



Schlussbericht des Vorhabens

Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren

Autoren: Robby Ebert
Udo Löschner
Andre Streek
Jörg Schille
Lars Hartwig
Sascha Klötzer
Frank Ullmann
Tino Süß
Horst Exner



Laserinstitut
der Hochschule Mittweida

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung
aus dem Programm
Innoprofile-Nachwuchsforschergruppe unter
dem Förderkennzeichen 03IP506 gefördert.

Projekträger:

Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröf-
fentlichung liegt bei den Autoren.

Web:

www.laser.hs-mittweida.de/43_rapidmicro/

Ansprechpartner:

Dipl.-Physiker Robby Ebert

Laserinstitut der Hochschule Mittweida

Hochschule Mittweida

Technikumplatz 17

09648 Mittweida

Tel. 03727 581401

ebert@htwm.de

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	1
2	Voraussetzungen	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
3.1	Projektplan	3
3.2	Projektmanagement und Ablauf	5
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	5
4.1	Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	5
4.2	Fachliteratur	14
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
6	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	15
6.1	Arbeitspaket 1 – Lasermikrosintern	15
6.1.1	Ziel des Arbeitspaketes.....	15
6.1.2	Verwendung der Zuwendung	18
6.1.3	Ergebnisse.....	27
6.2	Arbeitspaket 2 – 3D Lasermikroschneiden.....	79
6.2.1	Ziel des Arbeitspaketes.....	79
6.2.2	Verwendung der Zuwendung	80
6.2.3	Ergebnisse.....	83
6.3	Arbeitspaket 3 – Mikropulverauftragschweißen (Micro Cladding)	102
6.3.1	Ziel des Arbeitspaketes.....	102
6.3.2	Verwendung der Zuwendung	103
6.3.3	Ergebnisse.....	106
6.4	Arbeitspaket 4 – Lasermikrostrukturieren	122
6.4.1	Ziel des Arbeitspaketes.....	122
6.4.2	Verwendung der Zuwendung	125
6.4.3	Ergebnisse.....	130
6.5	Arbeitspaket 5 – Oberflächenbearbeitung mit Laserplasma.....	180
6.5.1	Ziel des Arbeitspaketes.....	180
6.5.2	Verwendung der Zuwendung	180
6.5.3	Ergebnisse.....	185
6.6	Arbeitspaket 6 – Koordination	195
6.6.1	Ziel des Arbeitspaketes.....	195
6.6.2	Verwendung der Zuwendung	195

6.6.3	Ergebnisse.....	195
6.7	Innoprofile – Programmkriterien	196
6.7.1	Ziele	196
6.7.2	Verwendung der Zuwendung	196
6.7.3	Ergebnisse.....	196
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	200
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	200
9	Voraussichtlicher Nutzen.....	201
10	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	202
11	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	205

1 Aufgabenstellung

Durch das Projekt sollten das Leistungsprofil des am Laserinstitut der Hochschule Mittweida vorhandenen Lasermikrobearbeitungszentrums noch besser an die Bedürfnisse von kooperierenden regionalen Unternehmen angepasst und gleichzeitig die technologischen Besonderheiten ausgebaut werden. Als ein viele Interessen bündelndes zukunftssträchtiges Thema für die Nachwuchsforschergruppe wurde im Vorfeld „Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren“ identifiziert. Dies stellte eine exklusive Kernkompetenz dar, die am Standort Mittweida angesiedelt war, und umfasste folgende Technologien:

- Lasermikrosintern
- 3D Lasermikroschneiden
- Lasermikropulverauftragschweißen
- Lasermikrostrukturieren.

Zum Verfahren Lasermikrosintern waren bereits umfangreiche Erfahrungen vorhanden, ebenso zum Lasermikrostrukturieren mit ns-Laserquellen. Darauf aufbauend sollten in diese Verfahren neuartige Messprinzipien integriert werden und die Technologien industrietauglicher machen. Zu den Verfahren 3D Lasermikroschneiden von transparenten Substraten, Lasermikropulverauftragschweißen und Lasermikrobearbeitung mit hochrepetierender fs-Laserstrahlung (Lasermikrosintern und Lasermikrostrukturieren) existierten hingegen keine Erfahrungen. Diese Technologiebausteine für das Rapid Microtooling sollten völlig neu entwickelt werden.

Während der Projektlaufzeit wurden von der Firma IPG Photonics erste Monomode-Hochleistungsfaserlaser ($P > 1 \text{ kW}$) entwickelt und 2007 erstmals auf dem Markt angeboten. Damit standen nunmehr völlig neuartige Laserquellen zur Verfügung, welche bei der Antragstellung noch nicht existent waren und auch für die Mikrobearbeitung noch nicht eingesetzt wurden. Das Laserinstitut der Hochschule Mittweida und die kooperierenden Firmen sahen in der Nutzung dieser Quellen eine Chance, sich einen weiteren technologischen Vorsprung bezüglich der Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung zu erarbeiten und diesen in Produkte umzusetzen. Insofern wurde im Rahmen des Projektes ein Fehlbedarf identifiziert und ein Aufstockungsantrag gestellt.

Der daraufhin angeschaffte Monomode-Faserlaser mit einer Leistung von 3 kW war zu der Zeit vor allem für den gezielten Einsatz in der Mikrostrukturierung einzigartig. Das Laserinstitut der Hochschule Mittweida sollte dadurch beste Voraussetzungen haben, seine exzellente Position bei der Lasermikrobearbeitung zum Nutzen der kooperierenden Firmen strategisch weiter zu verbessern. Das Arbeitsprogramm wurde in allen Teilprojekten durch der Aufstockung um die Hochleistungsmikrobearbeitung mit 3 kW Monomode Faserlaser erweitert. Zur weiteren Vertiefung der neuartigen Ergebnisse auf diesem Gebiet wurde das Projekt später verlängert.

Die Unternehmen, mit denen zusammengearbeitet werden sollte, waren am Standort Mittweida: Acsys GmbH (Hersteller von Maschinen zum Lasergravieren und zur Mikrostrukturierung von Werkzeugen), Laservorm GmbH (Hersteller von Lasermaschinen insbesondere für Schweißen und Laserauftragschweißen), Caddental GmbH (bis 2008, plante Errichtung eines Fertigungszentrums zur Herstellung von keramischen Zahninlays mit Lasermikrosintern) und seit 2008 LaserSign (Anbieter von laserbasierten Dienstleistungen); am Standort Chemnitz: 3D-Micromac AG (Hersteller von Lasermikrobearbeitungsmaschinen und speziell Maschinen zum Lasermikrosintern), IVS AG (Software für Lasermikrosintern) und V.G. Kunststofftechnik GmbH (bis 2008, Rapid Prototyping) sowie am Standort Meißen die MicroCeram GmbH (Keramikverarbeiter). 2008 kamen die Firmen DMOS GmbH aus Dresden (Elektronikentwickler), Roth & Rau AG aus Hohenstein-Ernstthal (Hersteller von Photovoltaik-Anlagen) sowie Jenoptik L.O.S aus Jena (Hersteller von Laserquellen) hinzu. Weiterhin sollten die Angebote des Laserinstituts Mittelsachsen e.V. zur Bereitstellung von Know-How und Ressourcen intensiv wahrgenommen werden.

Das Forschungsvorhaben sollte durch die Synergien, die aus der projektbezogenen Kooperation und Koordination der beteiligten Unternehmen sowie der einzelnen Forschungsschwerpunkte erwachsen, getragen werden und – wie sich bereits bei Gemeinschaftsprojekten in der Vergangenheit gezeigt hatte – eine dauerhafte Kultur der Beratung, des Technologieaustausches sowie komplementärer Zusammenarbeit hinterlassen. Diese Zusammenarbeit und Koordination fand z.B. in Form eines aktiven Personalaustauschs ihren Ausdruck. Die Anschaffung von Geräten, welche in mehreren Teilprojekten parallel genutzt werden sollten, führte ebenfalls zu Synergien.

Weiterhin war eine sehr gute Kompatibilität des Ausbildungsprofils der Hochschule zu den Anforderungen an die Nachwuchsforschergruppe gegeben. Es war geplant, durch die Zusammenarbeit mit dieser Gruppe die Basis für den Aufbau eines Masterstudienganges mit Schwerpunkt Lasertechnik / Photonik an der Hochschule Mittweida zu legen.

Das Projekt hatte zusammenfassend zum Ziel, durch die Etablierung der Nachwuchsforschergruppe die Zusammenarbeit zwischen dem Laserinstitut der Hochschule Mittweida und regionalen Firmen und Instituten auszuweiten. Dazu gehörte sowohl die Weiterentwicklung von Technologien die bereits Weltspitzenpositionen hielten als auch die Erforschung von neuen alternativen Verfahren, z.B. Hochrateverfahren mit Monomode-Hochleistungsfaserlaser. Alle Technologien dienten der zukunftssträchtigen schnellen und ultraschnellen Herstellung von Mikroteilen oder Mikrostrukturen mittels Laserstrahlung. Die Technologien sollten nach Projektende möglichst vollständig in der industriellen Produktion umgesetzt werden. Zur Umsetzung der Technologien am Markt sollte ergänzend zu den kooperierenden Firmen eine Dienstleistungsfirma ausgegründet werden.

2 Voraussetzungen

Die Laserforschung hatte zu Projektbeginn am Standort Mittweida bereits eine lange Tradition. In den siebziger Jahren begannen an der Hochschule Mittweida Forschungsaktivitäten zur Nutzung der Laserstrahlung für die Lasermikrobearbeitung. Diese Tradition wurde bis zur Antragstellung erfolgreich weitergeführt, so dass der Standort bereits zu den bundesrepublikanischen Highlights der Lasertechnik zählte, während die Region allgemein noch sehr viel Mühe hatte, ihre wirtschaftliche Strukturschwäche zu überwinden. Zu der anerkannten Leistungsfähigkeit der hiesigen Lasertechnik trug das BMBF – Projekt „InnoRegio – InnoSachs“ wesentlich bei. Während des Projektes wurde auf Anregung von kooperierenden Firmen am Laserinstitut der Hochschule ein für die Region einzigartiges Lasermikrobearbeitungszentrum aufgebaut. Dieses bot Erfolg versprechende Voraussetzungen für den Aufbau einer Nachwuchsforschergruppe im Sinne des Projektantrags.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Projektplan

Laufzeit

Die Laufzeit betrug zunächst 54 Monate, vom 1.4.2006 bis 30.6.2010, und wurde per Antrag auf 60 Monate bis 31.3.2011 verlängert.

Arbeitspakete

Das Projekt war in vier Teilprojekte gegliedert:

1. Lasermikrosintern
2. 3D Lasermikroschneiden
3. Mikropulverauftragschweißen
4. Lasermikrostrukturieren.

Zu jedem Teilprojekt wurde zunächst der Versuchsstand aus vorhandenen und neuen Komponenten aufgebaut. Die Forschungsarbeiten wurden in Absprache mit den Firmen und entsprechend den wissenschaftlichen Erfordernissen strukturiert. Zu den Themen Lasermikrosintern und Lasermikrostrukturieren sind ingenieurtechnische Promotionen in Arbeit. Das durch die Aufstockung hinzugekommene Thema Hochleistungsmikrobearbeitung mit 3 kW Monomode - Faserlaser wurde in alle Teilprojekte integriert. Neu hinzu kamen Untersuchungen zur

5. Oberflächenbearbeitung mit Laserplasma.

Neben den technologischen Themenstellungen wurden parallel auch noch fünf strukturelle Themen, die so genannten Programmkriterien, bearbeitet:

- Beiträge zur Herausbildung eines Technologie- und Wirtschaftsprofils für die Region
- Abstimmung der FuE - Aufgaben mit den kooperierenden Unternehmen
- Personalqualifizierung für die Unternehmen
- Qualifizierung der Mitglieder der Nachwuchsforschergruppe
- Technologieorientierte Aus- und Neugründungen.

Dafür standen keine separaten Mittel zur Verfügung.

Meilensteine

In der Projektlaufzeit waren drei Meilensteine geplant:

1. Meilenstein in 3/2007
 - Workshop mit den kooperierenden Firmen
 - Vorstellung der bis dahin aufgebauten Anlagen
 - Modifizierung des Versuchsplanes entsprechend aktuellen Erfordernissen
2. Meilenstein in 9/2008
 - Statusseminar mit den kooperierenden Firmen und weiteren Interessenten aus der Region
 - Vorstellung der Ergebnisse zur Integration von Messverfahren in das Lasermikrosintern und das Lasermikrostrukturieren
 - Präsentation des Standes der weiteren Untersuchungen
 - Modifizierung des Versuchsplanes entsprechend aktuellen Erfordernissen
3. Meilenstein in 9/2009
 - Öffentliche Präsentation der bis dahin vorliegenden Projektergebnisse im Rahmen eines nationalen Rapid Prototyping Kongress
 - Vorstellung der Verfahren 3D Mikroschneiden und Mikropulverauftragschweißen
 - Vorstellung von Ergebnissen der Verfahren Ultrakurzpulslasermikrosintern und Abtrag mit hochrepetierender fs – Laserstrahlung,

die auch mit zeitlicher Verschiebung durchgeführt wurden.

3.2 Projektmanagement und Ablauf

Das Projekt wurde vom Nachwuchsgruppenleiter mit Unterstützung des antragstellenden Professors koordiniert und geleitet. Zur Projektsteuerung in der Gruppe wurden regelmäßig interne Projekttreffen durchgeführt. Mit den kooperierenden Firmen wurden bedarfsweise bilaterale Treffen sowie zwei Workshops abgehalten. Dabei wurden auch mitarbeitende Studenten einbezogen.

Zur allgemeinen Weiterverbreitung der Projektergebnisse wurden drei Statusseminare sowie Teilprojektpräsentationen auf vier Tagungen des Kooperationspartners 3D-Micromac AG (ISL 2008 bis 2011) durchgeführt.

An den vom BMBF organisierten überregionalen Workshops zu den Innoprofile-Forschungsgruppen wurde aktiv teilgenommen. Die Erfüllung der Programmkriterien des Projektes wurde in drei Evaluations-Workshops diskutiert. Dabei konnten wertvolle Anregungen zur Verbesserung der Umsetzung der Programmkriterien aufgenommen und später umgesetzt werden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

4.1 Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Insgesamt ordnete sich das Thema des Antrages in mehrere technische Makrotrends ein:

- die Lasermaterialbearbeitungsverfahren durchdringen zunehmend mehr Bereiche der Produktion
- der Trend zur Miniaturisierung hält unvermindert an
- die Rapid Prototyping Verfahren entwickeln sich immer mehr zu Rapid Tooling Verfahren.

Als industriell nutzbares generatives Verfahren im Mikrobereich stand damals nur das RMPD - Verfahren der Firma Microtec AG Duisburg zur Verfügung. Der Nachteil des Verfahrens war die eingeschränkte Materialauswahl, da nur UV - härtbare Kunststoffe verarbeitet werden können.

Insofern war der Weiterentwicklung eines einzigartigen Verfahrens (Lasermikrosintern) und der Neuentwicklung von weiteren Verfahren zur schnellen und flexiblen Herstellung von 3D Mikrostrukturen aus Metall, Glas, Keramik und Kunststoffen technisch eine hohe Bedeutung beizumessen. Die Konzentration von verschiedenen Rapid Verfahren an einem Standort sollte zusätzliche Synergien bewirken.

1. Lasermikrosintern

In den letzten Jahren vor der Antragstellung widmeten sich verstärkt Gruppen in China und der Schweiz dem Thema Lasermikrosintern. Chen / Jimin Chen, Xubao Wang, Tiechuan Zuo: The micro fabrication using selective laser sintering micron metal powder, Proc. of SPIE Vol. 5116 (2003), pp 647-651/ untersuchte das Verfahren mit einem frequenzverdoppelten güte-

geschalteten Nd:YAG-Laser. Die Scangeschwindigkeit betrug 1 mm/s bei 10 W Laserleistung. Es wurden Strukturen aus Blei mit einer Stegbreite kleiner 100 µm bei einer Höhe von 2 mm erzeugt. Über den stattfindenden Generierungsprozess wurde nichts berichtet.

Fischer / P. Fischer, H. Leber, V. Romano, H. P. Weber, N. P. Karpatis, C. André, R. Glardon: Microstructure of near-infrared pulsed laser sintered titanium samples, Appl. Phys. A (2003), published online 11.6. 2003/ unternahm sehr umfangreiche werkstoffkundliche Untersuchungen zum Sintern/Schmelzen von Titanpulver. Zum Einsatz kam ein gütegeschalteter Nd:YAG – Laser ($P_L = 3 \text{ W}$, $f = 5 \text{ kHz}$, $v = 1 \text{ mm/s}$). Sinterergebnisse in Form von Körpern wurden nicht präsentiert.

Das Lasermikrosintern von nano-/mikroskaligen Metall- und Keramikpulvern bei Schichtdicken kleiner 10 µm und Auflösungen unter 30 µm war damals nur durch über 20 Veröffentlichungen aus dem Laserinstitut der Hochschule Mittweida wissenschaftlich belegt. Zum Ultrakurzpulslasersintern existierte damals nur ein bestätigtes Patent des Antragstellers.

Im Rahmen des vom BMBF/PFT geförderten Verbundprojektes „Vakuum SLS“ (FK 02PP1110, Forschung für die Produktion von morgen, Projektträger FZK, Außenstelle Dresden) wurde an der Hochschule Mittweida die neuartige Technologie zur schnellen Erzeugung von freigeformten hochaufgelösten 3D Mikroteilen - das Lasermikrosintern - entwickelt. Es erreicht - heute noch weltweit einmalig für ein Selektives Lasersinter-Verfahren - eine Auflösung von 10 µm bei Schlitzern, 20 µm bei Stegen und < 30 µm bei 3D Konturen (Abb. 4.1.1.1). Bei der Technologie wird das Handling der nanoskaligen Pulver und der Lasersinterprozess in einer Vakuumkammer durchgeführt. Hierzu wurden mehrere neuartige Versuchstände aufgebaut (Abb. 4.1.1.2) und jeweils neuartige patentierte Verfahren entwickelt. Durch die Verwendung von mehreren drehbar gelagerten Ringrakeln können zukünftig gezielt Teile mit Materialgradienten oder Wechselschichten und daraus resultierend völlig neuartigen Eigenschaften erzeugt werden.

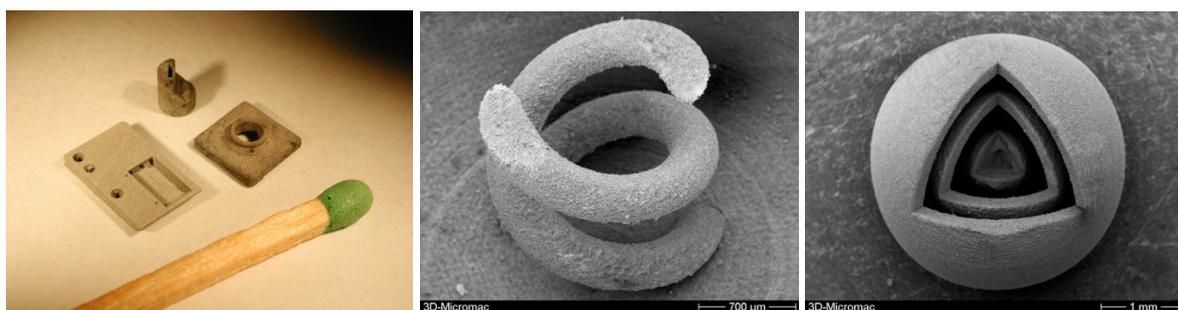


Abb. 4.1.1.1: Mikrobauteile und Teststrukturen

Das Lasermikrosintern erlaubt wahlweise die feste Verbindung der Mikroteile mit dem Substrat oder die lose Anbindung an eine Bauplattform. Das Lösen der Teile erfolgt einfach mit Ultraschall. Die generierten Mikroteile waren bedingt durch das Verfahren spannungsfrei. Es wurden Teile und 3D Strukturen aus W, W/Cu, W/Al, Mo, Cu, Ti, Ag, Al und diversen Keramikmischungen generiert. Die Technologie lässt sich also sowohl für hoch- als auch für niedrigschmelzende Materialien anwenden. Erstmals waren auch Hinterschneidungen im Mikrobereich möglich.

In der Zeit der Antragstellung wurde die Anwendbarkeit des Verfahrens für den Feinbereich (Auflösung ca. 60 μm) mit höheren Baugeschwindigkeiten und ohne Vakuum demonstriert. Erste Erprobungen eines modifizierten Verfahrens zur Vorderseitenkontaktierung von Solarzellen verliefen ebenfalls erfolgreich.

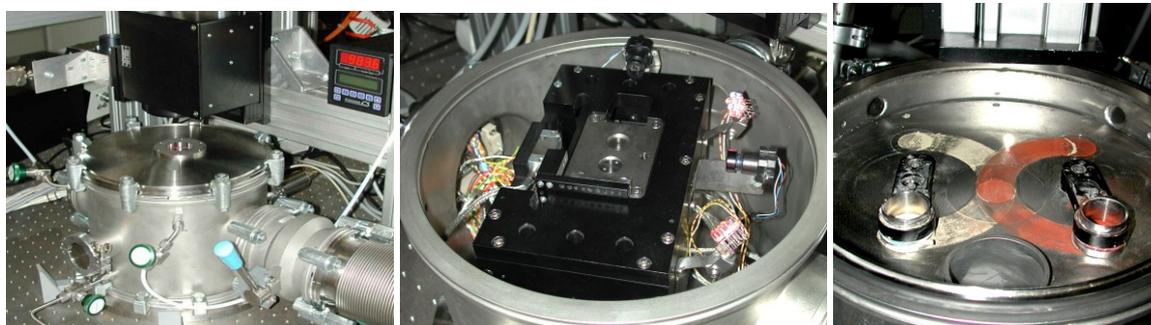


Abb. 4.1.1.2: Versuchsaufbauten zum Lasermikrosintern

Die Ergebnisse wurden international veröffentlicht, ausgezeichnet (Dick Aubin distinguished Paper Award, Chicago 2003; Euromold Award in Silber, Frankfurt 2004; Industrieverein Sachsen – Förderpreis „Richard Hartmann“ 2005 und Innovationspreis Lasertechnik, Aachen 2006) und umfangreich patentrechtlich geschützt.

Die weltweit erste Maschine zum Mikrosintern wurde von der 3D-Micrmac AG auf der Euromold 2005 vorgestellt. Diese Maschine der ersten Generation war jedoch noch nicht für eine automatisierte Produktion geeignet, da in dieser Maschine z.B. keine Messfunktionen integriert waren.

Das Lasermikrosintern sollte durch das erste Teilprojekt zur Untersuchung von Messprinzipien für das Verfahren in Richtung Industrietauglichkeit weiterentwickelt und hinsichtlich der Auflösung durch das Ultrakurzpulslasersintern sinnvoll ergänzt werden.

Ultrakurzpulslaserstrahlung wurde in der Materialbearbeitung bis zur Antragstellung fast ausschließlich zum Abtragen und Bohren eingesetzt. Eine Ausnahme bildete die fs - Stereolithografie (LZ Hannover, Chichkov), bei der aber nur spezielle Harze verarbeitet werden können.

Die angestrebte Innovation bestand in der weltweit erstmaligen Realisierung und wissenschaftlichen Untersuchung eines Ultrakurzpulslasersinterprozesses unter Verwendung von Nanopartikeln. Beim selektiven Sintern mit Femtosekundenpulsen wurden Effekte erwartet, mit denen die generierende – d.h. nichtablative – Erzeugung von Körpern mit hoher Strukturauflösung und ungewöhnlichen Materialeigenschaften möglich sein sollte. Zu diesen Effekten zählten:

- der Strahlungsdruck von fokussierter Femtosekundenlaserstrahlung auf die Nanopartikel,
- die vom Puls zeitlich getrennte Dissipation der absorbierten Energie.

Diese Effekte sollten sich vorteilhaft auf die Erzeugung von Sinterkörpern mit Femtosekundenlaserstrahlung, insbesondere die erzielbare Auflösung, auswirken.

Die fs - Laserstrahlung besitzt die Eigenschaft, Strahlungsdrücke von über 10 kbar bei niedrigen Pulsenergien / Fluenzen unterhalb der Ablationsschwelle erzeugen zu können. Beim klassischen Sinterprozess wird die Sintergeschwindigkeit durch die Sintertemperatur und den Sinterdruck bestimmt. Die Sintertemperatur ist durch die Schmelztemperatur des zu sinternden Pulvers limitiert. Der Sinterdruck hingegen kann stark erhöht werden. Beim heißostatischen Pressen wird z.B. mit Drücken bis 3 kbar gearbeitet. Bisher konnte beim Lasersintern aus technischen Gründen kein hoher Druck angewandt werden. Durch Verwendung von Femtosekundenlaserstrahlung war dies jedoch möglich.

