefungen an den Strukturkanten. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Energiedichte: 197 J/cm², Strahlfleckdurchmesser: 18 µm, Pulsversatz: 15 µm, 20 Überfahrten, Material: Ck 101.

Es hat sich gezeigt, dass der Abtrag von flächigen Strukturen besonders bei hohen Pulsenergien zur Bildung von Vertiefungen neigt. Haben sich Vertiefungen erst einmal ausgebildet, kann ihre weitere Entwicklung kaum aufgehalten werden. Da der Laserabtragsprozess ein Prozess mit undefinierter Schneide ist, erfolgt auch kein Ausgleich im Verlauf der weiteren Bearbeitung. Die Neigung zur Bildung solcher Vertiefungen kann durch sorgfältige Auswahl der Prozessparameter und der peripheren Randbedingungen reduziert werden. Dazu gehört eine effektive Abfuhr der Ablationspartikel während der Bearbeitung sowie eine gleichmäßige und präzise Strahlführung. Nachdem diese Neigung zur Vertiefungsbildung hauptsächlich bei hoher Energiedichte gegeben ist, ist es außerdem sinnvoll, eine möglichst geringe Energiedichte zu wählen.

4.1.5 Fokuslage

Der Lichtfleckdurchmesser auf der Werkstückoberfläche hat einen wesentlichen Einfluss auf die Bearbeitung. Er bestimmt die Nutbreite und hat Einfluss auf den Pulsüberlapp bei festgelegter Vorschubgeschwindigkeit. Außerdem ändert sich bei konstanter Pulsenergie die Energiedichte, sobald sich der Lichtfleckdurchmesser verändert. Für die Materialbearbeitung ist anzustreben, die Fokusebene in die Bearbeitungsfläche zu legen. Bei der Bearbeitung mit Femtosekundenpulsen muss außerdem der in Kapitel 2.2.3 beschriebene Effekt der Conical Emission (CE) beachtet werden.

In Bild 4.31 ist die Nutbreite für unterschiedliche Fokuslagen bei zwei unterschiedlichen Pulsdauern aufgetragen. Eine negatives Vorzeichen bezeichnet eine Fokuslage im Werkstück, d.h. die Strahlung trifft auf das Werkstück auf, bevor sie gestreut werden kann. In diesem Fall sollten keine Auswirkungen der CE erkennbar sein.

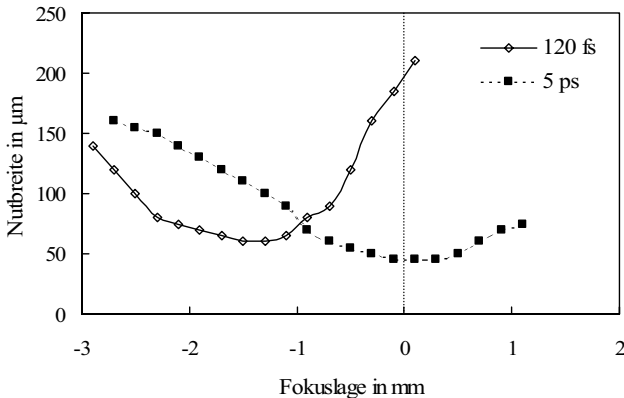


Bild 4.31: Nutbreite in Abhängigkeit der Fokuslage relativ zur Werkstückoberfläche. Wellenlänge: 800 nm, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte (im Fokus): 118 J/cm², Vorschub: 20 mm/s, 40 Überfahrten, Material: GG 25.

Die Kurve mit den ausgefüllten Quadraten zeigt die Nutbreite bei einer Pulsdauer von 5 ps. Bei dieser Pulsdauer sind keine Einflüsse von CE zu erwarten, die Kurve verläuft in etwa symmetrisch zum Minimum der Nutbreite. Bei einer Pulsdauer von 120 fs, dargestellt durch die andere Kurve, nimmt die Nutbreite bei einer Fokuslage oberhalb der Werkstückoberfläche stärker zu, außerdem ist die geringste Nutbreite größer als bei 5 ps. Beides weist auf eine Strahlverbreiterung durch die CE hin. Im Diagramm fällt weiterhin auf, dass die kleinste Nutbreite bei einer um etwa 1,5 mm unterschiedlichen Fokuslage erreicht wird. Diese Beobachtung lässt sich teilweise durch die CE erklären. Da die Streuung bereits vor dem eigentlichen Strahlfokus beginnt, verschiebt sich der kleinste Strahldurchmesser beim Auftreten von CE in Richtung Strahlquelle. Damit lässt sich jedoch nur ein Teil der Fokusverschiebung von 1,5 mm erklären. Bei identischen Propagationsbedingungen müssten die beiden Kurven an der linken Seite aufeinander liegen. Durch die Justage der Strahlquelle beim Verändern der Pulsdauer kann sich die absolute Lage der Fokusebene geringfügig verschieben, ein Effekt der im Verlauf der Untersuchungen wiederholt beobachtet werden konnte.

Die Auswirkungen der CE lassen sich auch in der Geometrie der abgetragenen Nut erkennen. Da die Streuung der Laserstrahlung äußerst unregelmäßig erfolgt, wird kein gleichmäßiger Abtrag erreicht. Bild 4.32 zeigt Nuten, die mit unterschiedlichen Fokusslagen wurden.

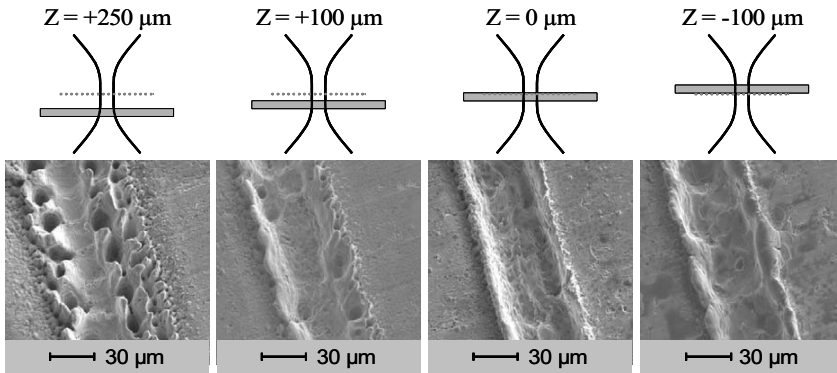


Bild 4.32: Einfluss der Fokusslage. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte (im Fokus): 118 J/cm², Vorschub: 1200 mm/min, 40 Überfahrten, Material: GG 25.