Das neuartige Verfahren sollte somit bei Vermeidung von Aufschmelzungen eine äußerst präzise und flexible Generierung von 3D Mikro/Nanobauteilen aus nahezu allen Materialien erlauben. Das Selektive Lasermikrosintern mit ns - Pulsen war in der Auflösung aus physikalischen Gründen durch den immer vorhandenen Schmelzanteil und die Verdampfung auf einen Wert von ca. 20 µm limitiert. Überwunden werden könnte diese physikalische Grenze nur durch ein Selektives Lasersinterverfahren mit geringfügigem Schmelzanteil und ohne Verdampfung, welches wiederum nur mit fs-Pulsen realisiert werden kann. Die wissenschaftliche Bedeutung dieses Projektteiles war als äußerst hoch einzuschätzen, da weltweit keine weitere Forschergruppe in der Lage war, Nanopulver in Schichtdicken unter 1 µm zu rakeln. Dies war aber zwingend notwendig, um das Ultrakurzpulslasersintern zu realisieren. Der Entwicklungsvorsprung bei der Miniaturisierung des SLS - Verfahrens sollte am Standort Mittweida weiter ausgebaut werden.

2. 3D Lasermikroschneiden

Das 3D Lasermikroschneiden war aus der Medizin bekannt. Dabei wurden mit einem fs-Laser z.B. Zellen aus Gewebe herausgeschnitten oder es wurde für die Laserkorrektur der Fehlsichtigkeit die Hornhaut definiert abgetrennt (Femto-LASIK). Anwendungen in der Produktfertigung oder Materialbearbeitung waren nicht bekannt.

Voraussetzung für das Verfahren ist, dass die zu bearbeitenden Materialien für die verwendete Laserstrahlung eine relativ hohe Transparenz aufweisen, damit im Inneren des Materialblocks der Fokus des Laserstrahls und damit eine sehr hohe Leistungsdichte in einem sehr kleinen Volumen erzeugt werden kann. Die Materialien könnten z.B. Gläser, Kunststoffe oder spezielle transparente Keramiken sein. Die 3D Kontur sollte mit dem Laserstrahl linienförmig abgefahren und gezielt Cracks im Material erzeugt werden. Durch eine genügend hohe Crackdichte kann der Kern von der Hülle abgetrennt werden. Im Unterschied zu einem gesinterten Produkt besitzt das auf diese Weise ausgeschnittene Mikrobauteil die Eigenschaften des massiven Materials.

Anwendung finden sollte das neuartige Verfahren bei der Herstellung von mikrostrukturierten 3D Teilen, z.B. von keramischen Inlays, oder bei der Herstellung von mikrostrukturierten Kavitäten, wie sie z.B. für das integrierte Mikrolabor aus Quarzglas benötigt

werden. Zu beachten war die Schnittfolge, damit hinterschnittene Teile problemlos abgetrennt werden können. Hierzu sollten einfache industriell anwendbare Algorithmen gefunden werden.

3. Lasermikropulverauftragschweißen

Das Lasermikropulverauftragschweißen war zu Projektbeginn ein noch junges Verfahren. Erste Untersuchungen hierzu fanden am LZ Hannover (Becker) statt.

Im Rahmen des Projektes sollte eine eigene Verfahrensvariante untersucht werden. Unter Nutzung der vorhandenen Erfahrungen vom Lasermikrosintern sollte die Auflösung des Verfahrens ebenfalls auf besser 30 µm gebracht werden. Durch die hohe Auflösung sollten perspektivisch neuartige Anwendungen für den Kooperationspartner Laservorm erschlossen werden wie z.B. die schnelle Herstellung von freigeformten dünnwandigen Teilen mit hohem Aspektverhältnis (z.B. Mundstücke für Instrumente), die großflächige Mikroverdrahtung von freigeformten Bauteilen (z. B. medizinische Instrumente) oder die großflächige Mikrostrukturierung von Werkzeugen (z.B. Prägwerkzeuge).

4. Lasermikrostrukturieren

Die Lasermikrostrukturierung wurde zur Antragstellung bereits seit über 30 Jahren weltweit intensiv untersucht. Es gab es eine große Breite an Verfahrensvarianten. Im Rahmen des Projektes sollte gemeinsam mit dem Kooperationspartner Acsys Lasertechnik an der Qualifizierung des Abtragverfahrens, das von ihm bisher überwiegend zur Lasergravur verwendet wurde, für die Mikrostrukturierung von Werkzeugen geforscht werden. Dazu sollte die Präzision wesentlich erhöht werden. Da das Werkzeug Laserstrahl bei serieller schichtweiser Bearbeitung mit ns - Pulsen nicht hinreichend genau arbeiten kann, sollten neuartige Messprozesse integriert werden. Hierzu existierten innovative Ansätze, welche im Rahmen des Projektes untersucht werden sollten. Alternativ sollte sich die Präzision erhöhen lassen, wenn das abgetragene Volumen pro Puls verkleinert wird. Dies ist der Fall beim Einsatz von fs - Lasern. Diese Laser standen jedoch bis zur Antragstellung nur mit Pulsfrequenzen im niedrigen kHz-Bereich zur Verfügung. Deshalb und wegen des hohen Anschaffungspreises konnte das Verfahren noch nicht industriell genutzt werden. Die seit 2005 zur Verfügung gestandenen fs - Laser mit Frequenzen im MHz-Bereich und mittleren Leistungen von 20 W eröffneten völlig neue Möglichkeiten für die industrielle Anwendbarkeit des Abtragverfahrens mit fs-Pulsen. Gleichzeitig war die wissenschaftliche Bedeutung als sehr hoch einzuschätzen, da bei Anwendung der hochrepetierenden fs-Laserstrahlung mit neuartigen Abtragmechanismen zu rechnen war. Zusätzlich sollten während dem und durch das Abtragverfahren gezielt die entstehenden Oberflächen hinsichtlich Rauheit und Härte beeinflusst werden.

5. Aufstockungsantrag Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung

Für die Lasermikrobearbeitung werden in der Regel Festkörper-Laser mit Monomode-Strahlqualität eingesetzt. Bis Ende der neunziger Jahre war bei lampengepumpten Lasern

eine maximale Monomode-Laserleistung von 30 W verfügbar. Dies führte zu einer Begrenzung der Leistungsfähigkeit der Mikrobearbeitungsverfahren auf relativ kleine Flächen. Ein erster kleiner Leistungssprung trat durch das Pumpen der Laser mit Diodenlasern auf. Damit waren Monomode-Leistungen bis 100 W verfügbar. Ein riesiger Leistungssprung erfolgte mit der Entwicklung von Monomode-Hochleistungsfaserlasern. 2002 wurde erstmals vom Überschreiten der 1 kW-Marke im Labor berichtet. Die Idee zur Realisierung einer großflächigen Mikrobearbeitung entstand erstmals 2006, als bekannt wurde, dass die Firma IPG Photonics Faserlaser mit Monomode-Strahlqualität bis zu einer Leistung von 3kW bereitstellen kann. Ein brauchbares Konzept zur Umsetzung der Strahlleistung in einen entsprechenden Flächenabtrag bzw. Sinterprozess wurde Anfang 2007 entwickelt. Daraus leitet sich der Aufstockungsbedarf für das Projekt ab. In diesem sollte ein Monomode Hochleistungsfaserlaser weltweit erstmals zur Mikrobearbeitung eingesetzt werden. Dabei sollte der Laser nicht gepulst betrieben werden, wie es sonst üblich war, sondern im cw - Regime. Die Laserleistung von 3 kW entsprach einem gütegeschalteten Laser mit einer Pulsenergie von 1mJ bei einer Pulsdauer von 330 ns; dies stellten übliche Werte für die die Lasermikrobearbeitung dar. Nach einer ersten Abschätzung würde eine Scangeschwindigkeit von ca. 12.000 m/min benötigt, um die gesamte Leistung umsetzen zu können. Dies sollte erreicht werden, indem zu einem „normalen“ Scanner (Geschwindigkeit max. 300 m/min) ein zusätzlicher Polygonspiegelscanner (Einsatz z.B. im Laserdrucker) beigelegt wurde. Die Bearbeitung sollte ähnlich wie bei der Bildröhre zeilenweise erfolgen. Eine Fläche von 10x10cm² sollte sich in ca. 2 s bearbeiten lassen, ein Quadratmeter in 3,3 min. Es wurde eingeschätzt, dass das neuartige Verfahren patentrechtlich geschützt werden kann.

Stand der Technik in den Teilprojekten:

1. Lasermikrosintern

Die Bauraten beim Lasermikrosintern lagen zu der Zeit beim hochaufgelösten Verfahren bei 30 mm³/h und beim feinaufgelösten Verfahren bei 300 mm³/h. Durch Einsatz des Hochleistungsfaserlasers mit Polygonscanner sollten nach einer ersten Abschätzung bis zu 72.000 mm³/h erreicht werden können! Problematisch war die exakte Führung und zeitliche Steuerung des Laserstrahles. Hierzu sollte erstmals eine Lösung mit zwei in Reihe geschalteten Modulatoren aufgebaut werden.

2. 3D Lasermikroschneiden

Bei dem Projektteil sollte das Aufgabenspektrum durch den Hochleistungsfaserlaser erweitert werden. Insbesondere war die an die bisherige Aufgabenstellung inhaltlich anschließende Trennung von sprödharten Materialien wie Glas, Keramik und Silizium durch definierte Spannungsinduzierung interessant.

Ein Hochleistungsverfahren zum rückstandsfreien Trennen von Silizium hätte weltweite Bedeutung für die Solar- und die Mikroelektronik - Industrie. Zum Trennen von Silizium mit einem gütegeschalteten Nd:YAG-Laser lagen Veröffentlichungen vor (F. Fukuyo, K. Fukumitsu and N. Uchiyama "Stealth dicing technology and applications", Proc. 6th Int.

Symp. Laser Precision Microfabrication, 2005; E. Ohmura , F. Fukuyo , K. Fukumitsu and H. Morita "Internal modified-layer formation mechanism into silicon with nano second laser", J. Achievement Materials Manufacturing Eng., vol. 17, p.381 , 2006).

Bei transparenten Materialien musste immer mit einem Rückreflex unter Nutzung von Mehrfachreflexionen im Material gearbeitet werden (C. Hermanns "Laser separation of flat glass", Proc. 63th Laser Materials Processing Conf., p. 105 , 2005). Wenn es gelang, unter Nutzung der beim Faserlaser vorhandenen hohen Intensität und der gleichzeitig hohen Energie ein neues Schneidverfahren zu entwickeln, würde dies einen enormen Fortschritt darstellen.

Hinzu kam das Hochgeschwindigkeits-Schneiden von dünnen Folien (Metall, Keramik, Verbundmaterial). Dies sollte materialangepasst sowohl mit Scanner als auch mit Schneidoptik erfolgen.

3. Lasermikropulverauftragschweißen

Die schnelle Erzeugung von mikrostrukturierten aus Pulver aufgetragenen Flächen sollte durch den Hochleistungsfaserlaser realisiert werden. Hierzu musste ein neuartiges Konzept für die Pulverzufuhr erarbeitet werden. Ein weiteres neues Feld war die Erzeugung von Leitbahnen z.B. in schnellen Durchlaufprozessen. Dies wäre mit dem Hochleistungsfaserlaser erstmals möglich. Der Prozess sollte an der neu aufzubauenden Anlage mit hochdynamischen Linearachsen nachgestaltet werden.

Zusätzlich sollte auch das Hochgeschwindigkeitsmikroschweißen untersucht werden. Hier lagen bereits Ergebnisse des ILT Aachen zum Hochgeschwindigkeitsschneiden- und schweißen mit CO₂-Laser vor (Kai-Uwe Preissig, Dirk Petring, Gerd Herziger: High-speed laser cutting of thin metal sheets, Proc. SPIE 2207, 96, 1994). Diese sollten ausgewertet und auf unsere Prozesse entsprechend übertragen werden.

4. Lasermikrostrukturieren

Bei der 2,5D Lasermikrostrukturierung sollte der Einsatz des Hochleistungsfaserlasers enorme Geschwindigkeitssteigerungen erbringen. Bei einer relativ groben Oberflächenstrukturierung mit einer Strukturgröße ca. 150 µm wurde mit normaler Lasertechnik (Gravierlaser) eine Flächenrate von 2 cm²/s realisiert, schon damit war das Verfahren ökonomisch sinnvoll. Mit dem Faserlaser wären ca. 50 cm²/s bei wesentlich besserer Auflösung realisierbar. Am Institut lagen bereits Anfragen zur hochaufgelösten Oberflächenstrukturierung vor, die technisch lösbar waren aber wegen zu langen Bearbeitungszeiten nicht industriell umgesetzt werden konnten.

Bei der 3D Strukturierung könnte bei einer abzutragenden Schichtdicke von 5 µm eine Volumenrate von 1,5 cm³/min erreicht werden. Dies wäre insbesondere bei harten Materialien wie Keramik oder Hartmetall ein ökonomisch interessanter Wert. Auch für dentale Anwendungen wäre das Abtragen von z.B. ZrO für Brückengerüste bei diesen Abtragleistungen relevant.

Neben der Lasermikrostrukturierung wären bei den erreichbaren Bearbeitungsgeschwindigkeiten auch Oberflächenverfahren wie Materialmodifizierung (Umschmelzen, Amorphisieren z.B. derzeit für Zylinderlaufbahnen angewendet), Nanostrukturierung (laserinduzierte Ripple) und Aktivierung von Interesse.

Der Hochleistungsfaserlaser sollte zusätzlich die Möglichkeit zur indirekten Bearbeitung mit einem Laserplasma bieten. Im Fokus können bei einer Fokussierung auf einen Durchmesser von 20 μm dauerhaft Spitzenintensitäten von über 10^9 W/cm^2 erreicht werden. Bei der Mikrostrukturierung von Glas wurden durch Ionen - Sputterung aus dem Laserplasma hervorragende Ergebnisse (Auflösung, keine Spannungen) erzielt.

6. Verlängerungsantrag Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung

Durch die zukünftig industriell nutzbare ultraschnelle Ablenkung (Geschwindigkeit $\gg 2.000 \text{ m/min}$) von Laserstrahlung sollten Produktivitätssteigerungen in vielen technologischen Bereichen möglich werden. Schon in der Vergangenheit gab es punktuell Aktivitäten zur Nutzung von Hochrateprozessen. Pionier auf dem Gebiet war das Fraunhofer ILT in Aachen. Hier wurden in den 90iger Jahren Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsschneiden von Elektroblechen mit CO_2 -Lasern durchgeführt. Die durch schnelle Bewegung von Bändern erzielte Relativgeschwindigkeit lag bei über 100 m/min . Schon damals wurde deutlich, dass sich die Hochgeschwindigkeitsprozesse aufgrund veränderter Plasmaausbildung sehr komplex gestalten. Seit Ende der neunziger Jahre wurden am Fraunhofer IWS Dresden Untersuchungen zum Remote Schweißen und seit Monomode Hochleistungsfaserlaser verfügbar sind auch zum Remote-Schneiden mit Galvo-Scannern durchgeführt. Die Untersuchungen waren überwiegend anwendungsbezogen ausgerichtet. Die maximal applizierten Geschwindigkeiten lagen unter 2.000 m/min . Japanische Forschergruppen hatten bis dahin lediglich Grundlagenergebnisse zur Applikation von Monomode-Hochleistungsfaserlaserstrahlung bis zu einer Leistung von 1 kW veröffentlicht.

Die Forschung zur Hochratelaserbearbeitung, vor allem im Mikrobereich, begann sich seit 2009 zu formieren. Dies war in den erst seit dieser Zeit verfügbaren dafür notwendigen Hochleistungslaserquellen (Ultrakurzpuls und/oder Monomode-Hochleistungslaser) begründet. Bei den Monomode-Laserquellen (Faserlaser, Scheibenlaser) waren deutsche Laseranbieter (IPG, Rofin Sinar, Jenoptik, Trumpf) weltweit führend, bei den Ultrakurzpulsquellen gibt es weltweit zahlreiche Anbieter im niedrigen Leistungsbereich bis 20W , wobei sich deutsche Firmen (Lumera, Amphos, activefiber) und Forscher (Prof. Tünnermann, Fraunhofer IOF Jena) die Spitzenstellung bei Hochleistungslaserquellen mit Leistungen größer 20W erarbeitet hatten. Die Nachwuchsforschergruppe hatte sich mit international publizierten Untersuchungen zum Hochrateschneiden mit cw-Monomode-Faserlaser und zur Lasermikrostrukturierung mit hochrepetierender fs-Laserstrahlung eine sehr gute Ausgangsbasis in dem Forschungsfeld verschafft. Es gab kein weiteres uns bekanntes nationales und internationales Forschungsinstitut, das sich so explizit dem Thema verschrieben hatte. Hochrateprozesse wurden bisher eher industriegetrieben entwickelt und realisiert. Es gab zwar zahlreiche Forschungsaktivitäten zur Lasermikro- und Nanostrukturierung mit Laserstrah-

lung, die insbesondere von der Mikroelektronik, der Mikrosystemtechnik und der Solartechnik getrieben wurden. Aber die konsequente Fokussierung auf Forschung zu schnellen und ultraschnellen Laserverfahren zur Nutzung im Mikrobereich war uns nicht bekannt. Insofern besaß die Nachwuchsforschergruppe „Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren“ Exklusivität.

Insbesondere zur Erzielung von höchsten Bearbeitungsgeschwindigkeiten wurde im Rahmen des Projektes eine neuartige Hochleistungs-Laserquelle in Form eines 3kW- Single-Mode Faserlasers in eine bisher weltweit einzigartige selbst aufgebaute Mikrobearbeitungsanlage integriert. Die Applizierung von sonst für die Makrobearbeitung üblichen Laserleistungen von über 1 kW für die Mikrobearbeitung war ein Alleinstellungsmerkmal der Nachwuchsforschergruppe. Deshalb gelang es auch relativ schnell, neue Kontakte zu interessierten Forschungseinrichtungen und Firmen zu knüpfen. Das Laserinstitut der Hochschule Mittweida und infolge die kooperierenden Firmen sahen in der Nutzung dieser Laseranlage eine Chance, sich einen weiteren technologischen Vorsprung bezüglich der Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung zu erarbeiten und diesen in Produkte umzusetzen. Zum Aufbau der Anlage wurde ein Patent erteilt.

Weiterhin hatte sich herausgestellt, dass es auch für hochrepetierende Ultrakurzpulslaser zwingend notwendig war, ultraschnelle Ablenkverfahren einzusetzen, da sonst die hohe mittlere Leistung der Laser nicht in adäquate qualitativ hochwertige Bearbeitungsergebnisse umgesetzt werden konnte. Bei zu großem Pulsüberlapp kam es zu Aufschmelzeffekten wie bei der Applikation von cw-Laserstrahlung. Perspektivisch werden fs - Laserleistungen von 1 kW bei Frequenzen von 100 MHz zur Verfügung stehen! Für solche Laser sind ultraschnelle Scanner unabdingbar. Als Ergänzung zu den Polygonspiegelscannern können partiell auch kleine und preiswerte Resonanzscanner für die ultraschnelle Strahlablenkung eingesetzt werden. Nach entsprechend geleisteter Entwicklungsarbeit dürften ebenso optische Modulatoren für die Aufgabe geeignet sein.

Das Vorhaben hatte insgesamt in seiner Mischung aus industriell orientierter Grundlagenforschung und angewandter Forschung hohe technische und wissenschaftliche Bedeutung. Es sollte den kooperierenden Firmen kurzfristig die Weiterentwicklung ihrer Produkte und langfristig völlig neue Produkte ermöglichen. Durch die gemeinsame Ausrichtung aller Teilprojekte auf die schnelle und flexible Herstellung von 3D Mikrostrukturen, teilweise mit alternativen Technologien, war mit einem umfangreichen technologischen Wissenszuwachs zur optimalen Anwendbarkeit der einzelnen Technologien auf spezielle Problemstellungen zu rechnen. Von der Konzentration der genannten komplementären Technologien an einem Standort war daher eine hohe Entwicklungs- und Produktionseffizienz zu erwarten.

4.2 Fachliteratur

Bei der wissenschaftlichen Bearbeitung des Projektes wurde mit einem großen Umfang an Fachliteratur gearbeitet. Diese wurde sowohl über die Hochschulbibliothek als auch über online-Datenbanken beschafft. Ein Großteil der aktuellsten Literatur war der Forschungsgruppe durch die Teilnahme an internationalen Tagungen zugänglich. In den Veröffentlichungen der Forschungsgruppe wurde Sekundärliteratur umfangreich zitiert.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde intensiv mit den Kooperationspartnern zusammen gearbeitet. Dies waren Acsys Lasertechnik GmbH, Laservorm GmbH, 3D-Micromac AG, IVS AG, Microceram GmbH, Laserinstitut Mittelsachsen e.V., V.G. Kunststofftechnik GmbH (bis 2008), Caddental GmbH (bis 2008) und seit 2008 LaserSign, DMOS GmbH, Roth & Rau AG und Jenoptik L.O.S GmbH. Darauf wird detailliert in Pkt. 6.7 eingegangen.

Durch die im Projekt aufgebaute Kompetenz gelang es, die Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz und dem Fraunhofer Institut ENAS zu vertiefen und als Folge dessen an großen Verbundprojekten (nanett, Gecko) teilzunehmen.

Durch Wissenschaftler austausch konnte eine intensive Beziehung zur Uni Manchester aufgebaut werden.

6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

6.1 Arbeitspaket 1 – Lasermikrosintern

6.1.1 Ziel des Arbeitspaketes

AP 1.1 Integration von neuartigen Messprinzipien in das Verfahren

Modifizierung eines vorhandenen Versuchstandes

An der Hochschule Mittweida waren mehrere Versuchsstände für das Lasermikrosintern vorhanden. Zur Integration von Messtechnik in die Sinterkammern sollten diese modifiziert werden, um den nötigen Platz für die Sensoren zu schaffen. Anschließend waren die entsprechenden Sensoren in die Sinterkammern zu integrieren. Weiterhin sollte die elektronische Anbindung realisiert werden.

Höhenmessung

Ziel der „insitu“-Höhenmessung war es zum einen abweichende Bauteilhöhen des zu generierenden Körpers während des Prozesses zu detektieren und den höhenmäßigen Gleichlauf der Rakel für einen gleichmäßigen Pulveraufzug zu überwachen. Hierfür sollte der Höhenmesser während der Bearbeitung (nach einer Sinterschicht) über das Bauteil bewegt werden, um die aktuelle Höhe des Bauteils oder gegebenenfalls Abweichungen detektieren zu können. Für die Höhenmessung sollten verschiedene vorhandene und neu anzuschaffende Sensoren und damit Verfahren erprobt werden. Dazu waren entsprechende Versuchsreihen durchzuführen. Es sollte der Einfluss verschiedener Pulverdichten und gesinterter Rauheiten auf die unterschiedlichen Messprozesse untersucht werden. Das geeignetste Verfahren war zu bestimmen.

Vertikale Messung

Für die vertikale Messung zum Beispiel der Bauteilabmessungen im Pulverbett sollten ebenfalls verschiedene Sensoren erprobt werden. Dazu waren ebenfalls entsprechende Versuchsreihen bei verschiedenen Pulverdichten und gesinterter Rauheiten durchzuführen. Es sollte ein für den industriellen Einsatz geeignetes Verfahren entwickelt werden.

Bauteildichtemessung

Für die Bauteildichtemessung bei definierten Pulverqualitäten waren ebenfalls verschiedene Verfahren anzuwenden. Die gesinterte Bauteildichte sollte nach dem Prozess bestimmt werden. Weiterhin sollte untersucht werden, ob der Grad der optischen Streuung der Bauteiloberfläche mit der Bauteildichte korreliert. Bei Bedarf sollte eine Kombination aus beiden Messwerten genutzt werden, um die Bauteildichte bestimmen zu können.

Diese Messung war wichtig, um perspektivisch Bauteile mit Dichtegradienten oder Dichtesprüngen (z.B. Bauteil mit integriertem Filter) bauen zu können.

Messung Prozessstabilität

Die Messung der Prozessstabilität war für einen industriellen Fertigungsprozess zwingend notwendig. Beim Laserschweißen z.B. wird dies über eine Kontrolle des Prozessplasmas realisiert. Mit entsprechender Auswertungs- und Steuertechnik sollten während des Sinterprozesses auftretende Effekte als die Signalquellen zur Steuerung und Justierung des Verfahrens benutzt werden. In Auswertung der Untersuchungen sollte das geeignetste Verfahren ausgewählt und weiter optimiert werden. Erste Konzepte zur Einbindung der Messwerte in die Prozesssteuerung waren zu erarbeiten.

Ermittlung der Auflösungsgrößen

Es sollten die Auflösungsgrößen der Messverfahren der einzelnen Messungen bestimmt werden. Dies war für die industrielle Anwendbarkeit der Verfahren sehr nützlich. Dabei war zu untersuchen, inwieweit die Grenzen physikalisch oder technisch bedingt sind.