Das linke Bild zeigt einen Nut, bei dessen Abtrag der Fokus 250 µm oberhalb der Werkstückoberfläche lag, so dass die CE also voll auswirken konnte. Der Nut ist relativ breit und im Randbereich durch die gestreuten Strahlanteile sehr unregelmäßig abgetragen. Wird die Fokusslage in Richtung Werkstückoberfläche hin verschoben, wirken sich die gestreuten Strahlanteile weniger stark aus. Da die CE bereits vor dem Fokus entsteht, können entsprechende Auswirkungen bereits beobachtet werden, wenn der Fokus auf der Werkstückoberfläche liegt. Für die Bearbeitung mit Laserpulsen im Femtosekundenbereich ergibt sich daraus die Konsequenz, den Fokus möglichst auf oder besser unterhalb der Werkstückoberfläche zu positionieren, sofern die CE nicht durch andere geeignete Maßnahmen unterdrückt wird. Nach [12] kann die CE vermindert werden, wenn die Bearbeitung im Vakuum bzw. unter einer Schutzgasatmosphäre aus Helium durchgeführt wird. Auch die Verlängerung der Pulsdauer auf mindestens 1,5 ps wirkt der Entstehung der CE entgegen.

4.1.6 Repetitionsrate

Während die Qualität einer Bearbeitung die grundsätzliche Eignung eines Abtragsverfahrens festlegt, ist die Abtragsrate für die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens ausschlaggebend. Bei allen Laserprozessen hat die während der Bearbeitung insgesamt in das Werkstück eingebrachte Energie einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessgeschwindigkeit. Zur Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit ist demnach eine Erhöhung der Laserleistung notwendig. Da die Pulsenergie aus Qualitätsaspekten heraus nicht beliebig gesteigert werden kann, ist das nur über eine Erhöhung der Pulsfolgefrequenz bei gleichbleibender Pulsenergie möglich.

Ein kommerziell erhältliches System erreicht eine Repetitionsrate von bis zu 250 kHz bei einer Pulsenergie von etwa 0,3 μJ . Bei Fokussierung mit einer Brennweite von 10 mm kann eine Energiedichte von 5 J/cm^2 erreicht werden, was zum Oberflächenstrukturieren ausreicht. Die Breite und damit die Querschnittsfläche der so abgetragenen Nuten ist deutlich geringer als bei typischen Nuten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit abgetragen wurden. Dennoch sind diese Ergebnisse geeignet, den Verlauf der Abtragsrate bei hohen Repetitionsraten zu untersuchen. In Bild 4.33 ist die Abtragsrate über der Repetitionsrate aufgetragen. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde dabei so angepasst, dass ein konstanter Vorschub pro Puls gewährleistet war. Die durchgezogenen Geraden stellen den Verlauf der Abtragsrate für den angenommenen Fall dar, dass die Abtragsrate proportional zur Repetitionsrate verläuft.

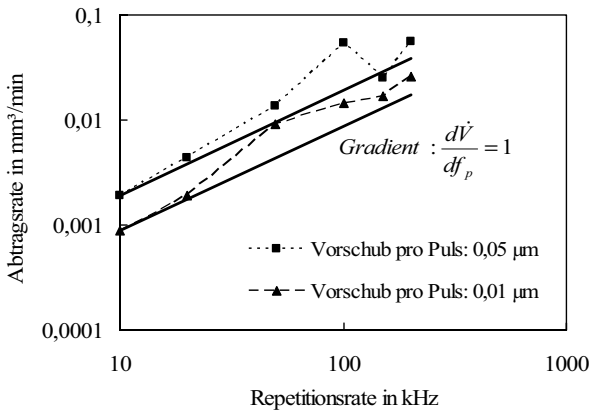


Bild 4.33: Nutquerschnitt in Abhängigkeit von der Repetitionsrate.

Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 200 fs, Pulsenergie:
3 μJ , Energiedichte: 5 J/cm^2 , Material: 100 Cr 6.

Die Kurven liegen überwiegend oberhalb des erwarteten Verlaufs, bei einzelnen Messpunkten treten jedoch große Abweichungen auf. Dabei ist zu beachten, dass die Veränderung der Repetitionsrate mit einer umfangreichen Justage des Lasersystems verbunden war, weshalb exakt konstante Strahlparameter nicht gewährleistet werden konnten. In Hinblick auf die unterschiedlichen Größenverhältnisse der Achsen in Bild 4.34 ist trotzdem erkennbar, dass die Abtragsrate in gewissen Grenzen proportional zur Repetitionsrate verläuft. In Bild 4.34 sind zwei Nuten als REM-Aufnahme bzw. im Querschnitt dargestellt. Sie wurden bei identischer Pulsenergie mit der niedrigsten bzw. höchsten Repetitionsrate aus dieser Versuchsreihe abgetragen.

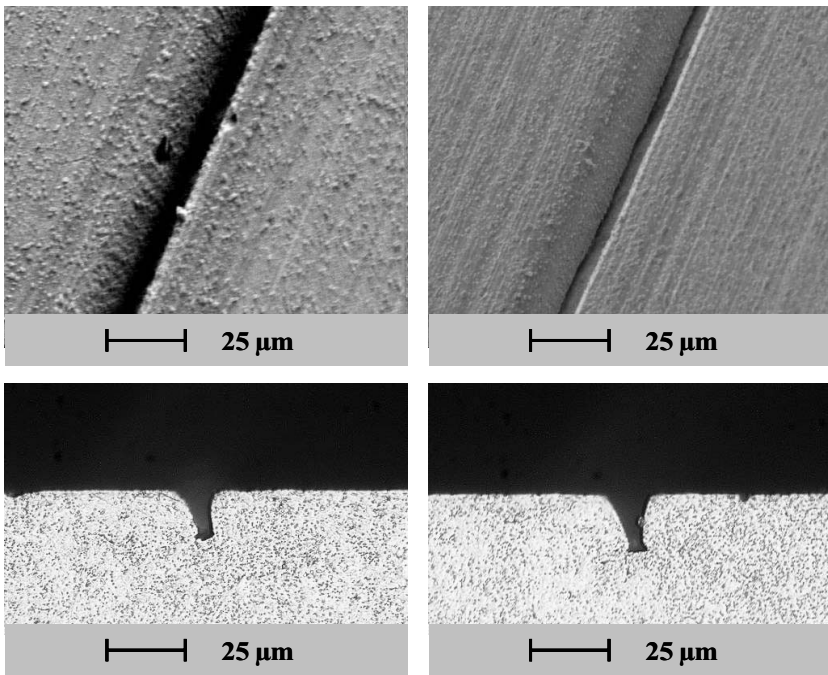


Bild 4.34: Nuten in Stahl. Wellenlänge: 800 nm Pulsdauer: 200 fs, Repetitionsrate: 10 kHz (links) bzw. 200 kHz (rechts), Pulsenergie: 3 µJ, Energiedichte: 5 J/cm², Vorschub pro Puls: 0,025 µm, 1 Überfahrt, Material: 100 Cr 6.

Form und Querschnitt der Nuten sind annähernd vergleichbar. Eine leichte Asymmetrie der Nuten ist durch die Tatsache bedingt, dass der Strahl nicht exakt senkrecht auf der Werkstückoberfläche auftraf. Die Rauigkeiten auf der Werkstückoberfläche im linken Bild sind Verunreinigungen auf der Probe und stehen in keinem Zusammenhang mit der Bearbeitung. Zumindest bis zu der untersuchten Repetitionsrate von 200 kHz konnte damit ein proportionaler Zusammenhang zwischen Repetitionsrate und Abtragsrate bestätigt werden.

Weitere Versuche wurden mit einer sehr hohen Repetitionsrate von 120 MHz durchgeführt. Die eingesetzte Strahlquelle hat eine Wellenlänge von 1064 nm bei einer Pulsdauer von 8-9 ps und einer Pulsenergie von 0,4 µJ. Mit diesem Lasersystem war es nicht möglich Nuten abzutragen, da die Pulsenergie nicht zum Abtragen ausreichte.

4.2 Vergleich unterschiedlicher Lasersysteme

Im Folgenden sollen die verschiedenen eingesetzten Lasersysteme in Bezug auf Abtragsrate und -geschwindigkeit gegenübergestellt werden. Zum Vergleich wird eine Nut aus dem industriellen Laserhonen herangezogen, die mit einer Pulsdauer von 150 ns abgetragen und mechanisch nachbearbeitet wurde. Um möglichst vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurde die Energiedichte bei allen Versuchen auf 5 J/cm^2 eingestellt, außerdem wurden alle Nuten mit einer einzelnen Überfahrt hergestellt. In Bild 4.35 sind Nutquerschnitt und Vorschubgeschwindigkeit für ausgewählte Nuten dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Fokussdurchmesser sind die Nutbreite und damit das ablatierte Volumen nur indirekt miteinander vergleichbar. Der Querschnitt der durch Laserhonen hergestellten Nut ist mit einer gestrichelten Linie markiert.

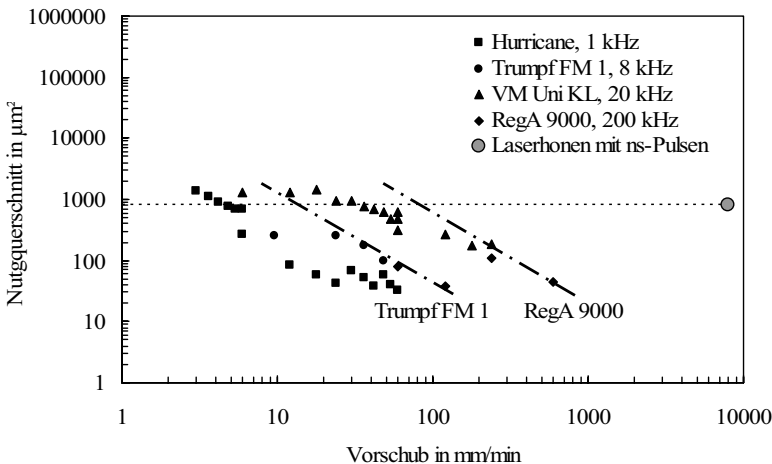


Bild 4.35: Vergleich der Abtragsraten beim Nutenstrukturieren mit unterschiedlichen Lasersystemen. Energiedichte: 5 J/cm^2 , 1 Überfahrt.

Generell nimmt der Nutquerschnitt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Daher liegen die Werte, die jeweils mit einem Laser erzielt wurden in etwa auf einer Line von links oben nach rechts unten. Bei zwei der untersuchten Lasersysteme war die Pulsenergie zu gering, um einen Nutquerschnitt wie beim Laserhonen zu erreichen. Um dennoch eine Aussage darüber machen zu können, welche Vorschubgeschwindig-

keiten mit diesen Lasersystemen bei ausreichender Pulsenergie möglich wären, wurden die Daten in Bild 4.35 mit den strichpunktiert dargestellten Linien extrapoliert. Dieses Vorgehen erlaubt eine Abschätzung aufgrund der in Bild 4.33 gezeigten proportionalen Abhängigkeit von Volumenabtragsrate $\dot{V}$ und Repetitionsrate f_P .

Für einen Vergleich der Verfahren ist jedoch nicht nur die Abtragsrate, sondern auch die Qualität der Strukturierung von Interesse. Bild 4.36 zeigt Aufnahmen, die mit einem Laser-scanning-Mikroskop (LSM) aufgenommen wurden. Das linke Bild zeigt eine Nut, die mit industriell eingesetztem Laserhonen hergestellt wurde, das rechte Bild eine Nut, die mit ultrakurzen Laserpulsen im Labor abgetragen wurde. Die Nut, die durch Laserhonen entstanden ist, wurde nach der Laserstrukturierung in einem Fer-tighonschritt nachbearbeitet. Die Nut auf dem rechten Bild wurde nicht nachbearbeitet. Es wurden lediglich lose, nicht anhaftende Partikel mit einem in Ethanol getränkten Papiertuch entfernt.

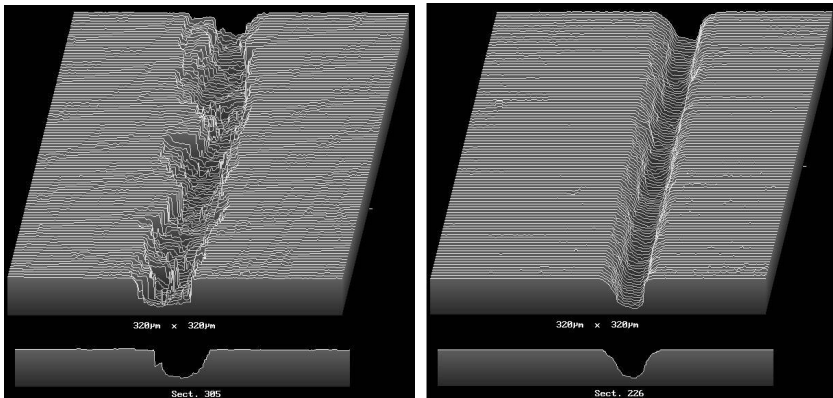


Bild 4.36: Vergleich zwischen Laserhonen und -strukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen. Pulsdauer: links: 150 ns mit Nacharbeit, rechts: 130 fs ohne Nacharbeit.