Nachweis der Stabilität der Messungen

Für die spätere Anwendbarkeit der Messverfahren waren die statistischen Fehlergrenzen zu bestimmen. Hierzu sollten mit den favorisierten Verfahren längere Messprozesse durchgeführt und die Messdaten entsprechend ausgewertet werden. Bei ausreichender Stabilität der Messverfahren können diese zur Anwendung in industriellen Maschinen von den Industriepartnern weiterentwickelt werden.

Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens

Im Rahmen der Teilaufgabe des Projektes sollte ein konzeptionell neu entwickeltes integriertes Messverfahren erstmals direkt aufgebaut und in das Verfahren implementiert werden. Dazu war zunächst eine Entwicklung bezüglich der anzufertigenden mechanischen, optischen und elektronischen Komponenten durchzuführen. Anschließend sollte das Verfahren realisiert und wissenschaftlich charakterisiert werden.

Optimierung der Werkstoffeigenschaften (Thermische Nachbehandlung)

Das Ziel der Untersuchung war, die Materialeigenschaften von Sinterkörpern, die sich aus den Prozesseigenschaften (periodischer, kurzzeitiger, sehr hoher Energieeintrag; hohes, schlecht kontrollierbares Temperaturregime im Material; sehr hohe Abkühlraten) ergeben, durch eine thermische Nachbehandlung zu optimieren.

Einige Sinterprodukte besitzen aufgrund der sehr hohen Abkühlraten nach der Bestrahlung eine höhere Sprödigkeit, vermutlich eine höhere Härte und eine geringere Festigkeit gegenüber dem Vollmaterial. Bei mehrkomponentigen Pulvern oder beim Reaktionssintern findet eine unvollständige Materialumwandlung während des Sinterprozesses statt, da vermutlich die Reaktionszeit für die Herstellung eines Diffusionsgleichgewichtes zu gering ist. Anhand definierter Pulvermischungen aus Zink und Kupfer sollte untersucht werden, inwiefern durch Sintern und Tempern definierte Mischkristallphasen bzw. intermetallische Phasen generierbar sind. Dafür wurden Pulvergemische definierter Zusammensetzung anhand des Zink-Kupfer-Phasendiagramms gewählt.

Sintern von keramischen Materialien

Carbide

Ziel der Untersuchungen war es, das Verhalten von Metallcarbiden im Sinterprozess zu analysieren. Nach Bestätigung der Phasenreinheit der zu verwendeten Carbide sollten Sinterkörper generiert werden. Eine Analyse sollte klären, ob es sich um ein phasenreines Sinterprodukt handelt oder ob die Verfestigung nur über die Zersetzung der Carbide und einer damit einhergehenden Verschmelzung der gebunden Metalle / Halbmetalle stattfindet.

Siliziumdioxid

Es sollte untersucht werden, ob es als Alternative zum Lasermikrosintern von Keramik mit Wellenlängen < 1000 nm auch möglich ist, mit einem NIR-Laser in einem reaktiven Sinterprozess SiO_2 -Keramik aus SiO zu generieren.

AP 1.2 Ultrakurzpulslasermikrosintern

Es sollte weltweit erstmalig ein Ultrakurzpulslasersinterprozesses unter Verwendung von Nanopartikeln realisiert und wissenschaftlich untersucht werden. Dazu sollte zunächst ein neuer Versuchstand mit einem hochrepetierenden fs-Laser aufgebaut werden. Beim selektiven Sintern mit Femtosekundenpulsen konnten Effekte erwartet werden, mit denen die generierende - d.h. nichtablative - Erzeugung von Körpern mit hoher Strukturauflösung und ungewöhnlichen Materialeigenschaften möglich werden sollte. Zu diesen Effekten zählten der Strahlungsdruck von fokussierter Femtosekundenlaserstrahlung auf die Nanopartikel und die vom Puls zeitlich getrennte Dissipation der absorbierten Energie. Das neuartige Verfahren sollte somit bei Vermeidung von heißen Aufschmelzungen eine äußerst präzise und flexible Generierung von 3D Mikro/Nanobauteilen verschiedener Materialien (z.B. Metall, Keramik, Kunststoff) erlauben.

Zur Einordnung und Interpretation der erhaltenen Ergebnisse waren Vergleichsuntersuchungen mit einem cw-Laser geplant. Damit sollte untersucht werden, welche Effekte von der Anwendung der hochrepetierenden fs-Laserpulse und der dadurch bedingten hohen Intensität/Fluenz während des Pulses herrühren und welche Effekte durch die Einbringung der Streckenenergie in den Sinterprozess hervorgerufen werden.

AP 1.3 Hochleistungslasermikrosintern

Bei hoher applizierter Laserleistung sollte für das Lasermikrosintern eine hohe Prozessgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Auflösung realisiert werden. Dazu musste ein neuer Versuchstand aufgebaut werden. Die hohe Strahlleistung konnte nur durch sehr kurze Einwirkzeiten, wie sie ein ultraschneller Polygonspiegelscanner realisieren kann, auf das Pulverbett gebracht werden. Dazu war der Aufbau einer völlig neuen Anlage, die auch für andere Mikrostrukturierungsprozesse einsetzbar sein sollte, notwendig. Insbesondere die Strahlführung und Ansteuerung erforderten völlig neue Herangehensweisen. Durch die Erhöhung der Scangeschwindigkeit und eine Verringerung der Rakelzeit sollten wesentlich höhere Bauraten erreichbar sein. Dabei sollte die hohe Auflösung der Lasermikrosinter-technologie erhal-

ten bleiben. Hierfür sollte in dem Versuchsaufbau eine neuartige ultraschnelle Ansteuerung für die Strahlschaltung zur Wirkung kommen. Mit einer enormen Steigerung der Prozessgeschwindigkeit durch die Applikation von bis zu 3 kW Strahlleistung sollten sich neue Anwendungsfelder für das Lasermikrosintern erschließen lassen.

Das Ziel bestand unter Nutzung der neuartigen Anlage darin, weltweit erstmals verschiedene Verfahrensvarianten des Hochleistungslasermikrosinterns zu realisieren und zu untersuchen.

Weiterhin sollte die Wirkungsweise einer patentierten Drehringrakel sowie eines Elektromagneten zur Pulververdichtung untersucht werden. Diese Methode bot eine Vielzahl von Einstellmöglichkeiten bzgl. des Kompressionsgrades bis hin zum „Festklopfen“ des Pulvers durch Schwingungsanregung des verpressenden Stempels. Des Weiteren sollte durch Trennung der jeweils zu sinternden Fläche in Kontur und Innenbereich und der dadurch möglichen Verwendung verschiedener Laserparameter eine Erhöhung der Baurate erfolgen.

6.1.2 Verwendung der Zuwendung

AP 1.1 Integration von neuartigen Messprinzipien in das Verfahren

Modifikationen der Anlagentechnik

Zur Integration neuer Messprinzipien in die bestehende Anlagentechnik mussten einige Modifikationen durchgeführt werden. Zunächst wurden Versuche unternommen, einen selbstgebauten Sensor zur Analyse auftretender Höhendifferenzen am Rakelarm zu befestigen [Abb.6.1.2.1].

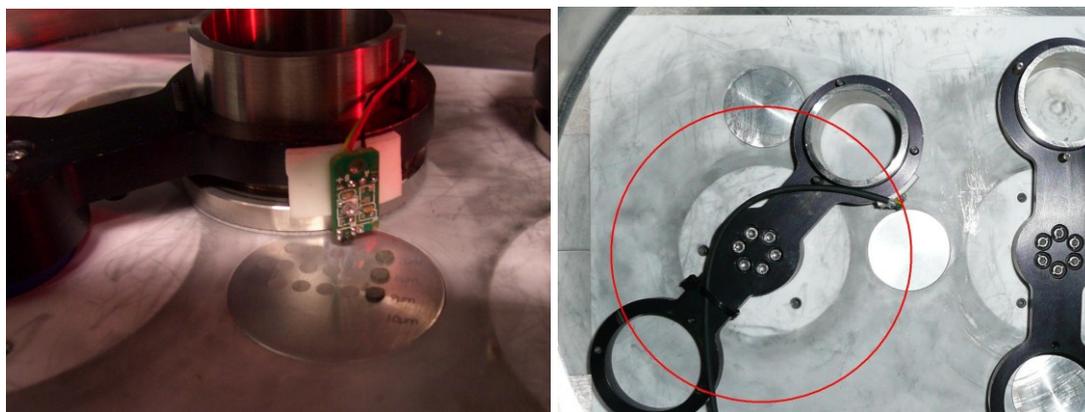


Abb. 6.1.2.1: links: am Rakelarm befestigter Sensor, rechts: Bahn des Sensors während einer vollständigen Rakelfahrt (rot)

Zu erkennen war, dass durch die Fixierung des Sensors die Messwerterzeugung nur in Form eines Kreissegmentes über der Bauteiloberfläche möglich ist. Die zur Ermittlung des Abstandes entworfene elektrische Schaltung mit zugehöriger Platine ist in Abb. 6.1.2.2 dargestellt, welche die Anforderungen an eine „insitu“- Messung erfüllen sollte. In Abb. 6.1.2.3 ist der Messaufbau zur Bestimmung der Parameter des Sensormoduls dargestellt.

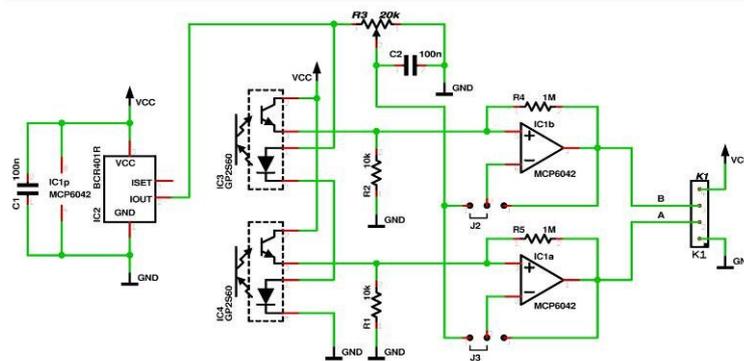
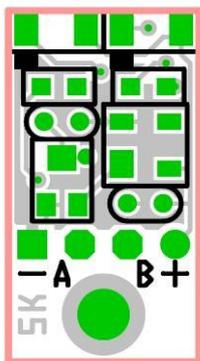


Abb. 6.1.2.2: Schaltplan und Platinen Entwurf

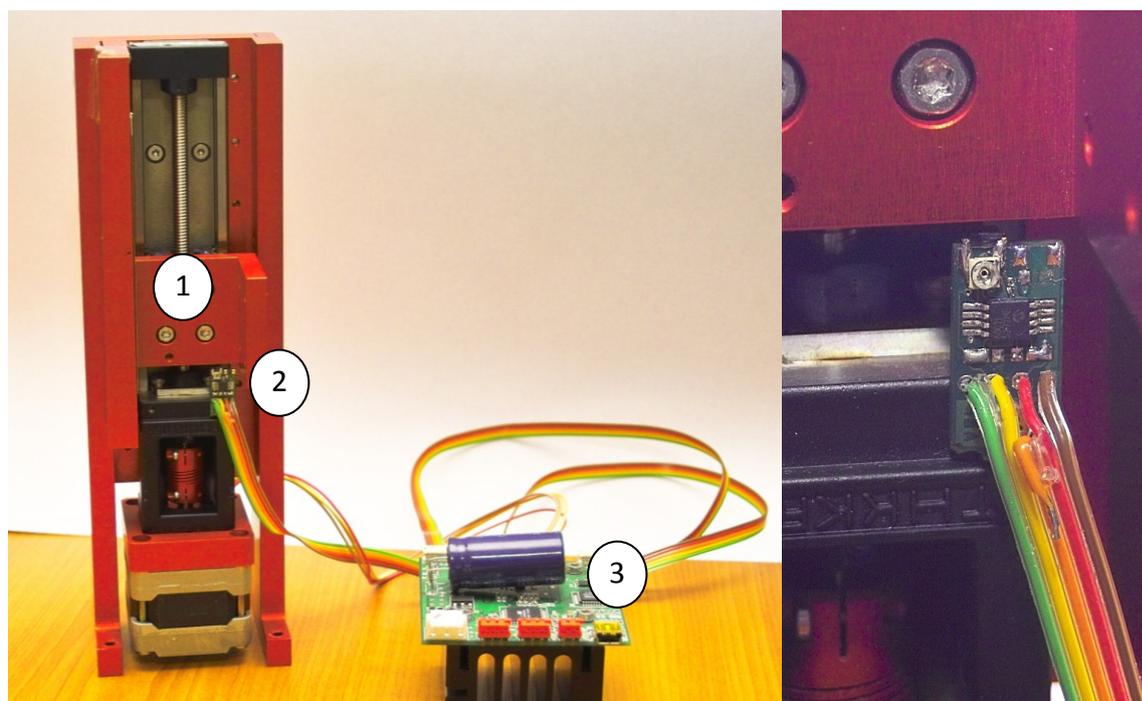


Abb. 6.1.2.3: Messanordnung zur Bestimmung des Auflösungsvermögens der entwickelten Sensoreinrichtung, links: 1 – präzise Linearachse, 2 – Sensor, 3 – Ansteuer- und Auswerteplatine; rechts: Detailaufnahme Sensor

Zur Validierung der Messergebnisse wurde weiterhin ein Triangulationsensor LK-G32 der Firma Keyence eingesetzt. Hierfür wurde ein vorhandener Versuchstand zum Lasermikrosintern wie in Abb. 6.1.2.4 dargestellt modifiziert. Zur Integration dieses Sensors in das System und für eine stabile Führung auf der Rakelbahn musste zunächst eine Halterung für die Rakelarme konstruiert werden.

Als Referenzsystem für die Höhenmessung dient der Linearantrieb der Bauplattform. Hierfür wurde ein lineares Messsystem LIK41 von Numerik Jena implementiert (Abb. 6.1.2.4).

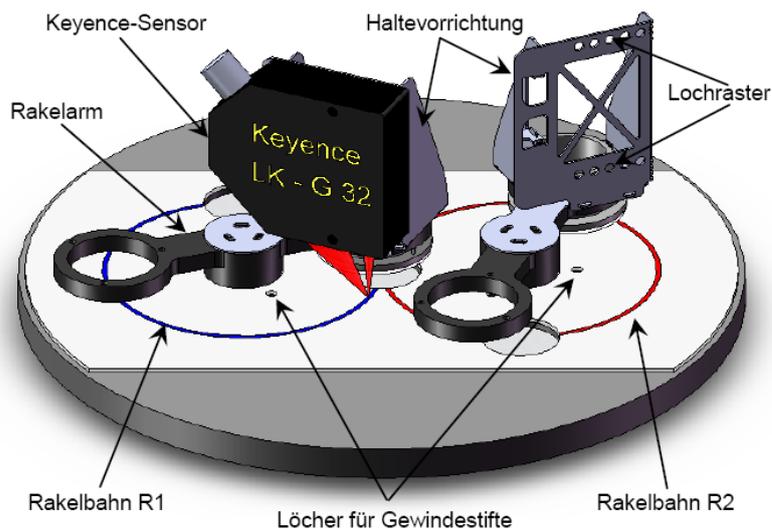


Abb. 6.1.2.4: Haltevorrichtung mit Sensor in der Sinterkammer

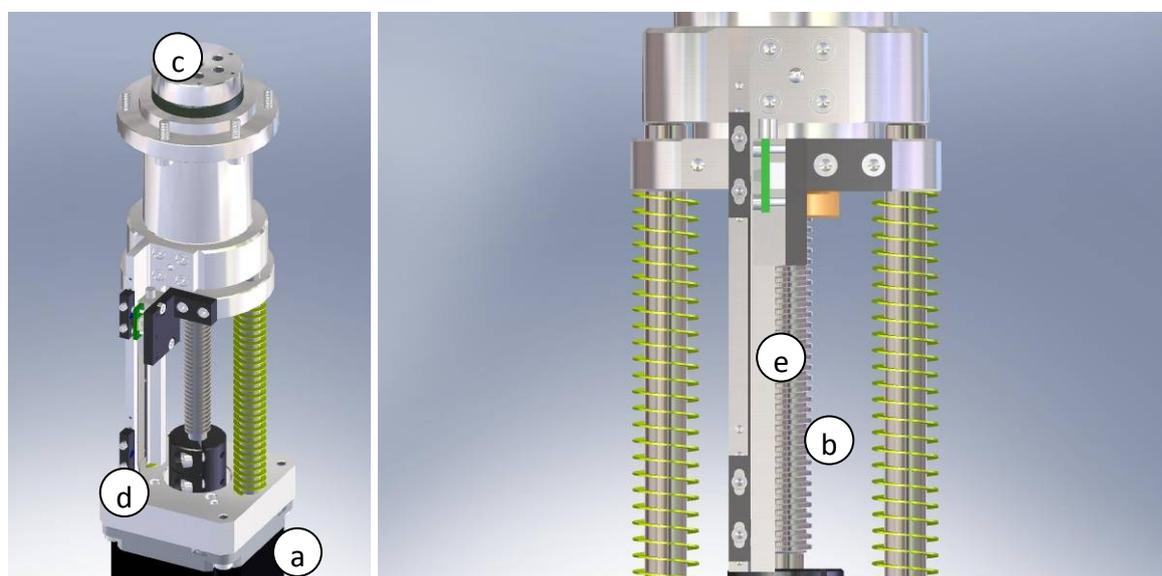


Abb. 6.1.2.5: Bewegungseinrichtung der Sinterplattform, a) Motor b) Antriebsspindel c) Plattform d) Maßstabhalter e) Halterung Messsystem

Zur Kontrolle der Messgenauigkeit des Höhenmessensors SG-2BC sowie zur späteren präzisen Bewegung und Regelung der Sinterplattform wurde mit Hilfe dieses LIK41 Messsystems eine „closed loop“ - Regelung aufgebaut. Bei dieser Regelungsart wird die zu vollführende Bewegung eines Systems durch ständige Rückkopplung mittels eines Sensors, in unserem Fall des LIK 41, überwacht und gegebenenfalls die Position nachgeregelt bzw. korrigiert.

Modifikation zur vertikalen Höhenmessung:

Ausgehend von einem kommerziell verfügbaren System (Scanlab camera adapter) (Abb. 6.1.2.6) zur Prozessvisualisierung wurde aufgrund des damals unvollständigen Aufbaus der neuen Sinteranlage ein Testaufbau zur Evaluierung dieses kommerziellen Kamerasystems erstellt. Eine besondere Herausforderung war es, einen Aufbau zu generieren, welcher

gleichzeitig das Prozessverhalten des Sinterns nachbildet, um realistische Analysen durchführen zu können.

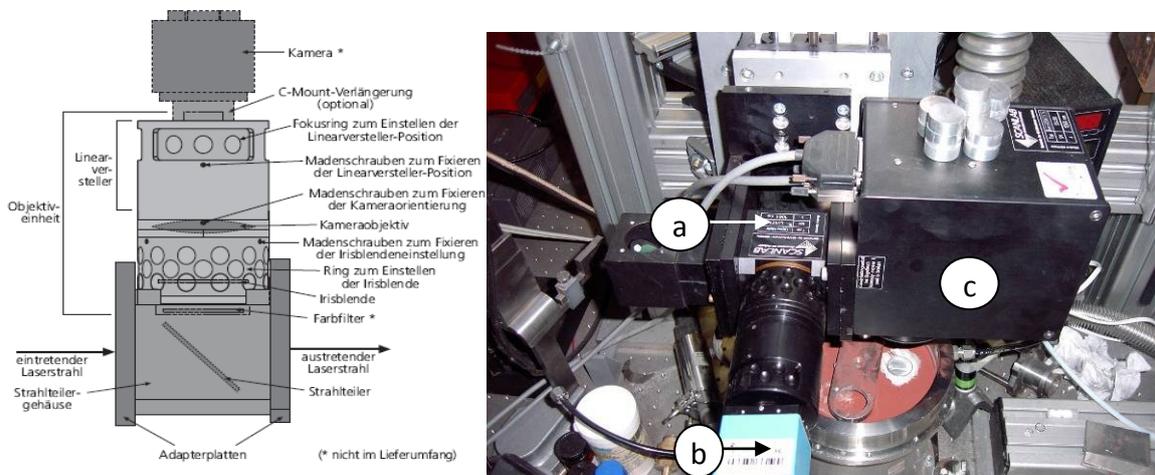


Abb. 6.1.2.6: Versuchsaufbau zur vertikalen Messung während des Lasermikrosinterns, a - Kameraadapter, b - Kamera, c - Scanner

Es konnte festgestellt werden, dass nach (Gl. 1) im Testaufbau eine physikalisch mögliche Auflösung von $3,69 \mu\text{m}$ oder unter Einbeziehung der Kameradaten $4,5 \mu\text{m}$ erreicht werden kann.

$$\text{Gl. 1} \quad \text{Auflösung} = 1,22 \frac{\text{Apertur}}{f_{\text{Objektiv}} \cdot \lambda_{\text{Beleuchtung}}} = 1,22 \frac{14\text{mm}}{100\text{mm} \cdot 630\text{nm}} = \underline{\underline{3,69 \mu\text{m}}}$$

Diese Auflösung sollte bei der minimal möglichen Auflösungsgrenze des Verfahrens von $20 \mu\text{m}$ ausreichend sein.

Um das Konzept der „insitu“-Beobachtung auch für andere Anlagen zur Verfügung stellen zu können wurde ein eigenes Kamerasystem entworfen (Abb. 6.1.2.7).

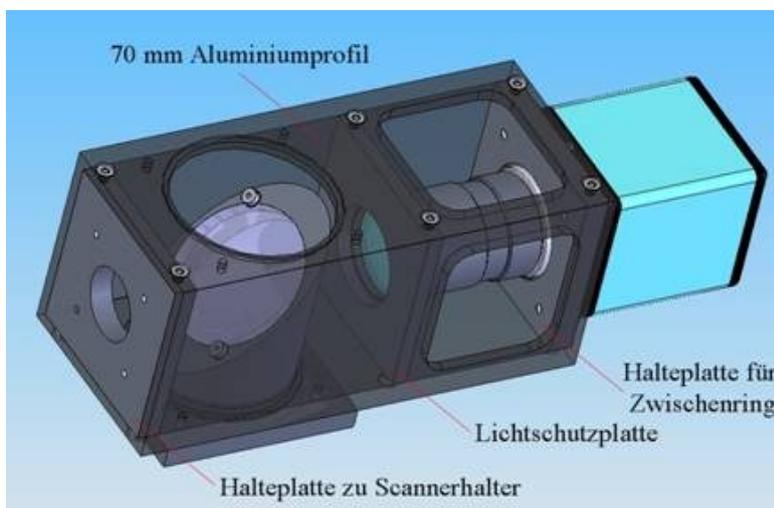


Abb. 6.1.2.7: einfaches Kamerasystem zur Prozessbeobachtung in optischer Achse

Zudem bestand im kommerziellen System keine Möglichkeit, das Objektiv auszutauschen, um andere Vergrößerungsfaktoren zu erzielen. Weiterhin benötigte es zu viel Platz und führte aufgrund des Strahlteilers in Form einer verkippten planparallelen Platte zu einem resultierenden Strahlversatz. Die eigene Entwicklung hatte einen sehr viel kompakteren Aufbau ohne Strahlversatz. Die eingesetzten Objektive können nach Bedarf gewechselt werden um eine hohe Auflösung zu erreichen oder einen größeren Bereich darzustellen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Filter in das System einzubinden um evtl. unerwünschte Wellenlängenbereiche auszublenden. Dieses System wurde wie in Abb. 6.1.2.8 und Abb. 6.1.2.9 verdeutlicht in die bestehende Anlage implementiert.