Die Nut auf dem linken Bild besitzt, bedingt durch das nachgeschaltete Feinhonen eine relativ hohe Kantenschärfe. Form und Querschnitt der Nut sind jedoch über die Länge relativ unregelmäßig. Die Nut im rechten Bild zeigt über die gesamte Länge einen gleichmäßigen Nutquerschnitt. Die Strukturkanten sind aufgrund der Leistungsdichteverteilung des Laserstrahls leicht abgerundet. Der qualitative Vorteil der Strukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen äußert sich nicht nur in der Tatsache, dass Grate und Schmelzschichten vermieden werden können, sondern auch in der Qualität und Präzision der erzeugten Struktur.

4.3 Anwendungsbeispiele

4.3.1 Probekörper für tribologische Untersuchungen

Die Laserstrukturierung tribologisch beanspruchter Flächen an makroskopischen Bauteilen wird heute im industriellen Maßstab eingesetzt. Bislang werden hierfür Strahlquellen mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich verwendet. Die dabei entstehenden Schmelzgrate werden in entsprechenden Nachbearbeitungsschritten entfernt. Mit ultrakurzen Laserpulsen kann die Bildung von Schmelzgraten und damit die Notwendigkeit eines Nachbearbeitungsschrittes vermieden werden. Weil anschließend kein weiteres Material abgetragen wird, lässt sich die Strukturtiefe von vorne herein reduzieren. Weiterhin ist es erstmals möglich, auf Endmaß bearbeitete Oberflächen zu strukturieren, was die Freiheit der Fertigungsplanung erhöht.

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, ist die Abtragsrate mit bislang verfügbaren Lasersystemen für einen wirtschaftlichen Einsatz in der Serienproduktion zu gering. Für die Fertigung von Prototypen und Kleinserien ist das Verfahren durchaus brauchbar. Um das Potenzial der Laserstrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen in Hinblick auf die tribologischen Eigenschaften einer technischen Oberfläche zu untersuchen, wurden Testkörper mit unterschiedlichen Nutenstrukturen hergestellt. In Bild 4.37 ist ein ringförmiger Testkörper aus Grauguss dargestellt, in dessen Oberfläche Nuten strukturiert wurden. Dank der Flexibilität der Laserbearbeitung konnten Ringe mit unterschiedlichen Nutenanordnungen in vergleichsweise geringer Zeit hergestellt werden. Die Probekörper wurden anschließend in sogenannten Pin-on-Ring Experimenten auf einem Tribometer untersucht. Dazu wird ein Chromstift mit variierter Anpresskraft auf die strukturierte Oberfläche des Testkörpers gepresst. Die Kräfte, die bei rotierendem Testkörper auf den Stift wirken sind ein Maß für die Reibungskräfte. In vorliegenden Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Strukturen einen reibungs- und verschleißmindernden Einfluss haben.

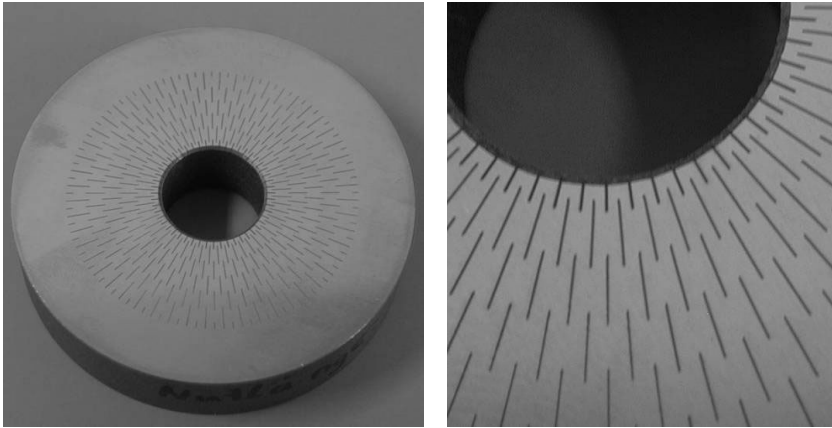


Bild 4.37: Testkörper für tribologische Untersuchungen. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 2 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Pulsenergie: 4 J/cm², effektiver Vorschub: 4 mm/min, 150 Überfahrten, Bearbeitungsdauer: 6,5 h, Material: Grauguss.

4.3.2 Einlaufstrukturen an Turbinenschaufeln

Turbinenschaufeln in modernen Gasturbinen sind teilweise extrem hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Um den Wirkungsgrad der Turbinen zu erhöhen wird die Verbrennungstemperatur immer weiter erhöht und liegt teilweise bereits im Bereich der Schmelztemperatur der eingesetzten Werkstoffe. Die für den zuverlässigen Betrieb unverzichtbare Filmkühlung der Schaufeloberfläche wird durch Kühlbohrungen und Kanäle in den Turbinenschaufeln erreicht. Zur Verbesserung der Strömungsbedingungen werden die Eintrittsöffnungen dieser Kühlbohrungen mit speziellen Einlaufgeometrien, sogenannten Shaped Holes, versehen. Der Laser ist heute ein verbreitetes Werkzeug bei der Herstellung von Kühlbohrungen, während die Shaped Holes aufgrund hoher Anforderungen an die Formtreue üblicherweise im Erodierverfahren hergestellt werden.

Dreidimensionales Laserabtragen mit ultrakurzen Laserpulsen stellt ein mögliches Alternativerfahren zum zeitaufwändigen und teuren Erodierprozess dar. Im vorliegenden Fall wurde ein Scannersystem eingesetzt, um die Struktur schichtweise in parallelen Bahnen abzutragen. In Bild 4.38 ist eine Beispielstruktur dargestellt, die in Abmessung und Form an tatsächlich eingesetzte Shaped Holes angelehnt ist [60].

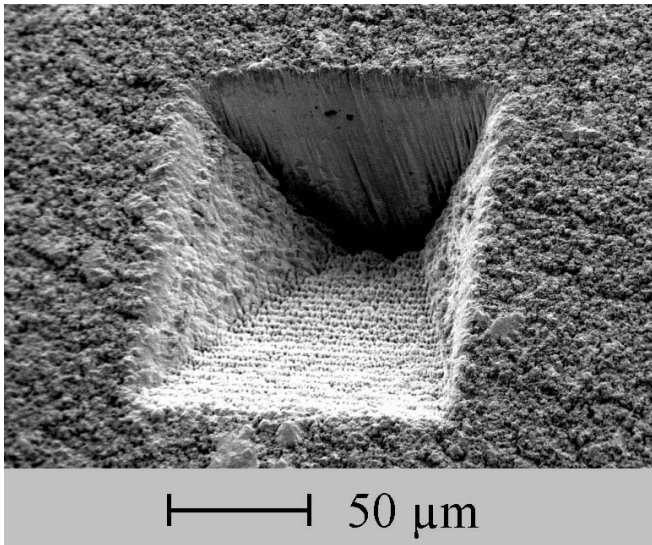


Bild 4.38: Dreidimensionale Struktur als Beispiel für ein Shaped Hole.
Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 120 fs, Repetitionsrate:
1 kHz, Pulsenergie: 3 J/cm², 500 Überfahrten, Material:
Nickelbasislegierung.

Die Qualität der abgetragenen Struktur ist mit der von erodierten Strukturen vergleichbar. Die Abtragsrate mit bisherigen Lasersystemen ist jedoch zu gering, um einen wirtschaftlichen Einsatz zu rechtfertigen. Möglicherweise können Systeme mit wesentlich höheren Repetitionsraten dazu beitragen, in Zukunft den Einsatz der Lasertechnik für die Herstellung von Shaped Holes konkurrenzfähig zu machen.

4.3.3 Herstellung von Druck- und Prägeformen

Weitere mögliche Anwendungen der Laserstrukturierung finden sich in der Druck- und Prägeindustrie. Der Unterschied zwischen Drucken und Prägen besteht darin, dass die Walze beim Drucken in erster Linie Dosieraufgaben hat, beim Prägen wird dagegen die Form der Walze übertragen. Je nach Druckverfahren und zu druckender Auflage können die Druckwalzen in unterschiedlichen Materialien und Varianten ausgeführt sein. Klassische Druckwalzen aus Metall werden mit Ätzverfahren strukturiert. Das Verfahren ist aufwändig und durch die Verwendung ätzender Chemikalien nur bedingt umweltfreundlich. Das Laserstrukturieren stellt eine saubere und flexible Lö-

sung dar. Endlos-Druckwalzen aus Kautschuk werden seit vielen Jahren mit CO₂-Lasern strukturiert [61]. Für das direkte Strukturieren von Walzen aus Gummi werden heute CO₂-Laser mit einer Leistung von bis zu 2,5 kW eingesetzt. Die dabei erreichten Abtragsraten liegen bei bis zu 10 cm²/min. Für kleine Auflagen werden Druckwalzen mit Lackschichten versehen, die mit Diodenlasern abgetragen werden können. Für Druckaufgaben mit hohen Auflagen sind Druckwalzen aus Metall weiterhin unverzichtbar. Ein mögliches Verfahren ist das Abtragen von Lackschichten, die als Maschierung für nachfolgende Ätz- oder Galvanoprozesse dienen. Für Metalle kommen aufgrund des komplizierteren Materialaustriebs hauptsächlich gütegeschaltete Nd:YAG-Laser mit Leistungen bis zu 100 W zum Einsatz. Die Abtragsrate bei diesen Prozessen liegt um den Faktor 100 niedriger als bei der Kunststoffgravur [62]. Die Femtosekundentechnologie ist ein Ansatz, Druckwerkzeuge aus Metall ohne Nacharbeit in einem Fertigungsschritt zu strukturieren.

Für die Darstellung von Helligkeitsstufen muss die Farbmenge an jeder Stelle des Druckbildes durch Variation der Näpfchengröße gezielt dosiert werden. Dabei unterscheidet man zwischen der tiefenvariablen und der halb-autotypischen Rasterung. Während bei der tiefenvariablen Rasterung die Näpfchentiefe variiert wird (entsprechend der Amplitudenmodulation) wird bei der halb-autotypischen Rasterung die Grundfläche der Näpfchen bei konstanter Tiefe variiert. Bei der klassischen Ätztechnik ist die halb-autotypische Rasterung üblich, da bei der Ätztechnik eine Variation der Näpfchentiefe nicht ohne weiteres möglich ist. Beim Einsatz der Lasertechnik ist hingegen eine Variation der Näpfchentiefe naheliegend. Bild 4.39 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt aus einer Druckplatte, die mit Femtosekundenpulsen strukturiert wurde.

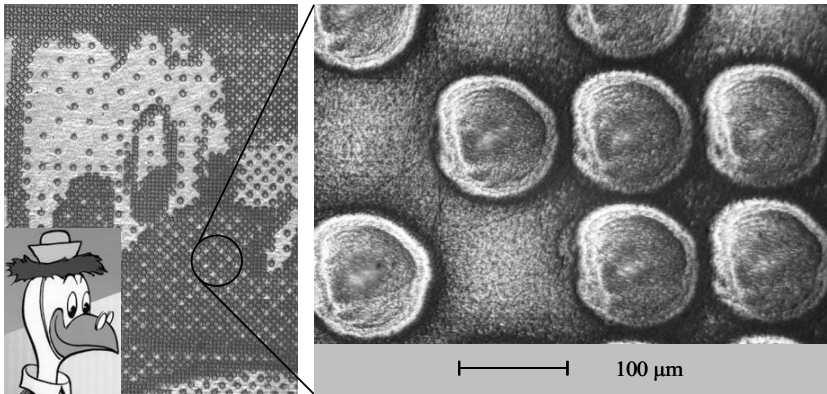


Bild 4.39: Beispiel für eine laserstrukturierte Druckwalze. Wellenlänge: 800 nm, Pulsdauer: 2 ps, Repetitionsrate: 1 kHz, Energiedichte: 4 J/cm², Näpfchentiefe: 20 µm, 100 Pulse pro Näpfchen, Auflösung: 200 dpi, Material: Kupfer.