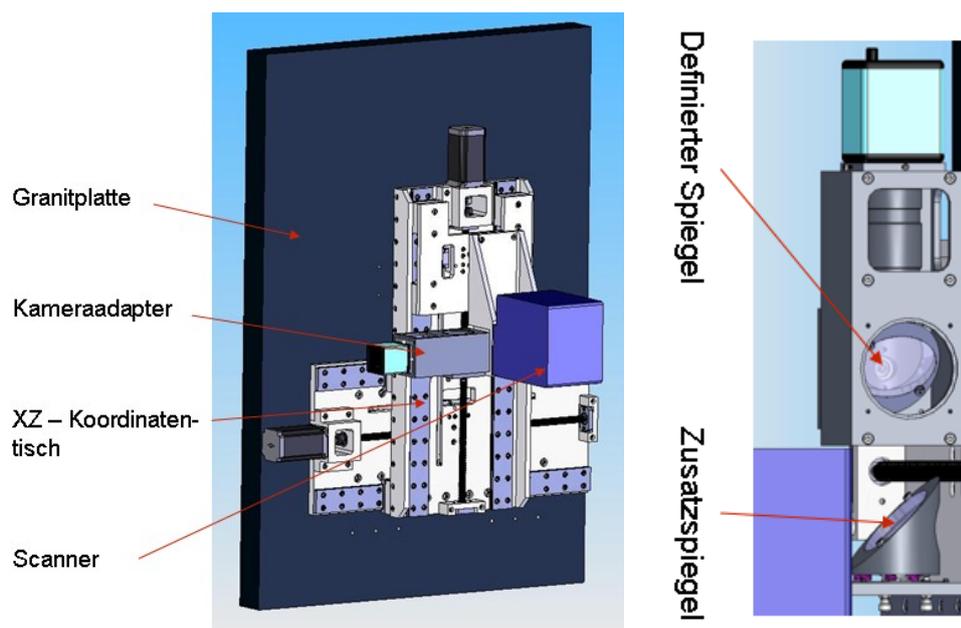


Abb. 6.1.2.8: schematische Darstellung des z-x-Achsensystems der Sinteranlage mit angebautem Kameraadapter sowie Detaildarstellung

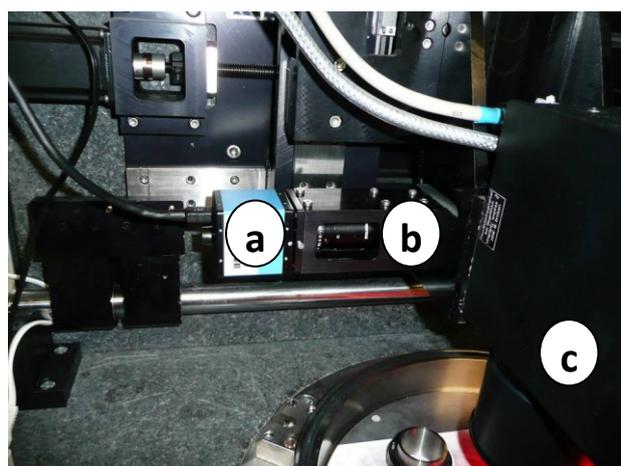


Abb. 6.1.2.9: Beobachtungssystem mit (a) - Kamera, (b) - Kameraadapter, (c) - Scanner

Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens

Auch für die Untersuchungen zur Entwicklung eines „insitu“-Konfokalmessverfahrens wurde ein neuer Versuchsaufbau erstellt (vgl. 6.1.2.10), der die reale Situation am Einsatzort, also in der Laseranlage, widerspiegeln sollte. Hierfür wurde ein Aufbau gewählt, welcher neben einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser auch einen Galvanometerscanner und eine F-Theta-Planfeldoptik mit einer Brennweite von 160 mm enthält. Zwischen Lasergerät und Scanner wurde eine teilreflektierende Glasplatte eingebracht.

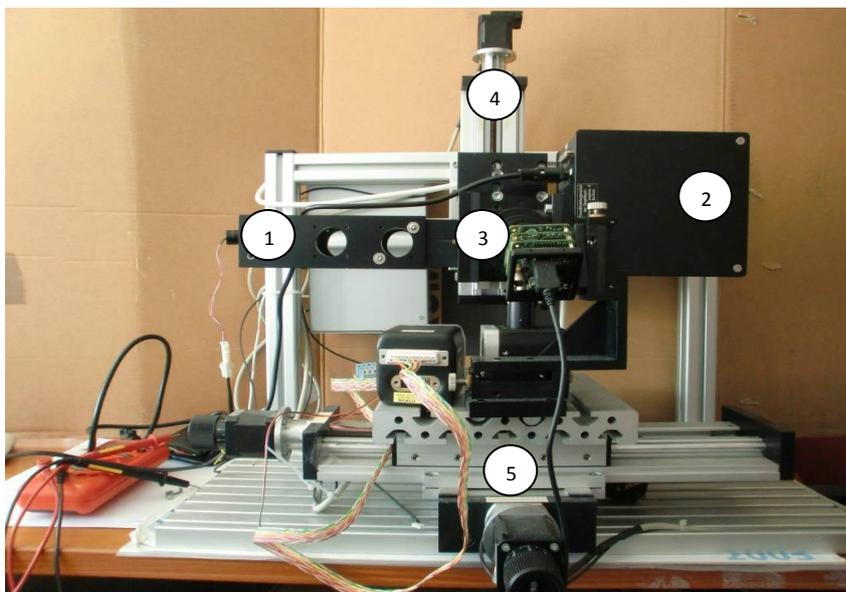


Abb. 6.1.2.10: Versuchsaufbau zur „insitu“-Höhenmessung mittels Konfokalprinzip

1. Anschluss für einen fasergekoppelter Nd:YAG-Laser. 2. Galvanometerscanner mit angeschraubter F-Theta-Optik. 3. Auskoppereinheit für den Messstrahl 4. Z-Achse zur Verschiebung der Fokusebene bzgl. der Materialoberfläche 5. Koordinatentisch zum Ausrichten der Probenoberfläche (lateral)

Optimierung der Werkstoffeigenschaften (Thermische Nachbehandlung)

Die thermische Nachbehandlung geschah mittels vorhandener Ofentechnik. Zur Auswertung der Proben wurden verschiedene externe Institute genutzt.

Sintern von keramischen Materialien

Für die Untersuchungen wurden vorhandene Lasermikrosinteranlagen genutzt.

Da sich das sonst verwendete Rakelregime für das Sintern von Carbiden als ungeeignet herausstellte, wurde eine neue Strategie zum Pulverauftrag angewendet. Dazu wurde das Pulver mit Hilfe eines Pinsels dünn aufgetragen bzw. in die Porenstruktur der Oberfläche eingefügt. Es war zu vermuten, dass dies hauptsächlich mit dem nanoskaligen Feinanteil des Pulvers geschah. Durch die entstandenen extrem dünnen Schichten war es möglich, eine Verschmelzung und damit den Aufbau fester Sinterkörper zu erreichen.

AP 1.2 Ultrakurzpulslasermikrosintern

Für die Untersuchungen wurde eine völlig neue integrierte Anlage mit Ultrakurzpuls- und Kurzpulslaser sowie zwei Bearbeitungsstationen konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Sie wurde neben den Untersuchungen zum Lasermikrosintern arbeitspunktübergreifend auch für die Untersuchungen zum 3D Lasermikroschneiden und Lasermikrostrukturieren eingesetzt.

Auf einem schwingungsgedämpften Granitaufbau, der eine höchstmögliche Steifigkeit aufweist und damit verbunden eine präzise und reproduzierbare Bearbeitung bis in den sub-Mikrometerbereich ermöglicht, wurden die Laserquellen, das optische Strahlführungs- und Formungssystem sowie die Achssysteme montiert. Als Laserquellen wurden ein damals neuartiger faserbasierter hochrepetierender Femtosekundenlaser „Impulse“ der Fa. Clark MXR aus den USA (Repetitionsrate bis 25 MHz, mittlere Leistung bis 14 W bei 2 MHz (mit einem zusätzlichen extern ansteuerbaren internen Modulator), min. Pulsdauer ca. 180-250 fs) als auch ein Nanosekunden-Kurzpulslaser der Fa. Edgewave aus Deutschland (Repetitionsrate bis 30 kHz, mittlere Leistung bis 34 W bei 30 kHz, min. Pulsdauer 6 ns) integriert. Beide Laserquellen wurden mit laserexternen stufenlos regelbaren Strahlabschwächereinheiten zur Einstellung der gewünschten Laserleistung für den jeweiligen Bearbeitungsprozess ausgestattet. Die Bearbeitungsstationen für das Lasermikrosintern und für das 3D Laserschneiden/Lasermikrostrukturieren wurden räumlich durch den Granitaufbau abgetrennt. Die Laserstrahlquellen stehen über Umlenkspiegel- und Klappspiegelanordnungen wahlweise an beiden Bearbeitungsstationen zur Verfügung. Die weiteren Ausführungen beziehen sich nur auf die Bearbeitungsstation für das Lasermikrosintern, zum Versuchsstand 3D Laserschneiden/Lasermikrostrukturieren wird im Arbeitspunkt 6.2.2 detailliert berichtet.

In die Arbeitsstation wurde eine selbst entwickelte und aufgebaute Sinterkammer mit Vakuumanlage sowie ein Scanner an einem Achssystem integriert. Die Sinterkammer beinhaltet zwei Doppelrakel und eine Keramikplattform (Abb. 6.1.2.11). Dadurch konnten über längere Zeiträume definierte Bedingungen für die Untersuchungen aufrechterhalten werden. Die Vakuumanlage liefert einen Enddruck von 10^{-6} mbar. Sie bestand aus einer Kammer mit angeflanschter Vakuumtechnik (Vorpumpe, Turbomolekularpumpe, 3 Druckmessgeräte, Ventile). Ein zusätzlich angebrachtes Massenspektrometer ermöglichte die partikuläre Bestimmung der Restgasatmosphäre sowie die Prozessüberwachung.

Die Versuche wurden abweichend vom ursprünglichen Projektplan aufgrund von Verzögerungen bei der Inbetriebnahme der Anlage in drei Teilbereiche aufgegliedert. Zunächst fanden grundlegende Untersuchungen zur Reaktion einer Pulveroberfläche auf eine Femtosekundenlaserbestrahlung statt. Es wurden zahlreiche Phänomene gefunden, die nach eingebrachter Streckenenergie und applizierter Intensität geordnet wurden. Zur Verifizierung des Einflusses der Streckenenergie wurden anschließend vergleichende Untersuchungen mit cw-Laserstrahlung bei gleichem Fokussdurchmesser und gleicher Streckenenergie durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen wurde abschließend untersucht, ob eine Überführung

der Ergebnisse in eine Ultrakurzpuls-Lasermikrosintertechnologie zur Erzeugung von hochaufgelösten 3D Strukturen möglich ist.

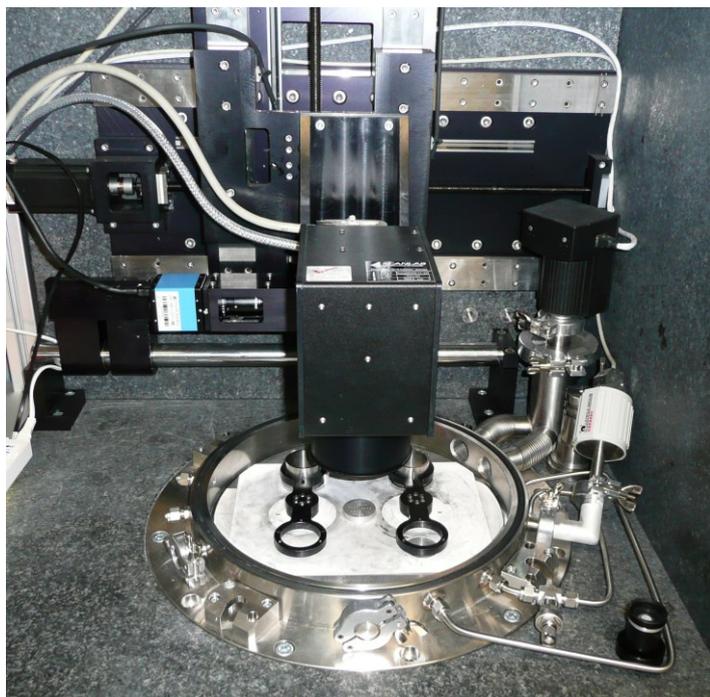


Abb. 6.1.2.11: *Versuchsstand Lasermikrosintern*

Zur Bestrahlung der Pulveroberfläche wurde das bereits aus vorherigen Untersuchungen gut bekannte Wolfram-Pulver (Goodfellow, Korngröße $< 1 \mu\text{m}$) bei einem Druck von $5 \cdot 10^{-4}$ mbar eingesetzt. Eine möglichst glatte Pulveroberfläche wurde durch Rakeln erzeugt, wobei dazu einzelne Kavitäten mit einer Tiefe von 1 mm auf die Bauplattform aufgebracht und mit Pulver gefüllt wurden.

Die Bestrahlung erfolgte mit Einzellinien bei einem Fokusbereich von $36 \mu\text{m}$ und einem Linienabstand von $50 \mu\text{m}$. Die Scangeschwindigkeit wurde von 6 bis zu 300 m/min variiert. Da zunächst nur eine Frequenz von 1 MHz zur Verfügung stand, ergab das einen maximalen Pulsabstand von $5 \mu\text{m}$ bzw. bei einer maximalen Pulsenergie von $7,5 \mu\text{J}$ eine minimale Streckenenergie von $1,5 \text{ J/m}$. Um die Streckenenergie bei höchster Intensität weiter reduzieren bzw. den Pulsabstand erhöhen zu können, wurde ein externer Pulspicker eingebaut. Dadurch konnten die Frequenz auf 125 bzw. 250 kHz reduziert, der Pulsabstand auf $40 \mu\text{m}$ erhöht und die Streckenenergie bei höchster Intensität auf minimal $0,19 \text{ J/m}$ abgesenkt werden.

Bei einer Wiederholung der Versuche traten insbesondere bei hoher Pulsenergie abweichende Ergebnisse auf. Ein Nachmessen des Strahlenganges erbrachte eine leichte Verkleinerung des Rohstrahles, wodurch sich der Fokusbereich vergrößerte und die Intensität verringerte. Dies zeigte die extreme Empfindlichkeit der erzeugten Strukturen gegenüber Parameteränderungen.

Im zweiten Teilbereich wurde zur Untersuchung des Einflusses der Streckenenergie ein Faserlaser im cw-Betrieb genutzt. Dazu wurde dieser in den vorhandenen Strahlengang eingespiegelt. Mit einer Fokussieroptik mit Brennweite 80 mm entstand beim Faserlaser aufgrund

des größeren Rohstrahldurchmessers ein Fokusdurchmesser von 30 μm im Gegensatz zum fs-Laser von 40 μm . Um gleiche Laserstrahldurchmesser auf der Pulveroberfläche zu erreichen, wurde deshalb beim cw-Laser mit einer Defokussierung von 0,3 mm gearbeitet.

Im dritten Teilbereich wurde das Lasermikrosinterverfahren mit hochrepetierender fs-Laserstrahlung umfassend untersucht. Dazu wurden zunächst einfache Gitterstrukturen erzeugt, mit denen eine erhöhte Auflösung erzielt werden sollte. Dabei zeigte sich, dass es sehr schwierig war, eine vertikale Vernetzung des Pulvers zu erreichen. Selbst mit Parametern mit einem hohen Schmelzanteil gelang das nicht in der mit ns-Pulsen gewohnten Art und Weise.

In Anlehnung an die Ergebnisse zu den Carbiden wurde ergänzend Molybdänpulver (Alpha Aeser, APS 3-7 μm) mit einem Pinsel aufgetragen und an Luft bearbeitet. Durch die entstandenen extrem dünnen Pulverschichten gelang die vertikale Vernetzung.

AP 1.3 Hochleistungslasermikrosintern

Grundlage für die Untersuchungen zum Hochleistungslasermikrosintern bildete ein in die Anlage zur Hochleistungs-Mikrobearbeitung integrierter Versuchsstand, der gemeinsam mit den Versuchsständen zum Lasermikrostrukturieren auf einem massiven Granittisch untergebracht wurde (Abb. 6.1.2.12 links). Als Scanner kam ein Hochleistungsscanner „Superscan“ von Raylase mit ultraleichten SiC-Spiegeln zum Einsatz. Weitere Bestandteile waren eine z-Achse, eine Positioniersteuerung und verschiedene elektrische und mechanische Komponenten. Der mechanische Aufbau der Sinteranlage und die Vakuumanlage entsprachen weitgehend der fs-Anlage (siehe AP 1.2).

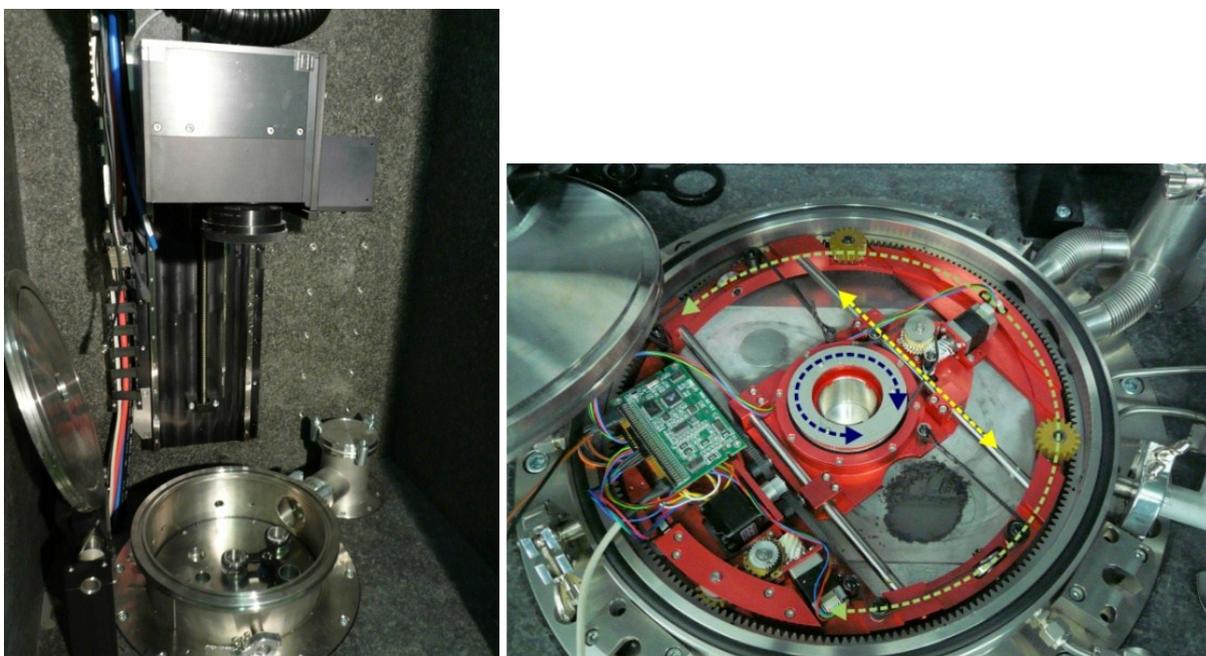


Abb. 6.1.2.12: links: Sinteranlage zum Hochleistungsmikrosintern; rechts: Versuchsaufbau der Rakelvorrichtung mit Drehrakel (blau – Rotation der Rakel, gelb – lineare Aufzugbewegung, grün – Rotation der Rakelplattform)

Alternativ wurden zur weiteren Erhöhung der Scangeschwindigkeit Untersuchungen mit einer kleinen flexiblen Kammer unter dem Polygonspiegelscanner ausgeführt, da dieser ortsfest war und nicht umgebaut werden konnte. Die dort weltweit erstmals applizierte Scangeschwindigkeit von 9.000 m/min beim Lasersintern führten zu einmaligen Ergebnissen. Entgegen den Erfahrungen beim Lasermikrostrukturieren konnte auch bei den hohen Geschwindigkeiten im Pulverbett Schmelze erzeugt werden.

Weitere Versuche zur Erhöhung der Baugeschwindigkeit beim Lasermikrosintern von Keramik mittels Zweistrahltechnologie wurden gemeinsam mit dem Laserinstitut Mittelsachsen e.V. durchgeführt (Dipl.-Ing. (FH) Mathias Horn). Dazu wurde ein kleiner Versuchstand mit einer neuartigen Strahlführung aufgebaut. Als Scanner kam ein Hochleistungsscanner „Superscan“ von Raylase, allerdings ausgestattet mit einer Reflexionsschicht aus Aluminium für Wellenlängen von 355 nm bis 2 μ m, zum Einsatz. Eine einmalige dichromatische Optik für die Wellenlängen 355 nm und 1060 nm ergänzte den Scanner, der ebenso wie die Optik über ein vom Freistaat Sachsen Sachsen finanziertes Projekt angeschafft wurde. In den Strahlengang wurden ein Faserlaser mit einer Leistung von 300 W und ein UV-Laser mit einer Leistung von 23 W eingespiegelt. Eine einfache Rakelplattform mit einer Proben-, Pulver- und Rakelachse vervollständigte den Versuchstand. In der Anlage war ein Bauraum mit einem Durchmesser von 35 mm verfügbar.

Weiterhin wurde als Ergänzung zur erprobten Rakeltechnik mit Ringrakeln eine neuartige patentierte Rakel mit Drehmechanismus, welche ein flexibles und gleichmäßiges Rakeln in alle Richtungen ermöglicht, entwickelt und aufgebaut (Abb. 6.1.2.12 rechts). Die erzielbaren Parameter wurden ermittelt. Als Ergänzung fanden weiterhin Untersuchungen zum Verdichten des Pulvers durch eine zusätzliche Verdichtereinheit mit Magnetfeld statt.

6.1.3 Ergebnisse

AP 1.1 Integration von neuartigen Messprinzipien in das Verfahren

Höhenmessung

An der entwickelten Platine kamen zwei SG-2BC-Sensoren zur Messwerterfassung zum Einsatz. Diese sollten durch eine Mittelwertbildung die Genauigkeit und Stabilität des Messsystems weiter erhöhen. Leider zeigte sich, dass zwei nah zueinander positionierte SG-2BC-Sensoren zur gegenseitigen Beeinflussung aufgrund von diffus rückreflektierter Strahlung des Messobjektes neigten. Somit konnte nur ein System mit einem Sensor zur Messwertbildung mit dem in Abb. 6.1.3.1 dargestellten Ergebnis an einem Referenzsystem genutzt werden.

Prinzipiell ergab sich aus der gewonnenen Messkurve die Aussage, dass die höchste Genauigkeit des Sensors am größten Anstieg desselbigen zu erwarten ist. Somit sollte der Messsensor mit einem Abstand von etwa 250 μ m relativ zur Bauteiloberfläche betrieben werden. Der nominelle Messbereich des Sensors wurde über die Analyse des Anstiegsverhaltens be-

stimmt. Aus der Beziehung $\frac{dMess}{dx}$ ergab sich der bestmögliche Messbereich von 0,1 - 0,25 mm (Abb. 6.1.3.2).

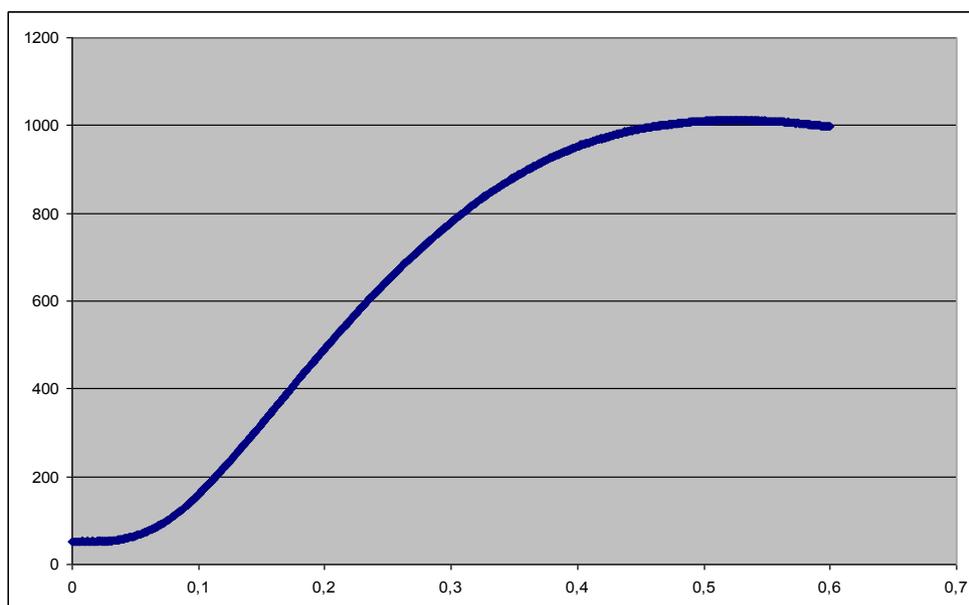


Abb. 6.1.3.1: gemessene Spannungswerte in Auflösung von 10 bit in Abhängigkeit vom Verfahrweg (Maximum = 1024)

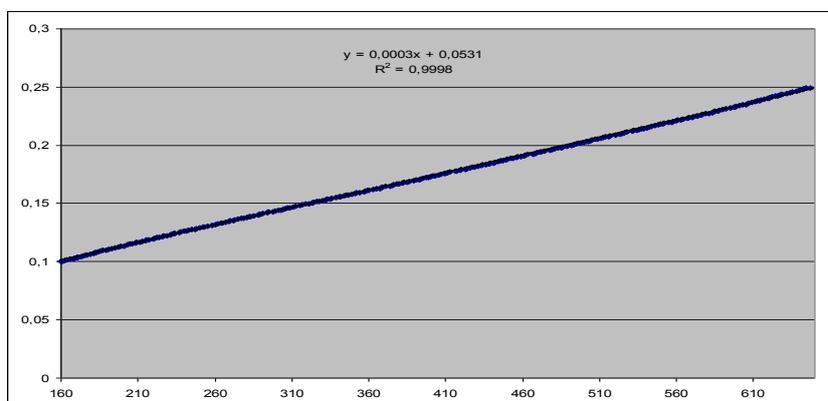


Abb. 6.1.3.2: linearer Bereich der invertierten Funktion zwischen 0,1 und 0,25 mm sowie zugehörige Linearinterpolation

Durch den Einsatz des Sensors während des Rakelzyklus konnte die vertikale Verschiebung des Rakelarmes detektiert werden. Hierbei konnten ebenfalls die einzelnen sich auf der Kreisbahn befindlichen Achsen erkannt und zugeordnet werden. Mit (a) ist die Position der Pulverzufuhrplattform gekennzeichnet, diese war während des Messvorganges leicht abgesenkt. Weiterhin ist ebenfalls die Sinterplattform zu erkennen (b). Die tiefer liegenden Messwerte im Fall (b) repräsentieren den Übergang von der Lauffläche zur Sinterplattform. Deutlich zu erkennen war weiterhin, dass die Rakelbahn gewisse Höhendifferenzen aufwies. Diese können durch Unebenheiten bei der mechanischen Fertigung oder durch eine Verkipfung der Rakelarmwelle hervorgerufen werden.