Das Original links unten im Bild wurde mittels der Scannersoftware in ein Punktrasterbild umgewandelt. Jedes einzelne Näpfchen wurde mit mehreren Laserpulsen auf der selben Stelle abgetragen. Im rechten Bild ist deutlich zu erkennen, dass die Form des Strahlprofils die Form der Näpfchen beeinflusst. Um exakt runde Näpfchen zu erzeugen, ist ein exakt kreissymmetrisches Strahlprofil notwendig.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass ein nahezu schmelzfreier Abtrag von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen möglich ist. Das dargestellte Verfahren ermöglicht die Herstellung präziser Strukturen für unterschiedlichste Anwendungen. Die Systemtechnik wurde, verglichen mit bekannten Verfahren zum industriellen Laserabtragen, nicht wesentlich verändert. Es war lediglich eine Anpassung der optischen Komponenten auf die Strahlparameter des eingesetzten Lasersystems notwendig. Für die Bearbeitung von Metallen ist dabei eine Pulsdauer von etwa 5-10 Pikosekunden ausreichend kurz um ablagerungsfreie Strukturen zu erzeugen. Bei einer weiteren Verkürzung der Pulsdauern kann die Strukturqualität nur noch geringfügig gesteigert werden. Im Hinblick auf eine industrielle Anwendung des Verfahrens ist diese Erkenntnis von zentraler Bedeutung, da die Komplexität und Kosten der Laserstrahlquelle deutlich ansteigt, sobald die Pulsdauer unter wenige Pikosekunden reduziert wird.

Schmelzfreier Materialabtrag ist nur bei einer Pulsenergie knapp oberhalb der Abtragschwelle möglich. Wird mit einer hohen Pulsenergie abgetragen entstehen Grate und Schmelzschichten, was die Qualitätsvorteile gegenüber Nanosekundenpulsen weitgehend aufhebt. Bei geringer Pulsenergie ist die Abtragsrate zu niedrig für eine wirtschaftliche Anwendung. Eine Möglichkeit der Erhöhung der Abtragsrate ohne Reduktion der Qualität ist die Steigerung der Repetitionsrate bei konstanter Pulsenergie. Die Versuche zeigen einen linearen Anstieg der Abtragsrate bis zu einer Repetitionsrate von 200 kHz.

Werden Strukturen mit gepulsten Lasersystemen abgetragen, entsteht die endgültige Struktur durch Aneinanderreihung einzelner Krater die jeweils durch einen einzelnen Laserpuls entstehen. Der Pulsüberlapp hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf Tiefe und Qualität der entstehenden Strukturen. Grundsätzlich steigt die Strukturtiefe mit zunehmendem Pulsüberlapp an. In Bezug auf die Qualität der entstehenden Struktur gibt es einen optimalen Pulsüberlapp, der im Bereich von 50 – 70 % liegt. Ein geringerer Pulsüberlapp führt dazu, dass die einzelnen Abtragskrater erkennbar werden. Bei einem größeren Pulsüberlapp wird die Laserstrahlung an der Einlaufschräge zunehmend in die bereits abgetragene Struktur reflektiert, was zu unregelmäßigem Abtrag führen kann. Nutzenstrukturen sind bei hohem Pulsüberlapp mit redeponiertem Material

angefüllt, weshalb die Tiefe der Struktur auch bei zunehmendem Pulsüberlapp sinkt. Flächige Strukturen zeigen bei hohem Pulsüberlapp eine sehr unregelmäßige Struktur, die teilweise über die ursprüngliche Materialoberfläche herausragen kann. Aufgrund der beschriebenen Effekte ist die Abtragstiefe beim einmaligen Abfahren der Struktur begrenzt.

Tiefere Strukturen müssen in mehreren Schritten schichtweise abgetragen werden. Für Nuten deren Tiefe nicht wesentlich größer als die Breite ist, gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der Zahl der Überfahrten und der Abtragstiefe. Beim Abtragen flächiger Strukturen können sich nach einigen Überfahrten Vertiefungen im Strukturgrund bilden. Diese Vertiefungen haben ihren Ursprung in Unregelmäßigkeiten beim Abtragsprozess und verstärken sich mit jeder weiteren Überfahrt. Durch eine sorgfältige und saubere Prozessdurchführung lässt sich die Tendenz zur Bildung von Vertiefungen minimieren.

Laserpulse im Femtosekundenbereich weiten sich hinter der Fokusebene stärker auf, als dies nach den Gesetzen der Strahlpropagation zu erwarten wäre, ein Effekt, der in der Literatur als Conical Emmission bezeichnet wird. Beim Abtragen von Nuten kann diese Aufweitung beobachtet werden, wenn der Fokus oberhalb der Werkstückoberfläche positioniert wird. In diesem Fall verbreitert sich die Nut entsprechend der Strahlaufweitung. Die Aufweitung ist mit einer statistischen Streuung der Strahlkomponenten verbunden, weshalb die Nut vor allem an den Rändern weniger gleichmäßig ausgeformt ist.

Das dargestellte Verfahren ermöglicht die Herstellung präziser Strukturen, die ohne Nacharbeit einsetzbar sind. Verglichen mit bekannten Laserabtragsverfahren ist eine bislang unerreichte Qualität erzielbar. Die Abtragsrate ist mit verfügbaren Lasersystemen sehr gering, weshalb das Verfahren vorerst nur für Anwendungen interessant ist, die mit anderen Verfahren nicht realisierbar sind. Beispielsweise können auf Endmaß bearbeitete Bauteile strukturiert werden, ohne die Maßhaltigkeit zu gefährden. Eine breite Einführung der Ultrakurzpulstechnologie wird derzeit noch dadurch verhindert, dass verfügbare Lasersysteme eine hohe Komplexität aufweisen und deshalb teuer und anfällig sind. Mit Verfügbarkeit industrietauglicher Lasersysteme mit hoher Repetitionsrate in naher Zukunft rückt der industrielle Einsatz der dargestellten Technologie in greifbare Nähe.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Abeln, T.; Klink, U.: *Laserstrukturieren zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen*. Proc. of Stuttgarter Lasertage (SLT' 01) Stuttgart: FGSW, 2001, S. 61.
- [2] Momma, C.; Nolte, S.; Chichkov, B.N.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: *Precise laser ablation with ultrashort pulses*. Applied surface science 109/110 , 1997, S. 15.
- [3] Shirk, M. D.; Molian, P. A.: *A review of ultrashort pulsed laser ablation of materials*. Journal of laser applications, Volume 10, number 1, Februar 1998, S. 18-28.
- [4] Nolte, S.; Momma, C.; Jacobs, H.; Tünnermann, A.: *Ablation of metals by ultrashort laser pulses*. J.Opt. Soc. Am. B/vol. 14, Nr. 10, Oktober 1997, S. 2716-2722.
- [5] Tönshoff, H. K.; von Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Kamlage, G.; Nolte, S.: *Micromachining of metals using ultrashort laser pulses*. International journal of electrical machining, Nr. 4, Januar 1999, S. 1-6.
- [6] Banks, P. S.; Feit, M. D.; Rubenchik, A. M.; Stuart, B. C. Perry, M. D.: *Material effects in ultra-short pulse laser-drilling of metals*. Appl. Phys. A 69 (suppl.), 1999, S. 377-380.
- [7] Nolte, S.; Momma, C.; Kamlage, G.; Ostendorf, A.; Fallnich, C.; von Alvensleben, F.; Welling, H.: *Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling*. Appl. Phys. A 68, 1999, S. 563-567.
- [8] Radtke, J.; Föhl, C.; Weikert, M.; Dausinger, F.: *Bohren und Mikrostrukturieren mit Ultrakurzpulslasern*. Proc. of Stuttgarter Lasertage (SLT' 01) Stuttgart: FGSW, 2001, S. 56.

- [9] Ruf, A.; Berger, P.: *Hydrodynamical modelling of laser drilling*. Proceedings of the international workshop on fundamentals of ablation with short pulsed solid state lasers, Hirschegg, 2003.
- [10] Ruf, A.: *Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern*. München, Utz-Verlag, Universität Stuttgart, Dissertation, 2004.
- [11] Weikert, M.; Föhl, C.; Dausinger, F.: *Surface structuring of metals with ultrashort laser pulses*. Proc. of SPIE, vol. 4830, 2002, S. 501-505.
- [12] 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, 2003, S. 77-86.
- [13] Neudecker, T.; Popp, U.; Schraml, T.; Engel, U.; Geiger, M.: *Towards optimized lubrication by micro texturing of tool surfaces*. Advanced Technology of Plasticity 1999, Proc. Of the 6th Internat. Conf. on Technol. of Plasticity, Nürnberg, Sep 19-24, Band I, 1999, S. 619-626.
- [14] Geiger, M.; König, W.; Tönshoff, H.-K.: *Einsatz von Laserstrahlung zur Herstellung tribologisch optimierter Oberflächentopographien*. Werkstoffwoche 98, Band 5: Werkstoffe für die Fertigungstechnik, München, 12.–15. Okt. 1998, Band 5, 1999, S. 157-162.
- [15] Geiger, M.; Roth, S.; Becker, W.: *Influence of laser-produced microstructures on the tribological behaviour of ceramics*. Surface and Coatings Technology, Band 100-101, Heft 1-3, 1998, S. 17-22.
- [16] Klink, U.: *Laserhonen von Zylinderlaufbahnen*. Motortechnische Zeitschrift, Band 58, Heft 9, 1997, S. 554-556.
- [17] Chilamakuri, S.; Zhao, X.; Bhushan, B.: *Failure analysis of laser-textured surfaces*. Proc Instn Mech Engrs, vol. 214 Part J, S. 471-483.

-
- [18] Chichkov, B.N.; Momma, C.; Nolte, S.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*. Applied Physics A, 63, 1996, S. 109-115.
- [19] Nolte, S.; Kamlage, G.; Bauer, T.; Korte, F.; Fallnich, C.; Ostendorf, A.; von Alvensleben, F.: *Mikrostrukturierung mit Femtosekundenlasern*. LaserOpto, vol. 31, Nr. 3, S. 72-76.
- [20] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.): *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Springer-Verlag, 1995.
- [21] Schumacher, B.: *Funkenerosives Senken und HSC-Fräsen im Vergleich*. VDI-Z Special Werkzeug- und Formenbau, November 2001.
- [22] Klocke, F.; Knodt, St.; Brinksmeier, E.; Riemer, O.: *Skalierte Strukturen*. VDI-Z 144, 2002, S. 54-57.
- [23] Li, H.; Masaki, T.: *Micro-EDM*. SME Technical Paper MS 91-485, Dearborn, Michigan, 1991, S. 1 - 15.
- [24] Schmidt, B.: *Anwendungen der Mikromechanik*. Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart, 1993.
- [25] Wedler, G.: *Lehrbuch der physikalischen Chemie*. Weinheim, Wiley-VCH, 1997.
- [26] Atkins, P.W.: *Physikalische Chemie*. Weinheim, Wiley-VCH, 1990.
- [27] Schuster, R.: *Elektrochemische Mikrostrukturierung, ein altes Verfahren mit neuen Möglichkeiten*. Bunsen-Magazin, 3. Jahrgang 5/2001, S.121-124.
- [28] Anderl, P.; Schwab, U.; Schwarz, F.: *A new High-Speed Electron Beam Drilling System*. SME Technical Paper MR 01-517, 1991, S. 1-10.
- [29] Grundler, E.: *Laser macht (Metall-) Dampf*. VDI-Z Special Werkzeug- und Formenbau, November 2001.
- [30] Abeln, T.; Raiber, A.; Dausinger, F.; Hügel, H.: *Laser-Micro-Caving (LMC) – a tool for high precision ablation of steel*. Proc. of LANE '97, Erlangen, 1997, S. 877-885.