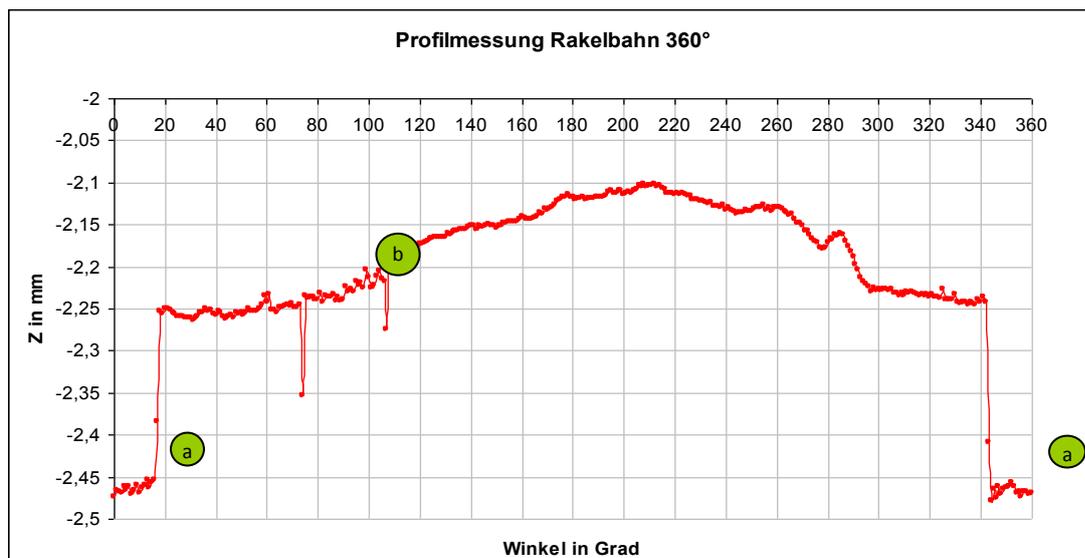


Abb. 6.1.3.3: Höhenwerte bei vollständiger Kreisfahrt mittels des am Rakelarm befestigten Sensors (a) Pulverachse, (b) Probenachse erkennbar

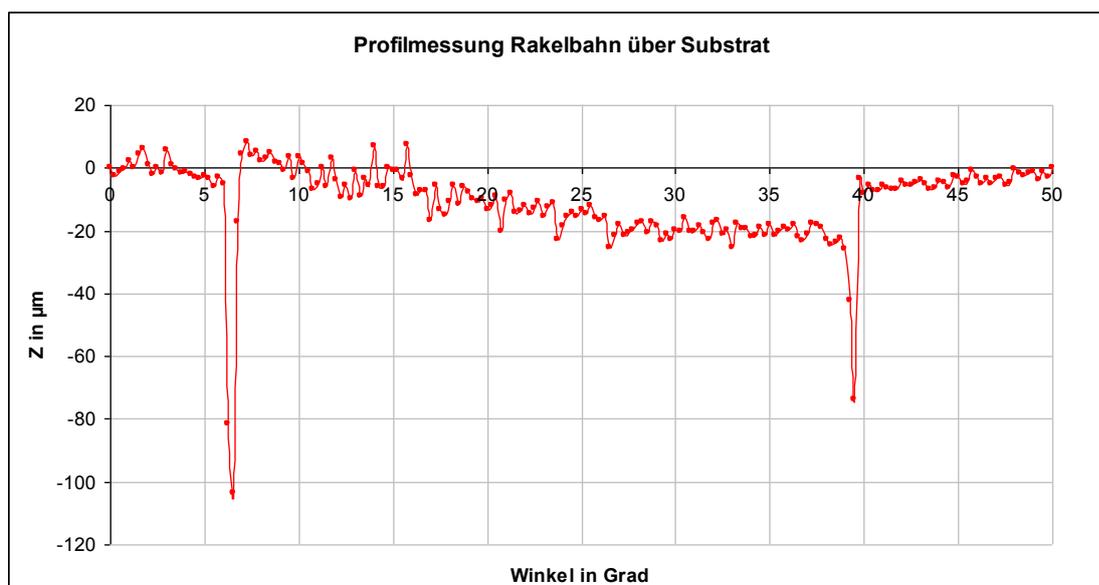


Abb. 6.1.3.4a: präzise Profilmessung an Sinterplattform

Eine höher aufgelöste Messung über der Sinterplattform zeigte, dass diese relativ zur Rakelbahn verkippert und somit ebenfalls neu ausgerichtet werden musste (6.1.3.4). Die abschließenden Messungen ergaben ein recht positives Ergebnis bzgl. der Wiederholgenauigkeit des entwickelten Messsystems. Die Messwerte ergaben stets das gleiche Höhenprofil. Auch konnten auf der Bauplattform befindliche Strukturen gemessen werden (Abb. 6.1.3.4b).

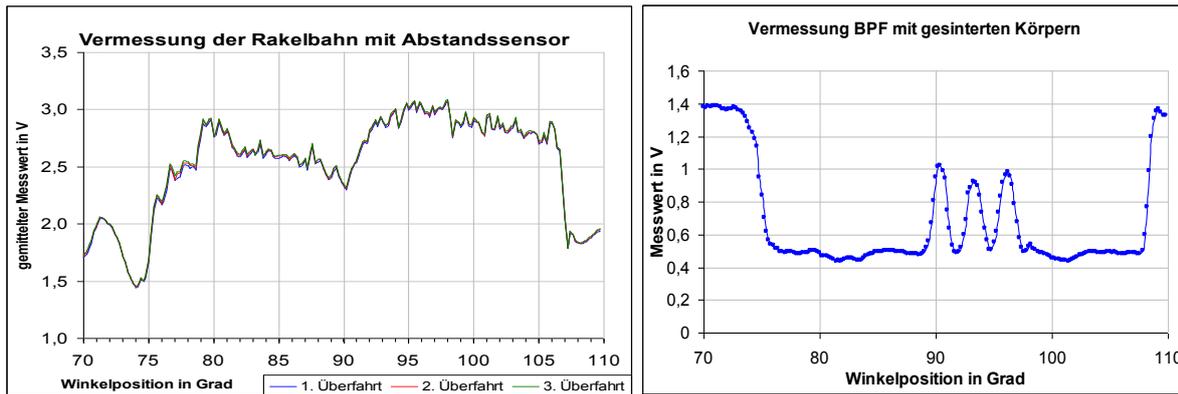


Abb. 6.1.3.4b: links - Höhenprofil der Rakelbahn bei mehrfachen Bestrahlungen, rechts - Messung von Strukturen auf der Bauplattform

Vertikale Messung

Eine Längenmessung während des Lasersinterns könnte u.a. Abweichungen (Verschiebung bzw. Skalierung), die über eine Fehlfunktion oder ein thermisches Driften des Galvanometerscanners gegeben sind, evaluieren. Neuere Galvanometerscanner besitzen jedoch selbst eine Autokalibrierfunktion, um solchen driftbedingten Abweichungen entgegen zu wirken. Generell wären ein Strahlversatz aufgrund von Schwingung oder Verzug von ganzen Anlagenkomponenten, welcher aber aufgrund des massiven Aufbaus der Anlage (Granit) als eher unwahrscheinlich angesehen werden kann sowie eine prozessbedingte Abweichung z.B. durch unterschiedliche Outline-Parameter oder eine Änderung der zu sinternden Schichtdicke möglich.



Abb. 6.1.3.5: modifizierte Software mit eingebundenen Kamerainterface und Messoption (a) - Skriptsteuerung, (b) - Kameraausgabe, (c) - Achsensteuerung und Überwachung

Der im Projekt bearbeitete Unterpunkt der vertikalen Messung zeigte allgemein die Möglichkeiten der „insitu“ - Längenmessung von gesinterten Körpern zur Qualitätskontrolle, sollte aber vor allem die messtechnischen Grundlagen für die Kontrolle der Prozessstabilität schaffen.

Die experimentell bestimmte Auflösung war bei der minimal möglichen Auflösungsgrenze des Verfahrens von 20 µm ausreichend. Die Software für die technische Schnittstelle zur Kamera wurde in die vom Kooperationspartner 3D-Micromac AG bereitgestellte Steuersoftware (3D-MMI) neu eingebunden. Somit war es möglich, den Prozessfortschritt zu visualisieren und zu dokumentieren. Resultate der Kameraeinbindung sind in Abb. 6.1.3.5 und 6.1.3.6 zu sehen.

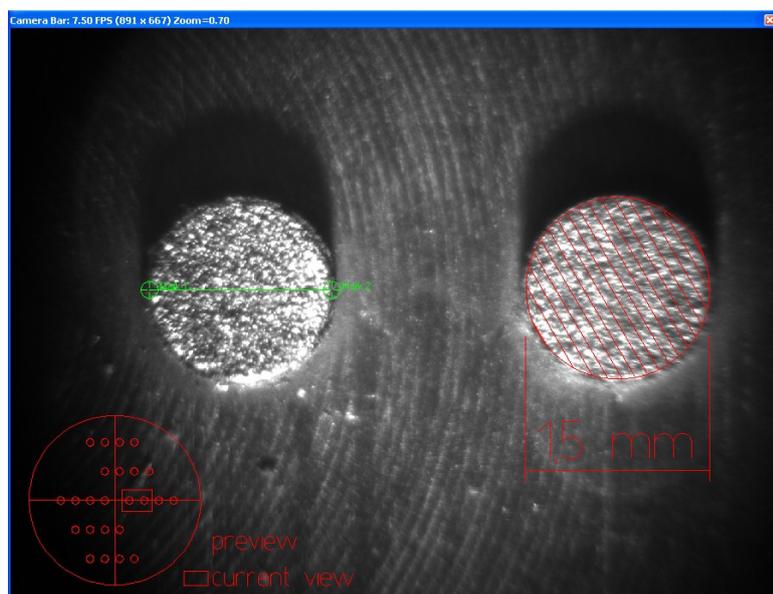


Abb. 6.1.3.6: vergrößerte Darstellung der Bildausgabe, links - Messen des Sinterkörpers; rechts - Überlagerung der abgearbeiteten Laservektoren mit der gesinterten Schicht; unten links - Vorschauansicht des gesamten Substrates mit dem aktuellen Bildausschnitt

Die generierten Bauteile konnten direkt mit der Lasersoftware gemessen und begutachtet werden. Durch die Erweiterung der Lasersoftware um Auswerte-, Mess- und Analysefunktionen ergaben sich neue Möglichkeiten für die Prozessüberwachung. Hierfür musste der hardwaretechnische Aufbau mit einer geeigneten Software zur Regelung der Prozessparameter kombiniert werden. Es wurde ein spezielles Programmpaket für das Lasermikrosintern erstellt. Als Struktogramm kann man den Datenfluss, wie in Abb. 6.1.3.7 dargestellt, skizzieren. Wie im Struktogramm zu erkennen ist, werden die Bilddaten zunächst einer Kontrastwertanpassung unterzogen, um sich auf die vorhandene Beleuchtungssituation einstellen zu können. Anschließend wird die eigentliche Kantendetektion durchgeführt. Hierfür wird das Bild zunächst in ein binäres Bitmap gewandelt, der Schwellwert dieser Wandlung ist ebenfalls einstellbar. Nun erfolgt die Detektion des Wechsels von 0b auf 1b, um die Kanten zu extrahieren. Anschließend erfolgt die Vektorisierung, wobei benachbarte Pixel möglichst zu Linien zusammengefasst werden.

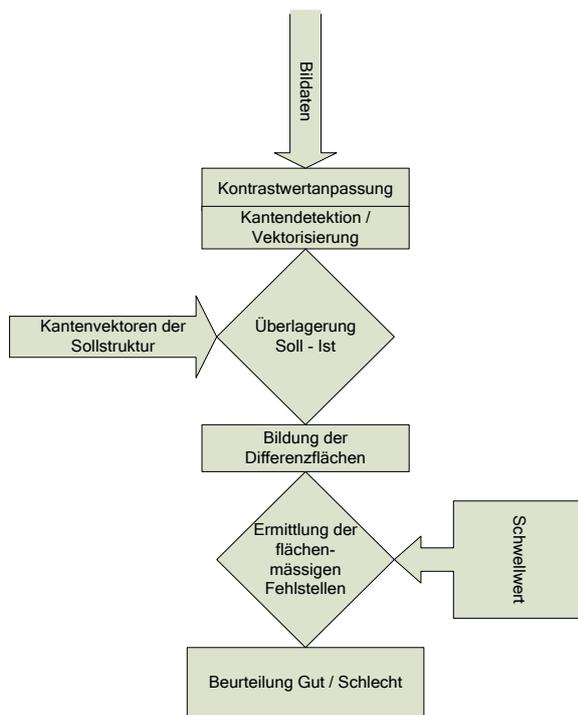


Abb.: 6.1.3.7: Struktogramm der Bildauswertung

Die so erhaltenen Vektoren wurden letztendlich mittels Streuwerten (Simplify Schieberegler) zu längeren Vektoren zusammengefügt, um die Anzahl der Vektoren zu minimieren. All diese Rechenschritte sind in Abb. 6.1.3.8 dargestellt, jeweils mit einer korrekt gesinteren Fläche und einer infolge ungenügenden Schichtaufzugs unvollkommenen Sinterfläche. Deutlich ist zu erkennen, dass die Software den Fehler in der Schicht erkennen konnte, obwohl infolge des unterschiedlichen Kontrastverhaltens weitere nicht vorhandene Fehlstellen im inneren der Struktur detektiert wurden. Es wurden Versuche unternommen, mittels einer automatischen Kontrastwertanpassung diese Effekte zu minimieren. Leider mit wenig Erfolg. Somit war darauf zu achten, dass nach erfolgter manueller Kontrastwert-einstellung die Objektbeleuchtung nicht verändert wurde, um mögliche Fehldetektionen zu vermeiden. Allgemein kritisch war die Ausleuchtung des Objektes. Stark einseitige Objektbeleuchtung wirkte sich störend aus, da die Wandlung des kontraststabilisierten Bildes anhand eines „nulldimensionalen“ Schwellwertes durchgeführt wurde.

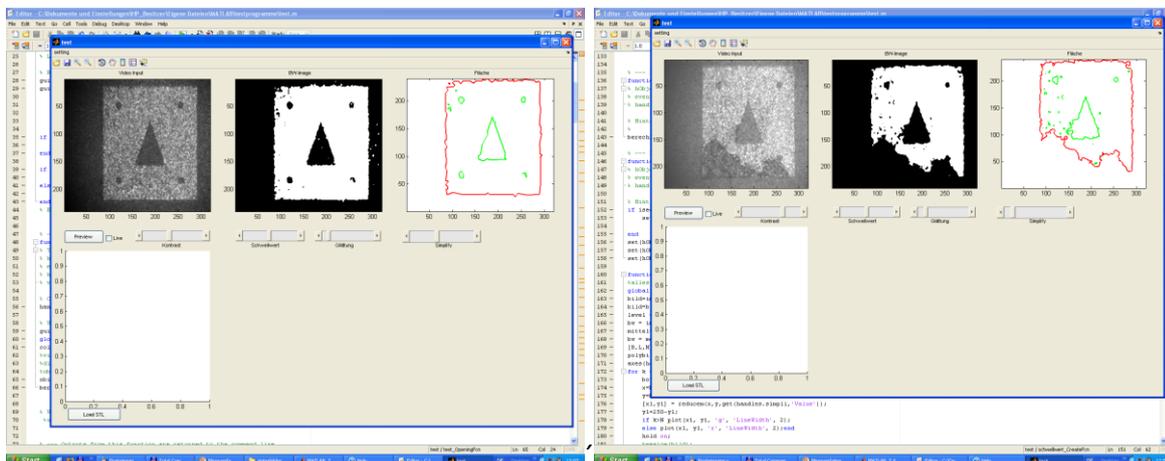


Abb. 6.1.3.8: Vektorisierung einer intakten (links) und infolge ungenügenden Pulveraufzuges beschädigten (rechts) Sinterschicht, jeweils auf jedem Bild links - Eingangsbild, Mitte - binär gewandeltes Bild, rechts - vektorisierte Struktur (rot: Außenkontur, grün: Innenkontur)

Lineare Helligkeitsschwankungen über Bildbereiche führten partiell zur falschen Binarisierung. Um diesem Problem zu begegnen, musste das Objekt möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Nach erfolgreicher Vektorisierung der Ist-Struktur musste die von den Vektoren eingeschlossene Fläche räumlich und betragsmäßig mit der Soll-Struktur verglichen wer-

den. Es wurden somit ebenfalls die Konturvektoren der Soll-Struktur benötigt. Diese Daten werden von einem „Slicer“ bereitgestellt. Im bisherigen Arbeitsregime der Sinteranlage wurde hierfür „IVS-Converter“ der Firma IVS-Solutions GmbH aus Chemnitz verwendet. Dieser erzeugt aus gegebenen STL-Dateien Querschnitte und speichert die errechneten Daten in einer der Laserscannersoftware verständlichen Weise in ein Kontur- und Füllungsfile ab. Damit hat man aber keine Möglichkeit, im Prozessablauf regelnd einzugreifen. Deshalb wurde ein neuer Realtime-Slicer entwickelt, der nach Vorgaben eines Messsystems aus einem STL-File Schichten erzeugt und Füllungen bereitstellt und zum anderen der Prozessregelung die nötigen Soll-Vektoren in einem verständlichen Format bereitstellt. Durch die unmittelbare Schichterzeugung nach Bedarf konnte die Prozessregelung selbst in die Schichterzeugung eingreifen und je nach aufgetretenem Fehler gewisse Teilbereiche der Struktur z.B. bei Bedarf reparieren lassen.

Die Ergebnisse des Realtime-Slicers sind in Abb. 6.1.3.9 dargestellt.

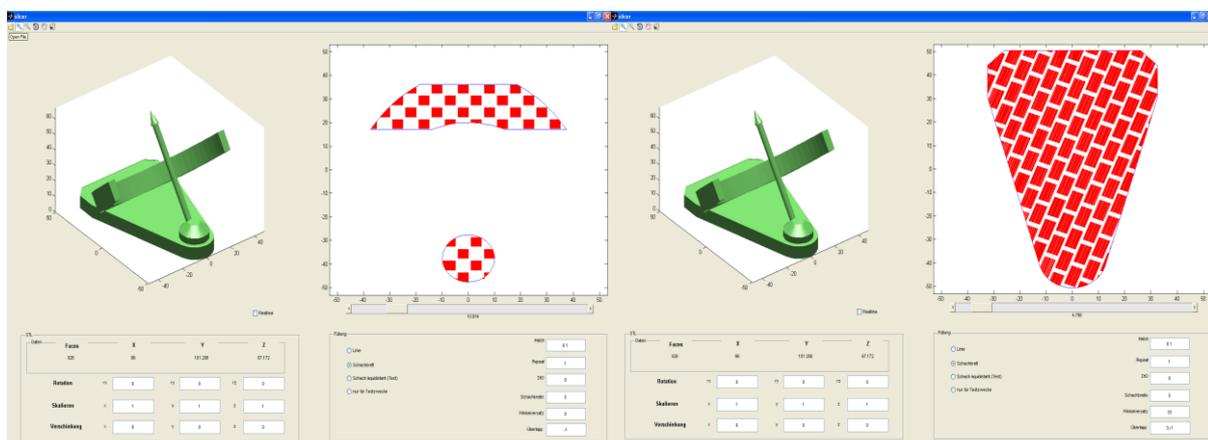


Abb. 6.1.3.9: Realtime-Slicer, Füllalgorithmen: Schachbrettfüllung (links) und Quaderfüllung (rechts)

Er verfügt über ein Interface, mit dem er direkt mit der Lasersoftware kommunizieren kann, und somit die aktuell zu erzeugende Schichthöhe zugewiesen bekommt. Diese wiederum bedient sich des in der Anlage integrierten Messsystems zur Ermittlung der aktuellen Bauteilhöhe. Die dann realtime erzeugten Fülldaten werden der Lasersoftware übergeben, welche letztendlich diese in Bewegung der Bauplattform und des Laserstrahls umsetzt. Das Eingabeformat des Realtime-Slicers ist wie beim vorherigen Programm „IVS-Converter“ eine STL-Datei.

Durch den modularen Aufbau der Programmteile im Realtime-Slicer und in der Bildauswertung kann jeder Programmteil getrennt vom anderen eingesetzt werden. So wurde der Realtime-Slicer auch erfolgreich beim Sintern von Karbiden eingesetzt, da hierbei eine schnelle Anpassung der Füllparameter von Vorteil war.

Für den integrierten Messvorgang mit der Kamera wurde ein Schutzrecht beantragt.

Bauteildichtemessung

Vor dem Projektstart wurden vorrangig Pulver mit geringen Korngrößenverteilungen (guter Rieselfähigkeit) eingesetzt, um einen homogenen Aufzug mittels der eingesetzten scharfkantigen Klingen zu erreichen. Beim Einsatz von neuartigen verpressenden Rakeln konnten auch Pulver eines breiten Korngrößenspektrums verwendet werden. Dies bewirkte zusätzlich eine Erhöhung der Dichte im Pulverbett und auch im generierten Sinterkörper. Die hohe Packungsdichte des Pulvers bewirkte zudem einen verbesserten Wärmefluss, was wiederum die Homogenität des sich ausbildenden Schmelzpool erhöhte. Somit waren die Oberflächen dicht verschmolzen und weniger von den einwirkenden Laserpulsen aufgeraut (Abb. 6.1.3.10).

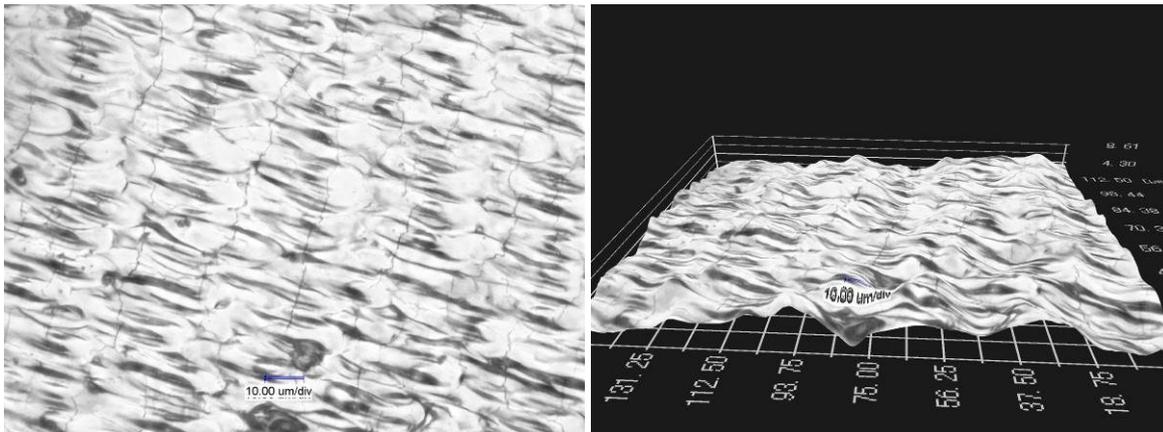


Abb. 6.1.3.10: links - verschmolzene Oberfläche aus Molybdän, rechts - 3D Darstellung der gleichen Oberfläche

Die resultierenden hohen Dichten waren abschließend auch in Querschliffen zu erkennen (Abb. 6.1.3.11). Einzig und allein im Randbereich des Körpers kam es infolge zusätzlich auftretender Scherkräfte zu einer inhomogenen Pulververteilung und somit auch zu Schwankungen in der resultierenden Dichte des gesinterten Bauteiles.

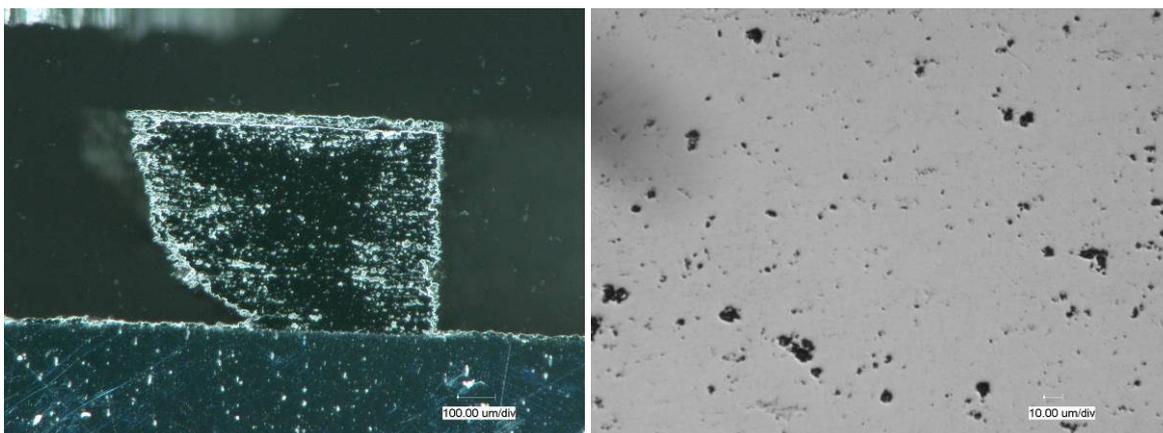


Abb. 6.1.3.11: links - Querschliff einer Molybdänprobe, rechts - Vergrößerte Darstellung des dichten Bereiches

Die „insitu“ Bauteildichtemessung sollte ursprünglich über eine online Rauheitsmessung erfolgen, da in vorhergehenden Versuchen eine umgekehrt proportionale Korrelation zwischen Oberflächenrauheit und Dichte festgestellt wurde. Durch Weiterentwicklung des Verfahrens hin zu glatten und dichten Körpern war diese Annahme nicht mehr gültig. Es fiel somit schwer, Aussagen über die Dichte der Körper während des Bauprozesses zu treffen. Im Anschluss an den Sinterprozess wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, um die Dichte der Bauteile bestimmen zu können. So wurden Untersuchungen mittels Mikrocomputertomografie (Abb.: 6.1.3.12) durchgeführt.

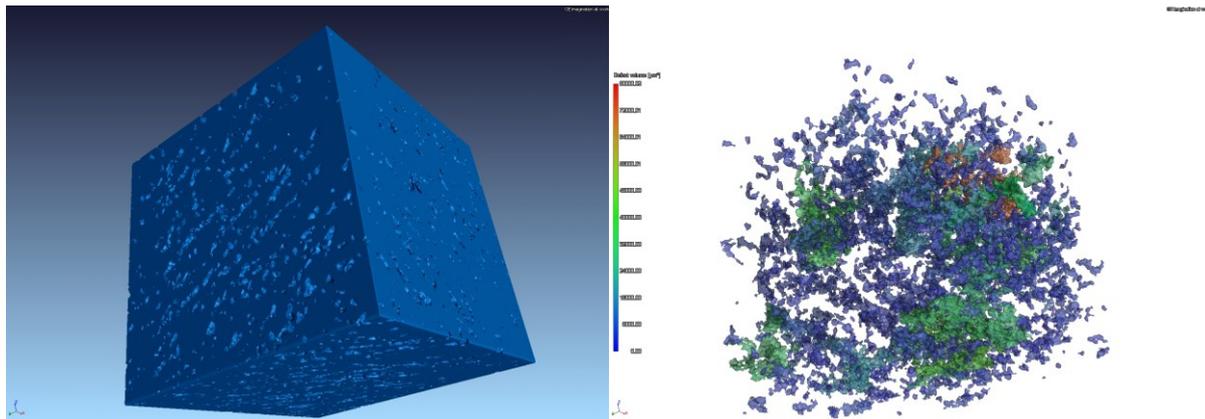


Abb. 6.1.3.12: Bestimmung der Porosität mittels „Mikro CT“, links - Gesamtaufnahme der gesinterten Probe, rechts - örtlich aufgelöste Analyse der Porenvolumina

Bei Analyse der Daten konnte festgestellt werden, dass von den in der lasermikrogesinterten Struktur enthaltenen Poren über 80% ein mittleres Porenvolumen von $8.000 \mu\text{m}^3$ aufwiesen (Abb. 2.1.13, links). Dies hätte auch eine Kugel mit dem Radius von $16 \mu\text{m}$. Wenige Poren hatten Volumina bis hin zu $65.000 \mu\text{m}^3$, was einem Radius von $31 \mu\text{m}$ entsprechen würde. Interessant war, dass der Radius der kleineren Poren dem des Fokus entsprach. Hierbei könnten prozessbedingte Effekte eine Rolle spielen.

Ergänzend wurde ein neues Verfahren zur schnellen Bestimmung der materialspezifischen Eigenschaften von Sinterkörpern untersucht. Hierfür wurden Sinterstrukturen anhand einer Härtemessung nach Vickers (Abb. 6.1.3.13) charakterisiert, welche mit den Härte-Werten des Festkörpers verglichen werden.

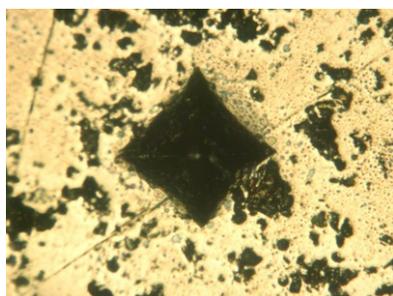


Abb. 6.1.3.13: Eindruck einer Härtemess-Pyramide nach Vickers in eine lasermikrogesinterte Oberfläche

Wie zu erkennen ist, erzeugen Fehler in der Schicht (dunklere Bereiche) eine leichte Verzerrung des Eindruckbildes. Da bei der Härtemessung nach Vickers jedoch nur die Diagonalen zwischen den Ecken zur Bestimmung herangezogen werden, wurde dieser Fehler nicht weiter beachtet. Eine Variation des Pulsabstandes zeigte nach Abbildung 6.1.3.14 einen abfallenden Verlauf der Härte hin zu größeren Pulsabständen.

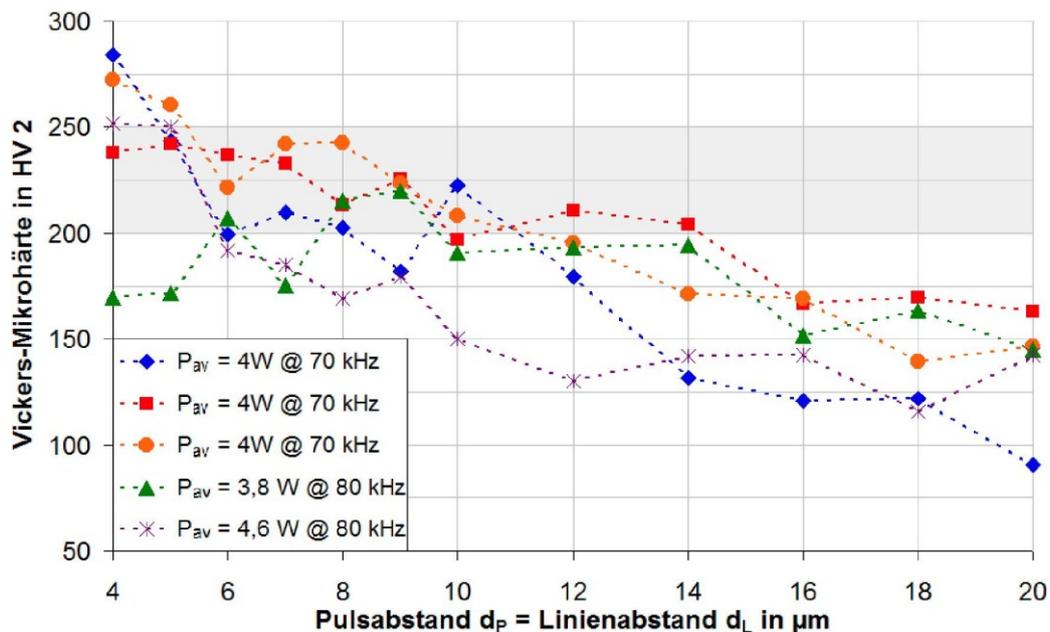


Abb. 6.1.3.14: Härteverlauf bei Variation des Pulsabstandes

Bei den analysierten Strukturen handelte es sich um lasermikrogesinterte Körper aus Molybdän, welche mittels Pulververdichtung erzeugt wurden. Molybdän als reine polykristalline Modifikation besitzt eine Härte von 250HV. Somit trat bei sehr kleinen Pulsabständen eine Aufhärtung des Materials auf.

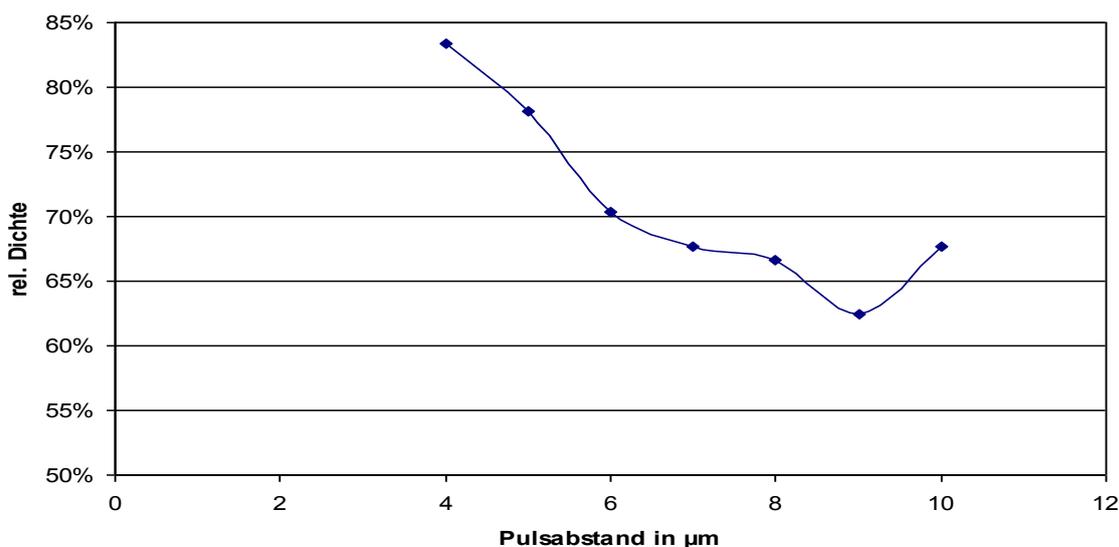


Abb. 6.1.3.15: relative Dichten bei variablen Pulsabständen

Der Dichteverlauf (Abb. 6.1.3.15) der gesinterten Strukturen korrelierte mit dem Härteverlauf. Somit konnte durch die Härtemessung prinzipiell die Qualität der gesinterten Strukturen bestimmt werden. Weitere Untersuchungen müssen jedoch den Aspekt der Aufhärtung des Materials genauer beleuchten.

Messung Prozessstabilität und Stabilität der Messungen

Ein wesentlicher Punkt für die weitere Industrialisierung des Lasermikrosinterns war die Prozessstabilität. Was sind Einflussgrößen auf die Prozessstabilität und wie können diese messtechnisch erfasst werden?

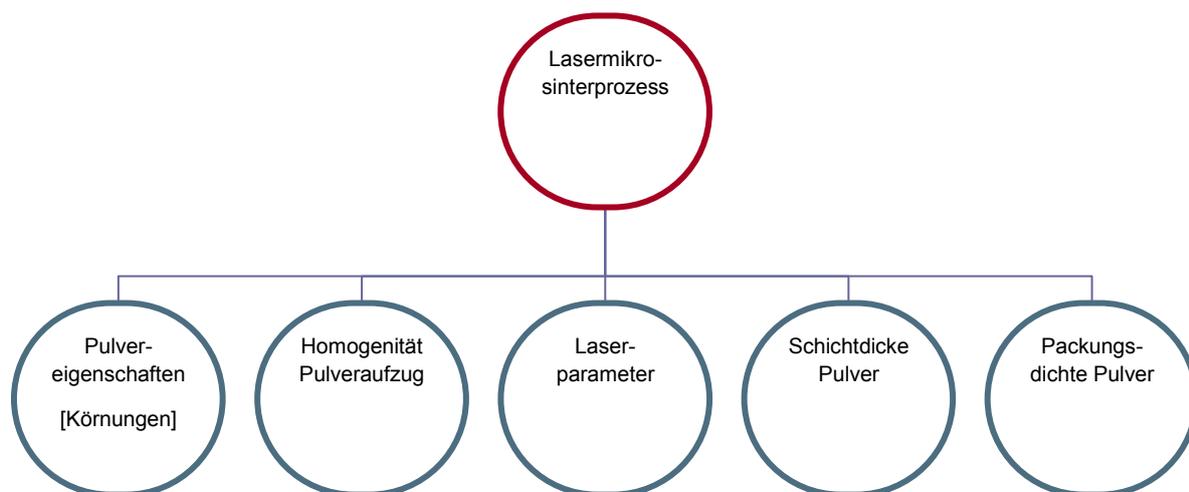


Abb. 6.1.3.16: wesentliche Einflussgrößen auf den Lasermikrosinterprozess

Es konnte durch Aufstellen einer Reihe und Grenzwertbildung mathematisch gezeigt werden, dass sich nach einigen Rakelvorgängen die Sinterschichtdicke d entsprechend Dichtefaktor $D = \text{relative Pulverdichte} / \text{relative Sinterdichte}$ und Höhe der zugestellten Pulverschicht dz durch Absenken der Bauplatzform mit $d = dz / D$ einstellt. Dazu waren mit realistischen Werten ca. 20 Rakelvorgänge notwendig. Mit einer angenommenen relativen Sinterdichte von 80% und einer relativen Pulverdichte von 20% ergibt sich beim Absenken der Bauplatzform um 1 μm eine Pulverschichtdicke von 4 μm . Treten Schwankungen im Laserprozess auf, führen die zu Schwankungen der Dichte des Sinterkörpers und infolge zu Schwankungen der Pulverschichtdicke. Ist die Pulverschicht dann temporär zu dick, kann es infolge zu geringer Laserleistung zu einer nicht durchgehenden Sinterung des Pulvers kommen und der Sinterkörper delaminieren. Das Gleiche kann bei lokal zu großer Dichte des Pulvers auftreten. Beide Probleme ließen sich jedoch durch Variation von anderen Parametern teilweise wieder kompensieren. So könnte zum Beispiel die Laserleistung gezielt erhöht werden, um auch lokal dickere oder dichtere Pulverschichten sintern zu können.

Entstehen infolge ungleichmäßigen Pulveraufzugs laterale Dichtegradienten in einer Schicht, kann dies durch statisch angepasste Parameter nicht kompensiert werden. Stark streuende Prozesskenngrößen bedürfen dynamischer Kompensation durch „insitu“ - Anpassung des Prozessregimes. Welche Größen könnten dazu messtechnisch während des Prozesses erfasst

werden? Zum einen sind dies die Höheninformationen (vgl. Höhenmessung), zum anderen die Bilder aus dem Kamerasystem (vgl. vertikale Messung). Die Höhenmessung lieferte direkte Messwerte aus dem Prozess. Diese konnten verwandt werden, um zum Beispiel ein Abweichen der gerakelten Schichthöhe vor oder der gesinterten Schichthöhe nach dem Sinterprozess zu detektieren und mittels Steuerung von Prozessparametern zu kompensieren. Daten aus der vertikalen Messung konnten nicht so leicht in direkte Messwerte überführt werden, da hierfür ein Zwischenschritt, eine bildtechnische Analyse, notwendig war. Messwerte aus dieser Gruppe waren jedoch besonders interessant, da sie Fehler im Aufbau des Sinterkörpers bereits nach einer Belichtung der Schicht zeigten. Prinzipiell wurde für diese Analyse ein Softwaremodul benötigt, welches die wesentlichen Messgrößen aus dem Bild extrahieren konnte. Dies sollte vorzugweise über eine Kantendetektion des aufgenommenen Schichtbildes erfolgen. Hierzu wurde in der Bildverarbeitung der Laplace-Operator (Gl. 2) auf die Helligkeitsinformationen des Bildes angewandt,

Gl. 2

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

also die zweite Ableitung nach x und y gebildet, und nach Nulldurchgängen in der Lösung gesucht (Gl. 3).

Gl. 3

$$0 = \nabla \cdot (\nabla f) = \Delta f$$

Diese relative einfache Operation konnte mittels geeigneter Bildverarbeitung realisiert werden.



Abb. 6.1.3.17: Simulation der nötigen Schritte des Analysemoduls mittels einer Bildverarbeitungssoftware (a): Original Bild einer gesinterten Schicht (Zahnkappe SiO₂), (b): Kontrastanpassung und Stilisierungsfilter, (c): angewandter Laplace-Operator in x und y

Mit der Simulation (Abb. 6.1.3.17 (b)) konnte schon ein recht gutes Ergebnis erreicht werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass ein weiterer Schritt nötig war, um eine eindeutige Kantenfilterung zu erreichen. So mussten die Kontrastwerte angepasst werden, um die Sinterschicht markant aus dem Pulverbett hervorzuheben. Ebenfalls konnten durch einen schwachen Weichzeichnungsfilter lokal im Pulverbett auftretende hohe Helligkeitswerte aufgrund direkt reflektierender Partikel entfernt werden. Der letzte Schritt war die Filterung durch den Laplace-Operator, der letztendlich das gewünschte Ergebnis lieferte (Abb. 6.1.3.17(c)). Für den Lasermikrosinterprozess wurde ein autonom arbeitendes Modul benö-

tigt, welches die Messgrößen aus dem Bild extrahiert. Die Software sollte zusätzlich einen Vergleich zwischen gewünschter und entstandener Struktur durchführen können (Abb. 6.1.3.18). Die Realisierung steht noch aus.

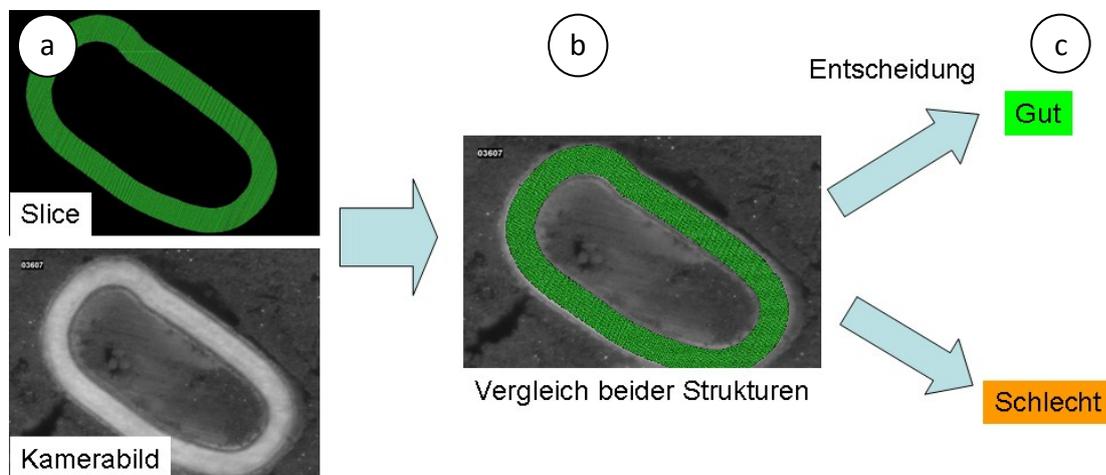


Abb. 6.1.3.18: Aufgabe des Softwaremoduls zur Prozessüberwachung, (a) - Eingangsdaten (Slice) und aufgenommenes Kamerabild, (b) - Überlagerung und Vergleich, (c) - Entscheidungsfindung gut bzw. schlecht

Im Rahmen der Untersuchungen zur Prozessstabilität wurden Analysen zur Oberflächenbeschaffenheit sowie zur Bauteilhöhe von gesinterten Körpern durchgeführt, um evtl. auftretende Fehler anhand von realen Messdaten charakterisieren zu können. Hierfür wurden lasermikrogesinterte zylindrische Probekörper einem flächenhaften Höhenscan unterworfen. Zwei dieser Sinterkörper, welche aus ein und demselben Sinterprozess stammten, wiesen bereits markante Unterschiede in ihrer Oberflächenbeschaffenheit auf (Abb. 6.1.3.19).

Es war zu erkennen, dass das unterschiedliche Pulveraufzugverhalten an verschiedenen Positionen des Bauraumes zu Unregelmäßigkeiten führte. Ein Körper aus dem Randbereich schien eine homogenere Struktur als die mehr innen liegenden Probekörper zu haben. Dieser Effekt kann durch einen verbesserten Pulveraufzug am Randbereich erklärt werden. Dies konnte bereits vorher bei Untersuchungen zum Pulverauftrag festgestellt werden. Durch eine erhöhte Scherwirkung am Substratrand wurde das Pulver vorzugsweise an diesen Bereichen mit erhöhten Schütt- bzw. Rakeldichten vom Rakel abgesetzt (Abb. 6.1.3.20).

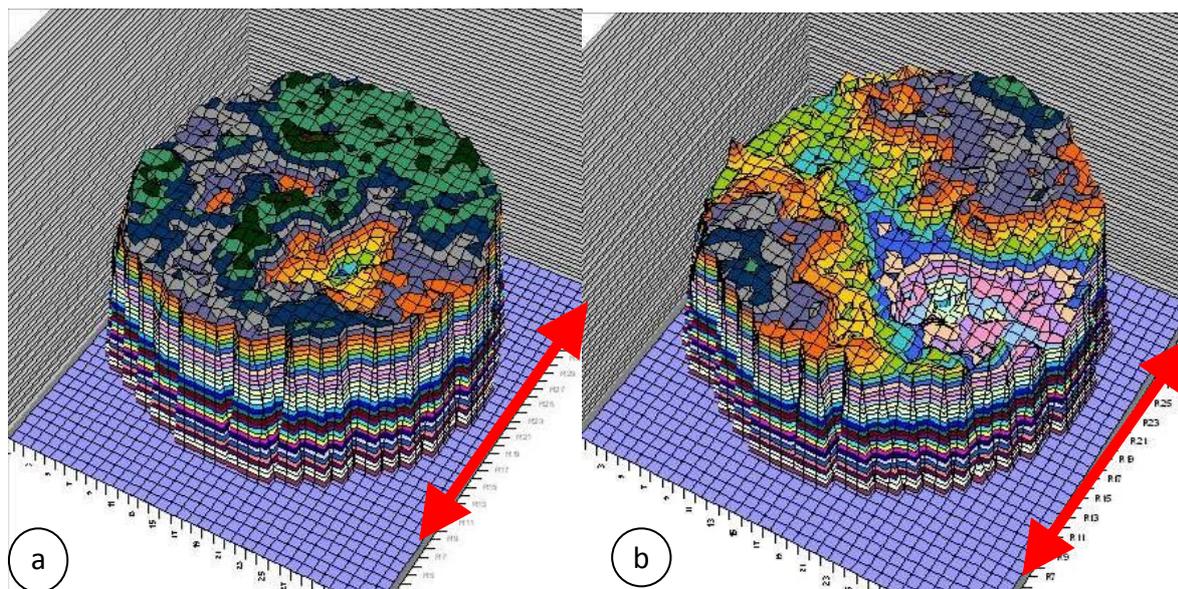


Abb. 6.1.3.19: flächige Profilanalyse zweier gesintertter Probekörper, Rakellaufrichtungen (rote Pfeile) bei wechselseitigen Abzug, (a) - Probekörper vom Substratrand, (b) - Probekörper aus der Substratmitte

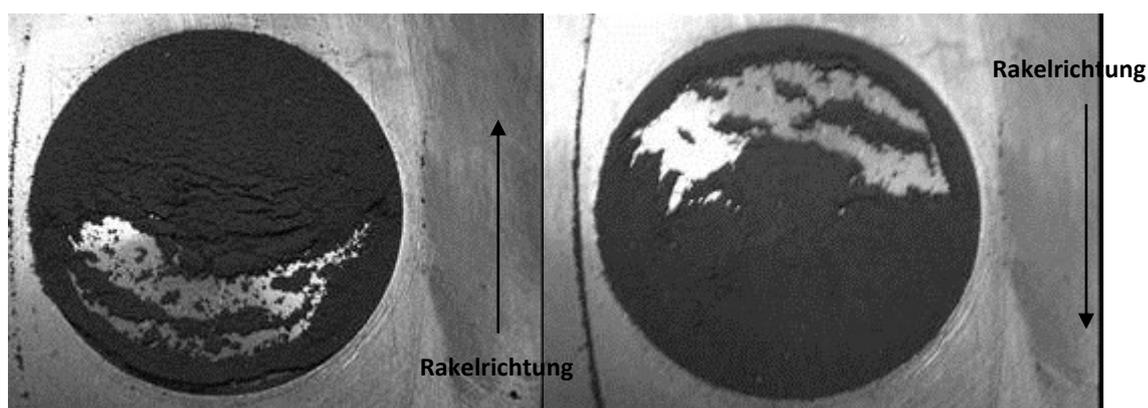


Abb. 6.1.3.20: Aufzugsverhalten des Pulvers an scherenden Kanten bei unterschiedlichen Rakelrichtungen (Substratdurchmesser 25 mm, Sinterplattformabsenkung 100 μm)

Dieser unzureichende Pulveraufzug machte sich somit auch in den gesinterten Strukturen bemerkbar. Eine wesentliche Verbesserung des Schichtaufzugs konnte mittels breiten mit Keramik laminierten Rakeln erzielt werden. Eine weitere Verbesserung wurde durch eine integrierte Pulververdichtung erreicht. Hierbei wurde das Pulver zunächst in einem ersten Schritt auf die sehr tief abgesenkte Sinterplattform aufgetragen, um in einem zweiten Schritt mittels eines über die Sinterplattform gefahrenen Verschlusses durch Anheben der Sinterplattform verdichtet zu werden (Abb. 6.1.3.21).