- [31] Weikert, M.: *Reaktives Mikro-Abtragen unterschiedlicher Stähle mit innovativen cw-Festkörperlasern hoher Strahlqualität*. Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1998.
- [32] Abeln, T.: *Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl*. München, Utz-Verlag, Universität Stuttgart, Dissertation, 2002.
- [33] N.N.: *Strahl und Span im Doppelpack*. Laser, Heft Nr. 5, 2001.
- [34] N.N.: *Späne und Ablation*. Laser, Heft Nr. 3, 2002.
- [35] Perry, M.D.; Stuart, B.C.; Banks, P.S.; Nguyen, H.T.; Feit, M.D.: *Ultrashort-Pulse Laser Machining*. Proc. ICALEO 1998, S. 1-21.
- [36] Momma, C.; Nolte, S.; Chichkov, B.N.; von Alvensleben, F.; Tünnermann, A.: *Präzise Mikro-Bearbeitung mit Femtosekunden-Laserpulsen*. LaserOpto 19(3) 82, 1997.
- [37] Ashkenasi, D.; Rosenfeld, A.: Materialbearbeitung von transparenten Dielektrika mit Femtosekunden-Laserimpulsen. LaserOpto, vol. 31, Nr. 3, S. 91-97.
- [38] Ameer-Beg, S.; Perrie, W.; Rathbone, S.; Wright, J.; Weaver, W.; Champoux, H.: *Femtosecond laser microstructuring of materials*. Applied surface science, vol. 127-129, 1998, S. 875-880.
- [39] Lenzner, M.; Krüger, J.; Sartania, S.; Cheng, Z.; Spielmann, Ch.; Mourou, G.; Kautek, W.; Krausz, F.: *Femtosecond optical breakdown in dielectrics*. Physical review letters, vol. 80, Nr. 18, 1998, S. 4076-4079.
- [40] Dausinger, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Stuttgart: Teubner (Teubner Studienbücher Maschinenbau), Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 1995.
- [41] Hügel, H.: *Strahlwerkzeug Laser: eine Einführung*. Stuttgart: Teubner (Teubner Studienbücher Maschinenbau), 1992
- [42] Nolte, S.: *Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen*. Göttingen: Cuvillier Verlag, Universität Göttingen, Dissertation, 1999.

-
- [43] Rubahn, H.-G.: *Laseranwendungen in der Oberflächenphysik und Materialbearbeitung*. Teubner, Stuttgart, 1996.
- [44] Breitling, D.; Müller, K.-P.: *Vapor and plume dynamics during ablation with ultrashort pulses*. Proceedings of the international workshop on fundamentals of ablation with short pulsed solid state lasers, Hirschegg, 2003.
- [45] Breitling, D.; Müller, K.-P.; Ruf, A.; Berger, P.; Dausinger, F.: Material-vapor dynamics during ablation with ultrashort pulses. Proc. of SPIE, vol. 5063, 2003, S. 81-86.
- [46] Breitling, D.; Ruf, A.; Dausinger, F.: *Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses*. Proc. of SPIE, vol. 5339, 2004.
- [47] Bergmann, Schaefer: *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3: Optik*. Walter de Gruyter, Berlin, 1993.
- [48] Liu, X.; Du, D. ; Mourou, G. : *Laser ablation and micromachining with ultrashort Laser pulses*. Journal of quantum electronics, vol. 33, no.10, 1997, S. 1706-1716,.
- [49] Spectra-Physics: *Mai Tai, diode-pumped, mode-locked Ti:sapphire Laser – User's Manual*. 2002.
- [50] Spectra-Physics: *Hurricane – All diode-pumped Kilohertz Ti:sapphire regenerative amplifier system – User's Manual*. 1999.
- [51] Strickland, D.; Mourou, G.: *Compression of amplified chirped optical pulses*. Opt. Commun. Vol. 56, 1985, S. 219-221.
- [52] Le Harzic, R.: *Étude des procédés laser femtoseconde pour le micro-usinage à effets thermiques limités*. Université Jean Monnet, St. Etienne: Dissertation, 2003.
- [53] Wallenstein, R.: *Diodengepumpte Strahlquelle aus Nd:YVO₄ als Funktionsmuster für die präzise Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Strahlquellen (PRIMUS)*. Bedienungsanleitung, Universität Kaiserslautern, 2002.

- [54] Wegst, C.W.: *Stahlschlüssel*. Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach, 1998.
- [55] Domke: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Girardet, Düsseldorf, 1986.
- [56] Norm DIN EN ISO 4288, Ausgabe 1998: *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren. Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*.
- [57] Beaubeau, E.; Le Harzic, R.; Jonin, C.; Audouard, E.; Mottin, S.; Courbon, M.; Laporte, P. : *Micromachining with high repetition rate femtosecond laser sources*. Proc. of SPIE Vol. 4088, 2000, S. 48-50.
- [58] Reif, J. et al.: *Formation of self-organized regular nanostructures upon femtosecond laser ablation*. Proc. of SPIE, vol. 5662, 2004, S. 737-742.
- [59] Radtke J.: *Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen Werkstoffen mittels repetierender Laserbearbeitung*. München, Utz-Verlag, Universität Stuttgart, Dissertation, 2003.
- [60] Bühler, J.: *Vergleichende Untersuchungen zum Flächenabtrag von Nickelbasislegierungen mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2002.
- [61] Tönshoff, H.K.; Stürmer, M.; Overmeyer, L.; von Alvensleben, F.: *Strukturieren technischer Oberflächen mittels Laserstrahlung*. In: Laser und Optoelektronik, 25(2), 1993.
- [62] Meiners, E.; Sauter, J.; Freund, M.: *Herstellung rotativer Prägeformen mit Laser*. In: Proc. Stuttgarter Lasertage (SLT) 99. Stuttgart: FGSW, 1999, S.36-39.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart. Ohne die tatkräftige Unterstützung durch zahlreiche Personen wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Dausinger für die Betreuung dieser Arbeit. Die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen sowie seine offene und freundliche Art waren mir stets eine große Hilfe.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück danke ich für die Übernahme des Mitberichts sowie die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Hügel für die stetige Unterstützung sowie dafür, dass er in mir die Begeisterung für das Strahlwerkzeug Laser und die Freude an der wissenschaftlichen Arbeit geweckt hat.

Mein Dank gilt allen meinen Kollegen und Studenten für die konstruktive Zusammenarbeit. Der stets freundschaftliche Umgang, innerhalb und außerhalb der wissenschaftlichen Arbeit, sorgte jederzeit für ein sehr angenehmes Arbeitsklima.

Meinen Kollegen aus dem Bereich Technik und Verwaltung, insbesondere Werner Hennig, Manfred Frank und Albrecht Esser gilt mein herzlicher Dank für die unkomplizierte Unterstützung bei technischen und organisatorischen Fragen. Durch ihre Unterstützung konnten zahlreiche Probleme schnell und problemlos gelöst werden.

Weiterhin danke ich dem Laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation der Universität in St. Etienne, insbesondere Herrn Ronan le Harzic, für die Möglichkeit, Versuche mit dem dortigen Lasersystem durchführen zu können.

Schließlich danke ich meinen Eltern und Susanne für die stetige Unterstützung.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströimte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströimten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Kreputat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißtauglichkeit von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanal-gekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluidodynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karoseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtrags von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumi-
numguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahltiefschweißen
von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-
verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-
laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-
dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
mit der Foksmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