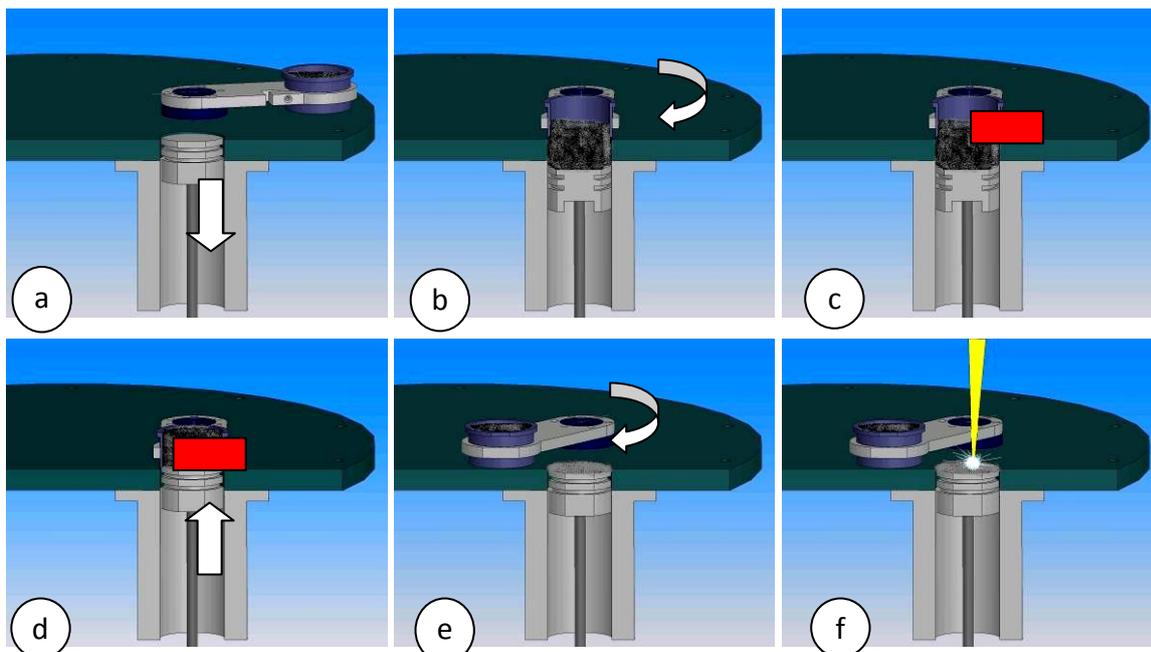


Abb. 6.1.3.21: Ablauf der Pulververdichtung, (a) - Absenken der Plattform, (b) - Einfüllen des Pulvers, (c) - Verschließen der Sinterplattform, (d) - Verpressen des Pulvermaterials, (e) - Abziehen, (f) - Sintern der Schicht

Das Verschließen der Sinterplattform wurde durch den zweiten sich in der Sinterkammer befindlichen Rakelarm realisiert. An diesem wurde eine Platte von entsprechender Größe auf die Sinterplattform gefahren, um diese komplett zu verschließen und den nötigen Gegenruck für das Verpressen des Pulvermaterials aufzubringen. Hierdurch wurde eine größtmögliche relativ homogene Pulverdichte erzielt. Die erzeugten Sinterstrukturen waren homogener als vorher (Abb. 6.1.3.22).

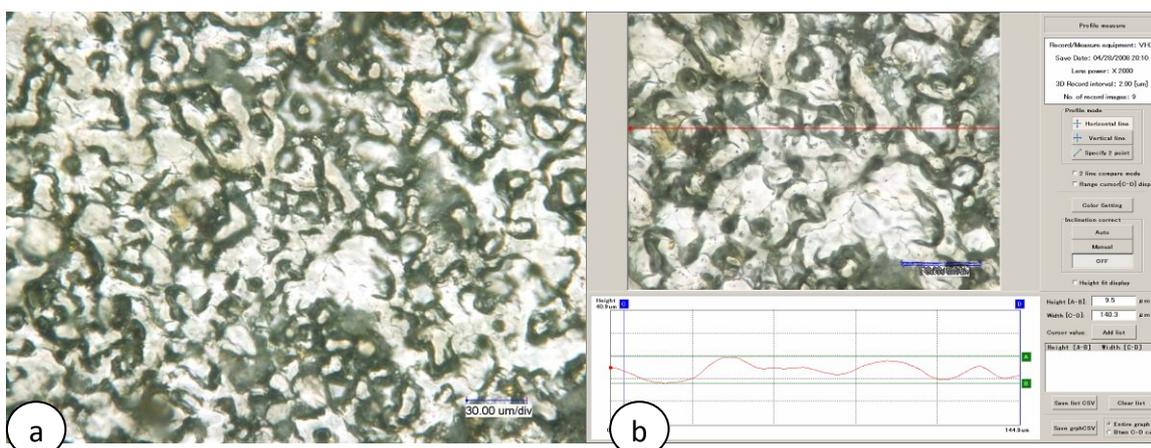


Abb. 6.1.3.22: (a) - Oberfläche einer Sinterstruktur mit Pulververdichtung, (b) - Profilanalyse der Oberfläche, $\Delta z_{max} = \pm 4,5 \mu m$

Infolge der hohen Packungsdichte des Pulvers konnte ein sehr hoher Schmelzanteil im Sintergefüge erzeugt werden. Auch ein kompletter Oberflächenscan zeigte eine sehr homogene Oberfläche (Abb. 6.1.3.23).

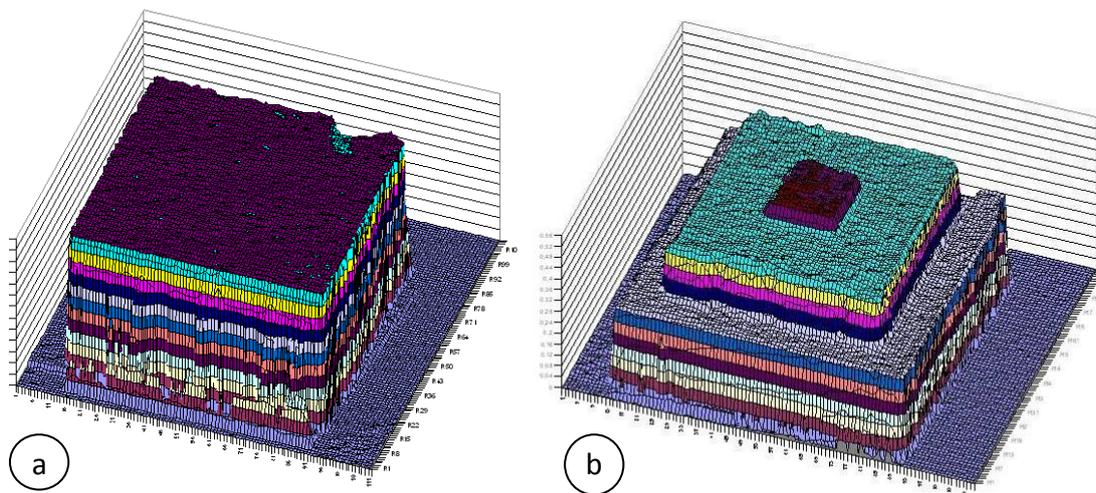


Abb. 6.1.3.23: 2D Höhenprofil eines/r (a) - Sinterkörpers, (b) - pyramidenartigen Struktur

Ermittlung der Auflösungsgrenzen

Horizontale Messung:

Um die Auflösungsfähigkeit des in den Strahlengang eingebrachten Kameramodules testen zu können, wurde ein Testfeld mit variablen Pulsabständen erzeugt (6.1.3.24).

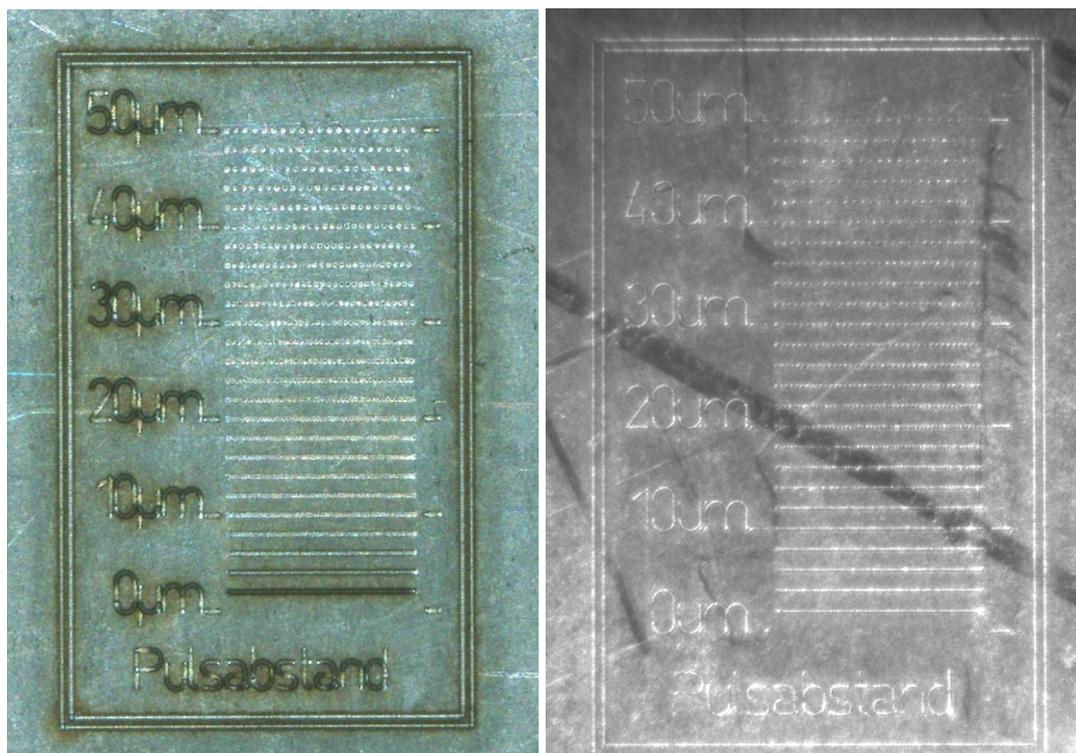


Abb. 6.1.3.24: links - Mikroskop Aufnahme des Testfeldes, rechts - unmittelbar nach der Bearbeitung aufgenommenes Testfeld mittels integriertem Kameramodul

Es stellte sich heraus, dass eine Unterscheidbarkeit der Pulse bis zu einem Abstand von ca. 10 µm möglich war. Die theoretische Auflösung sollte nach (Gl. 4) bei 2,8 µm liegen.

$$\text{Gl. 4} \quad \text{Auflösung} = 1,22 \frac{\text{Apertur}}{f_{\text{Objektiv}} \cdot \lambda_{\text{Beleuchtung}}} = 1,22 \frac{14\text{mm}}{80\text{mm} \cdot 630\text{nm}} = \underline{\underline{2,777 \mu\text{m}}}$$

Der in der Kamera integrierte CCD-Chip besaß jedoch einen Pixelabstand von 4,5 µm, was die Auflösungsgrenze auf diesen Wert herabsetzt. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass ein scharfes Kamerabild nur mit fast geschlossener Blende möglich war. Infolge der chromatischen Aberration wurden die äußeren Anteile der Beleuchtungswellenlänge von 630 nm durch das für eine Wellenlänge von 1064 nm ausgelegte F-Theta-Objektiv verzerrt auf der Bildebene abgebildet (Abb. 6.1.3.25). Lediglich der Mittenbereich wurde scharf dargestellt. Dieser Effekt verstärkte sich noch durch das in der Mikrosinter-Anlage eingesetzte telezentrische F-Theta-Objektiv.

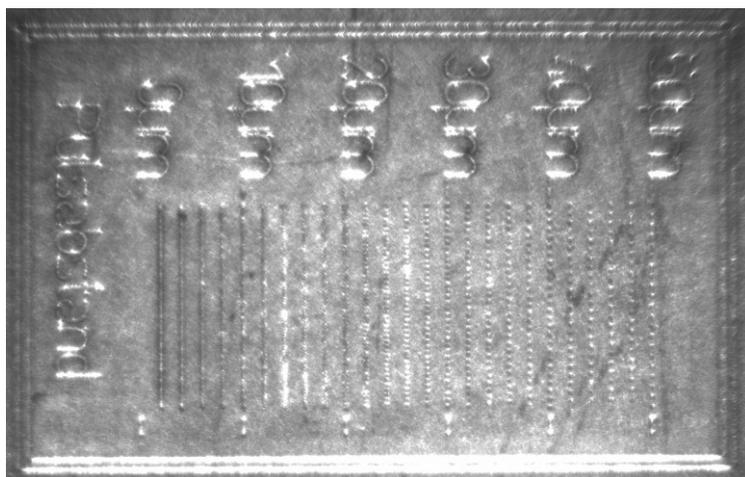


Abb. 6.1.3.25: Aufnahme des Testfeldes mittels Kameramodul bei geöffneter Blende durch ein telezentrisches F-Theta-Objektiv mit Brennweite 80 mm

Vertikale Messung:

Zur Ermittlung der Auflösungsgrenzen der vertikalen oder auch Höhenmessung musste man sich zunächst auf die Angaben des Herstellers beziehen. Die Firma Keyence gibt für das eingesetzte Modell LK-G32 eine theoretische Auflösung von 50 nm an. Dieser Wert schien jedoch bestenfalls unter idealisierten Bedingungen erreichbar. Um verwertbare Werte zu erhalten, wurde mit dem Sensor an der justierten Bauplattform gemessen (Abb. 6.1.3.26).

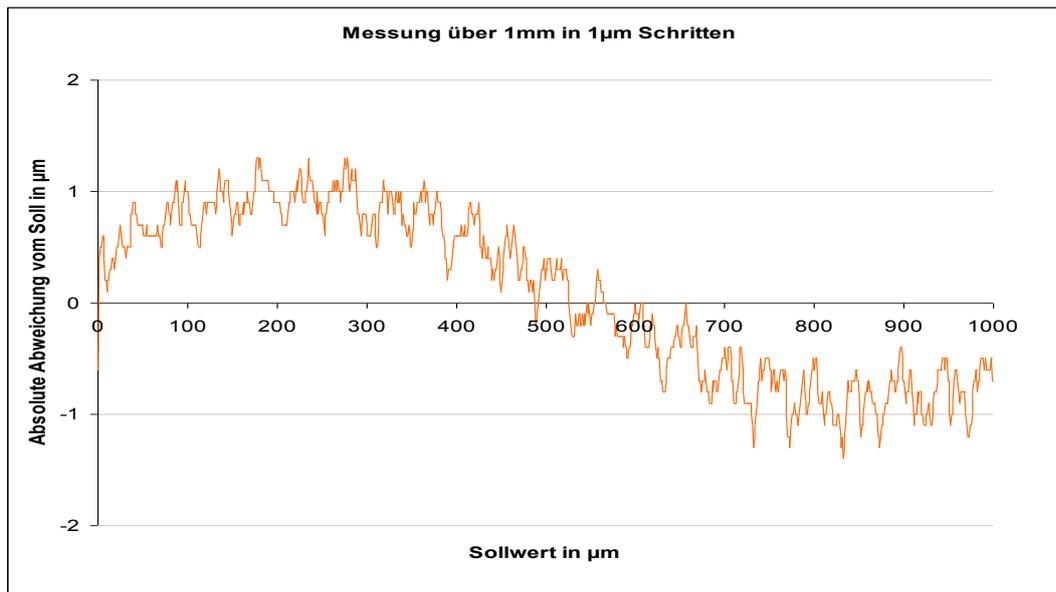


Abb. 6.1.3.26: absolute Abweichung des LK-G32 Sensors über einen Bereich von 1 mm

Deutlich war eine sinusförmige Abweichungskurve mit einer Periode von 1,1 mm erkennbar. Die Oberschwingungen auf der Kurve mit einer Breite von ± 200 nm können als Streuung des Sensors angesehen werden. Die Herkunft der periodischen Abweichungen konnte nicht eindeutig geklärt werden. Es könnte sich um Fertigungs- oder Lagetoleranzen des sich an der Bauplattform befindlichen optischen Referenzmesssystems handeln. Selbst mit dieser sinusförmigen Messverzerrung lag der Gesamtfehler des Systems in einem vertretbaren Rahmen von ± 1 μm . Ein genaueres Abgleich der Komponenten wäre in diesen Dimensionen nur mit sehr teurer Messtechnik möglich gewesen.

Demonstratorstrukturen

Zur Demonstration der Möglichkeiten der neuen Erkenntnisse zum Lasermikrosintern wurden verschiedene Mikrostrukturen aus Molybdän gebaut. Durch die Pulververdichtung gelang eine Erhöhung der Auflösung bei gleichzeitig erhöhter Dichte des gesinterten Materials.

Mittels einer Auflösungssteststruktur wurde die kleinste Strukturbreite mit 25 μm bestimmt, was dem Fokusdurchmesser auf dem Pulvermaterial entsprach. Für Strukturen wie Stege, Schlitze oder Löcher konnte ein Offset eingesetzt werden, um maßhaltige Größen der Sinterstrukturen von besser als 10 μm zu erreichen. Spitzen oder Ecken dagegen werden immer eine Verrundung in der Größe der maximalen Auflösung erfahren, also im vorliegenden Fall wird sich ein minimaler Radius zu $r = 12,5$ μm einstellen (Abb. 6.1.3.27).

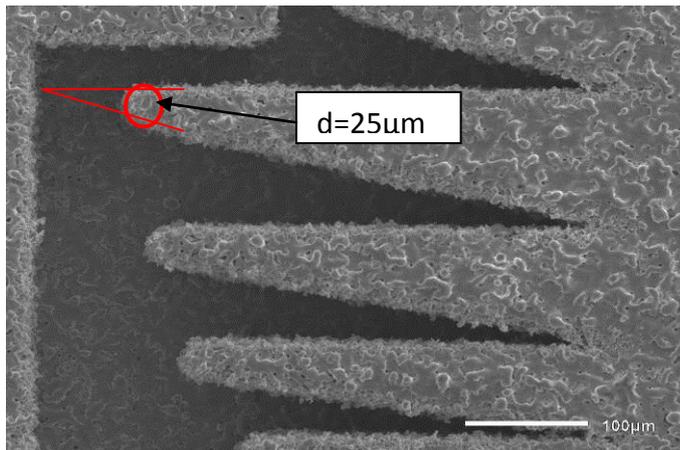


Abb. 6.1.3.27: Auflösung entsprechend Fokusbereich

Durch Wahl der geeigneten Offsets konnten auch maßgenaue komplexe mechanische Gebilde mit definierten Rundungen und Mikroschlitzern mittels Lasermikrosintern hergestellt werden, wie z.B. ein Mikro-Planetengeräte mit Evolventen-Verzahnung, bei dem die Zahnräder drehbar sind (Abb. 6.1.3.28).

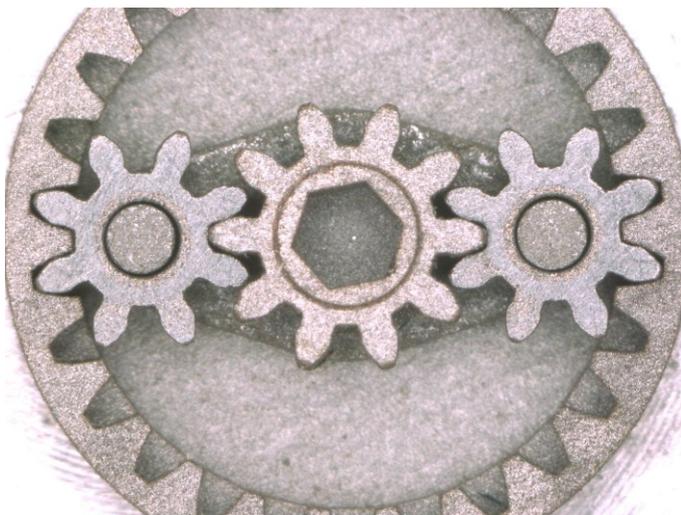


Abb. 6.1.3.28: Mikro-Planetengeräte, Außendurchmesser 5,5 mm

Weiterhin wurde die Konstruktion eines Turboladers für den Automobilbereich um den Faktor 40 miniaturisiert (Abb. 6.1.3.29) und das Teil entsprechend generiert. Die resultierende Höhe betrug hierbei 5 mm bei einem Außendurchmesser von nur 3 mm. Die Sinterdichte sollte entsprechend Dichtemessungen bei ca. 97% liegen. Die Aufnahme mit einer hochauflösenden „Nano“-CT (Computer Tomographie) (Abb. 6.1.30) zeigte bis auf einige überhängende Seiten porenfreies Material. Die Auflösungsgrenze des „Nano“-CT-Verfahrens betrug 3 µm. Die 3D Darstellung (Abb. 6.1.3.30 (rechts)) lässt darauf schließen, dass alle internen Komponenten in höchster Auflösung vollständig erzeugt wurden. Auch der Abstand zwischen dem Gehäuse und der inneren Welle, welche die Turbinenschaufeln trägt, wurde realisiert.

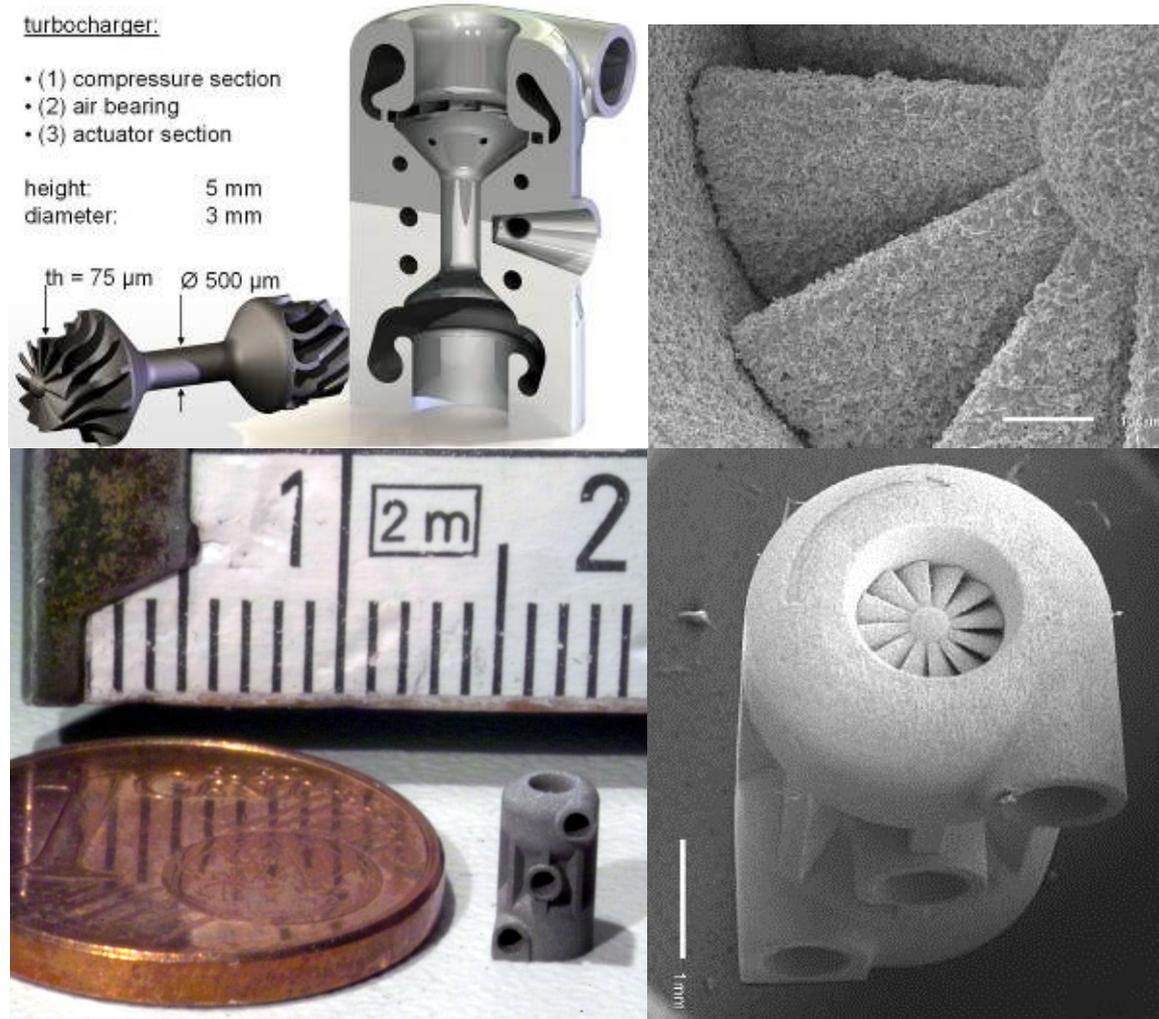


Abb. 6.1.3.29: Konstruktionszeichnung des Turboladers mit miniaturisierten Maßen (links oben), Vergleich mit einer 1 Cent Münze (links unten), REM-Aufnahmen des Turboladers im Detail und komplett (rechts oben und unten)

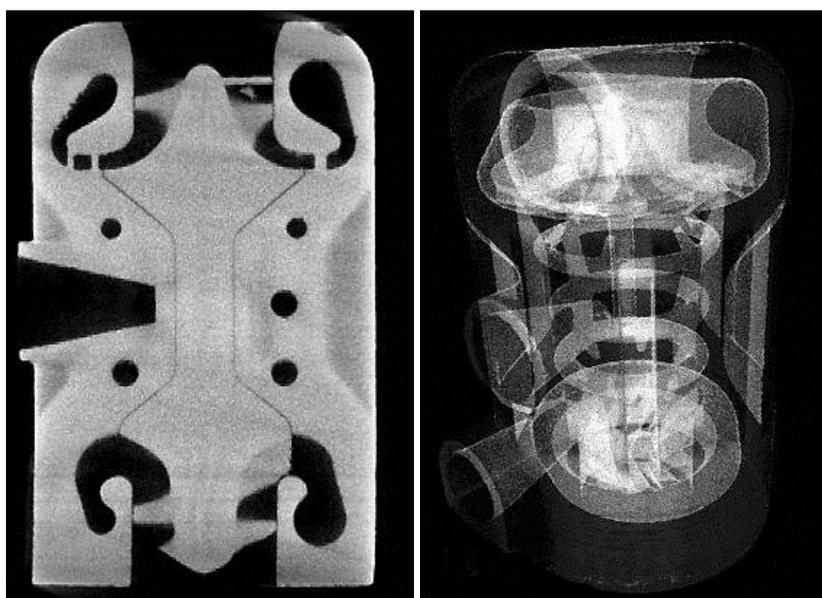


Abb. 6.1.3.30: „Nano“-CT-Aufnahmen des Turboladers

Die Herstellung der Turbine wurde auf Grundlage einer Versuchsreihe zur Erzeugung von neuartigen und miniaturisierten Stromerzeugungssystemen durchgeführt. Durch diese grundlegenden Untersuchungen sollte die Eignung des Verfahrens für den Bau von mikro-mechanischen Komponenten nachgewiesen werden. Die erfolgreiche Generierung des Planetengetriebes und des Turboladers bedeutet den Einstieg zur Generierung weiterer funktionaler Miniaturmaschinen mit integrierten beweglichen Komponenten.

Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens

Prinzipiell handelte es sich bei dem zum Schutzrecht angemeldeten Messverfahren um ein modifiziertes Konfokalmessprinzip, welches in die bestehenden Laseraufbauten integriert werden sollte. Dazu musste in den Strahlengang zusätzlich ein Strahlteiler, der die von der Bearbeitungsstelle ausgehenden Rückreflektionen auf einen Filter, welcher eine selektive Transparenz für die Laserwellenlänge aufwies, eingebracht werden. Mittels einer zweiten Linse wurde der rückreflektierte Messstrahl fokussiert und auf einen Sensor zur Bestimmung des Fokusdurchmessers gelenkt. Normalerweise werden in solchen Systemen bewegliche Lochblenden eingesetzt, um die exakte Position der zweiten Fokusebene zu bestimmen. Der neuartige Aufbau sah aber hierfür ein Strahlableitungssystem bestehend aus einem rotierbaren Polygonspiegel vor (Abb. 6.1.3.31). Der Vorteil eines solchen Aufbaus sollte sein, dass er einfach in einen bestehenden Strahlengang zu integrieren ist und somit eine Messung während der Laserbearbeitung zulässt und dass durch die schnelle Verschiebung des Laserstrahls auf einem mehrdimensionalen Sensorelement (Abb. 6.1.3.31), z.B. einem CCD-Array oder einer Linienkamera, das Messergebnis unmittelbar und stetig zur Verfügung steht, also keinerlei Auswertzeit zur Erzeugung eines Höhenwertes benötigt wird.

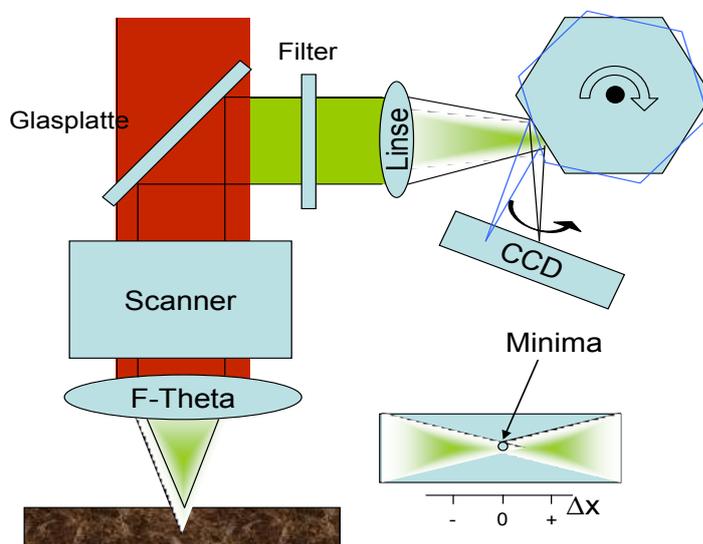


Abb. 6.1.3.31: „insitu“-Höhenmessung nach einem abgewandelten konfokalen Messprinzip mittels Polygonspiegelscanner und CCD-Zeilenarray

Prinzipiell wirkt der Messaufbau nach dem Verfahren der Fokusebenendetektion des sich hinter der Messlinse ausbildenden Fokus. Bei einer axialen Verschiebung der reflektierenden Oberfläche unter dem F-Theta-Objektiv kommt es infolge der optischen Gesetzmäßigkeiten

zu einer Verschiebung der Ebene des Messfokus. Diese wiederum kann mittels der speziell angeordneten CCD-Zeile ausgewertet werden. Zur Entwicklung des Verfahrens wurde ein Messaufbau erstellt, der die reale Situation am Einsatzort, also in der Anlage, widerspiegeln sollte. Zunächst wurden wie Abb. 6.1.3.31 zeigt, ein Polygonspiegelscanner und eine CCD-Kamera hinter die Auskoppereinheit positioniert und so eingerichtet, dass sich der ausbildende Fokus bei der Nulllage der Probenoberfläche zentrisch auf dem CCD-Array befand. Die gewählte Brennweite der Messlinse betrug hierbei 100 mm. Für die Versuche wurde ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit Wellenlänge 532 nm eingesetzt, um aufgrund der Sichtbarkeit der Strahlung eine einfache Grundjustage des Systems durchführen zu können. Durch die Rotation des Polygonspiegels sollte eine Strahlkaustik auf dem CCD-Array entstehen und beim Auslesen detektierbar sein. Das resultierende Bild zeigte jedoch nur einen relativ gleichmäßigen Verlauf der Intensität. Damit konnte die Fokusposition innerhalb der Strahlkaustik nicht bestimmt werden (Abb. 6.1.3.32). Durch den Einsatz einer wesentlich empfindlicheren Zeilenkamera mit einer Zeilenlänge 5 cm und einer Pixelanzahl von 2048 und einer speziell aufgebauten Triggerschaltung konnte trotz Unzulänglichkeiten der Strahlablenkung die Fokusposition mittels der relativen Intensitätsverteilung innerhalb der Strahlkaustik bestimmt werden (Abb. 6.1.3.33), jedoch nur in einem geringen Intensitätsbereich, da die Pixel schon bei gering erhöhter Reflexionswirkung der Oberfläche sehr stark überstrahlt wurden.

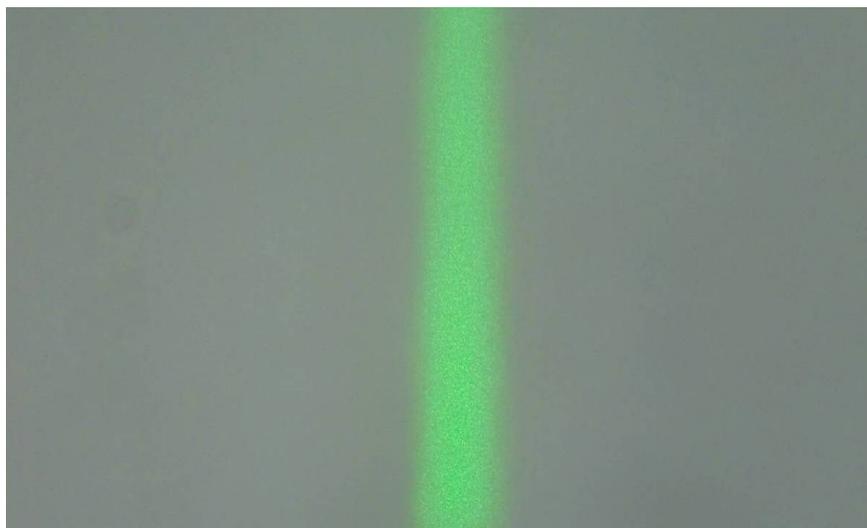


Abb. 6.1.3.32: Bild der Strahlkaustik auf dem CCD-Array

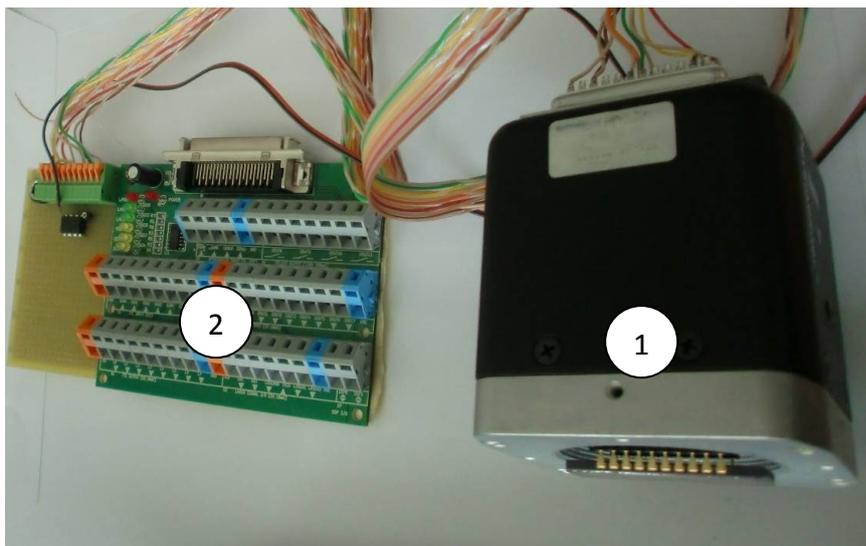


Abb. 6.1.3.33: Aufbau zum Auslesen der analogen Pixelwerte aus der Zeilenkamera, (1) - Zeilenkamera, (2) - Interface zum Auslesen der analogen Pixelwerte

Für weitere Untersuchungen wurde deshalb die Klingemethode genutzt, bei welcher zur Erfassung des Strahlprofils eine gerade und scharfkantige Klinge in den Strahlengang gebracht wird. Wenn sich die Klinge außerhalb der Fokusebene befand, kam es aufgrund der stärkeren Krümmung der ungestörten Wellenfront vor oder nach der Fokusebene zu einer geringen effektiven Auslenkung des Strahles. Wenn die Klingenschneide jedoch relativ nah an der Fokusebene positioniert wurde, bildeten sich neue Elementarwellen an der Klingenseite aus. Diese wurden jedoch nunmehr infolge der geraden Wellenfront im Fokusbereich nicht mehr bzgl. einer vorhandenen Wellenfrontkrümmung kompensiert. Somit war hierbei eine stärkere Auslenkung der Strahlung zu verzeichnen (Abb. 6.1.3.34).

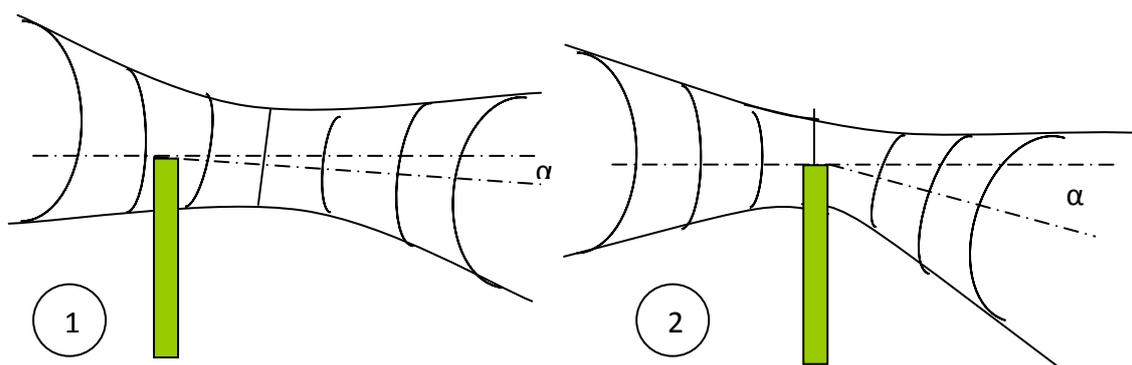


Abb. 6.1.3.34: Ausbildung unterschiedlicher Beugungswinkel durch eine unterschiedliche Position der Klinge bzgl. der Fokusslage des Messlaserstrahles, (1) - Geringe Beugungswirkung der Klinge (grün) durch die Kompensation der Wellenfrontenkrümmung, (2) - Starke Beugung der Strahlung aufgrund der Position der Klinge nahe der Fokusebene

Mittels eines CCD-Arrays wurde die Auslenkung der Strahlung je nach relativer Position der Substratoberfläche gemessen. Die Variation der Verschiebung des Strahlungsschwerpunktes

wurde durch Unterlegen von definierten Probekörpern auf dem Substrat realisiert. Der sich hieraus ermittelte Verschiebungsfaktor von lediglich 216 Pixel/mm war jedoch viel zu gering, um Auflösungen im Bereich von 10 μm erreichen zu können. Zum besseren Verständnis des Ergebnisses wurde der Strahlengang im Versuchsaufbau simuliert (6.1.3.35).

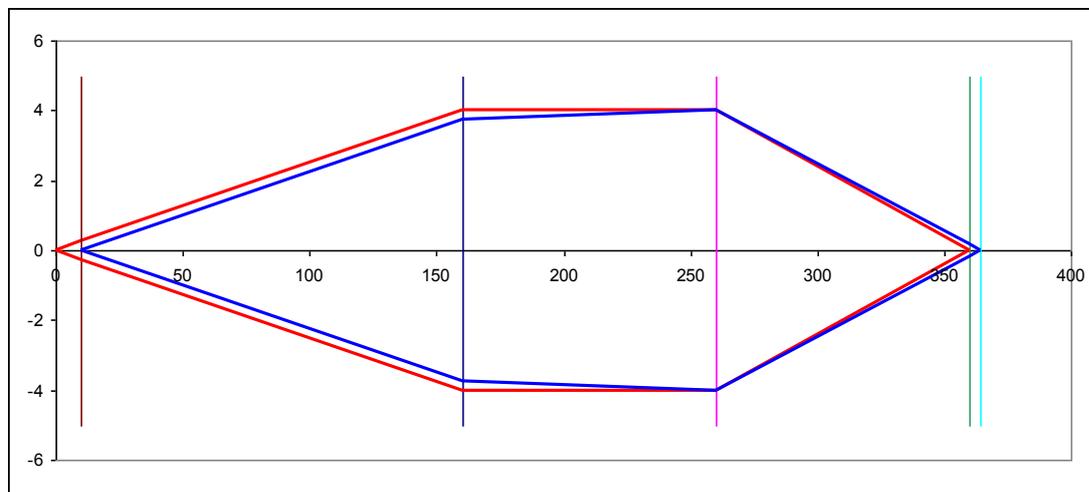


Abb. 6.1.3.35: Strahlengang im Versuchsaufbau, Brennweite F-Theta-Linse = 160 mm, Brennweite Messlinse = 100 mm, roter Strahlengang keine Substratverschiebung, blauer Strahlengang Substratverschiebung von +10 mm, Darstellung der Hauptebenen der Optiken, schwarz: F-Theta-Linse, lila: Messlinse

Der blaue Strahlengang gibt einen Strahlenverlauf an, bei dem sich das Substrat (braune Vertikale, Abb. 6.1.3.35) in einer Position von +10 mm befand. Die Messlinse fokussierte die divergente Strahlung mit einer Verlängerung der effektiven Brennweite von 4,35 mm. Eine Verschiebung der Brennweite von mehr als 4 mm war mit dem Polygonspiegelaufbau zu realisieren (6.1.3.36). Durch die Rotation des Polygonspiegels wurde der Fokus der Messlinse auf zwei Bahnen abgelenkt - bei einer Verschiebung der Substratoberfläche hin zur F-Theta-Linse (Brennebene unterhalb der Substratoberfläche) zur braunen Fokusbahn und bei der Verschiebung unter die Brennebene zur türkisen Fokusbahn. Die maximale Auslenkung der Fokusbahnen wurde mittels geometrischer Beziehungen zwischen Polygon- und Facettengröße und deren Lage berechnet (Gl. 5).

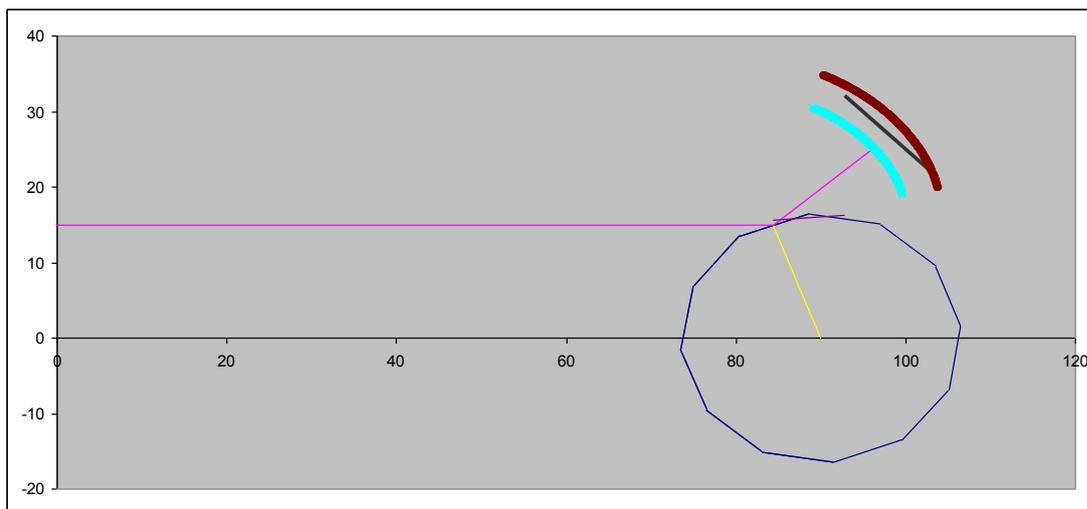


Abb. 6.1.3.36: geometrische Anordnung der CCD-Zeile (schwarz) zum Polygonspiegel, sowie die zwei möglichen Fokusbahnen bei Über- (türkis) und Unterfokussierung (braun)

$$\begin{aligned}
 x_{Facette} &= 0 \\
 y_{Facette} &= l_1 - r \cdot \cos \alpha + (x_D - r \cdot \sin \alpha) \cdot \tan \alpha \\
 x_f &= x_{Facette} + \sin(2\alpha) \cdot (f' - y_{Facette}) \\
 y_f &= y_{Facette} - \cos(2\alpha) \cdot (f' - y_{Facette})
 \end{aligned}$$

Drehmatrix :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 - x_M \\ y_0 - y_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}$$

Gl.5

Fokusverschiebung :

$$\Delta z' = l - f_2$$

$$l = \frac{(z - f_1) - \frac{d}{f_1} \cdot (z - f_1) - d}{\frac{(z - f_1) - \frac{d}{f_1} \cdot (z - f_1) - d}{f_2} + \frac{z - f_1}{f_1} + 1}$$

Ausgehend von den gewählten Positionen des CCD-Arrays und des Polygonspiegels ergab sich rechnerisch eine Intensitätsverteilung, wie sie in Abbildung 6.1.3.37 dargestellt ist. Bei Verschiebung der Substratoberfläche um mehrere Millimeter konnte eine gute Auflösung auch praktisch nachgewiesen werden. Relativ kleine Verschiebungen der Oberfläche waren jedoch mit dem optischen Aufbau kaum detektierbar und wenn dann nur mit einer starken Abhängigkeit bzgl. des Reflektionsvermögens der Oberfläche der zu untersuchenden Probe.

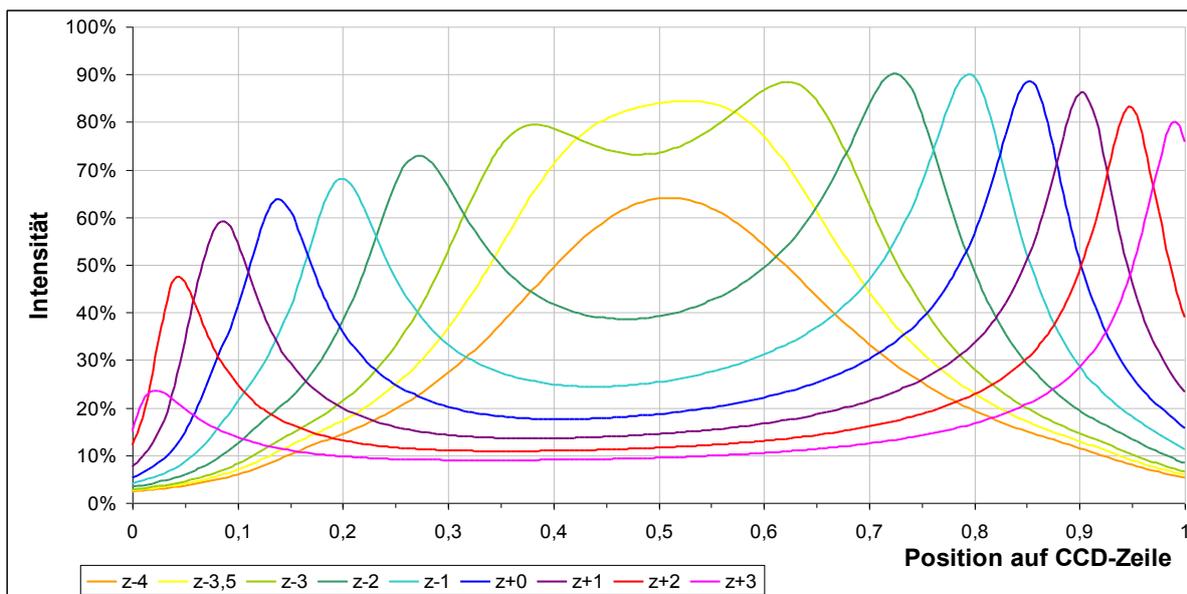


Abb. 6.1.3.37: berechnete Intensitätsverteilungen auf der CCD-Zeile bei verschiedenen z-Positionen der Substratoberfläche

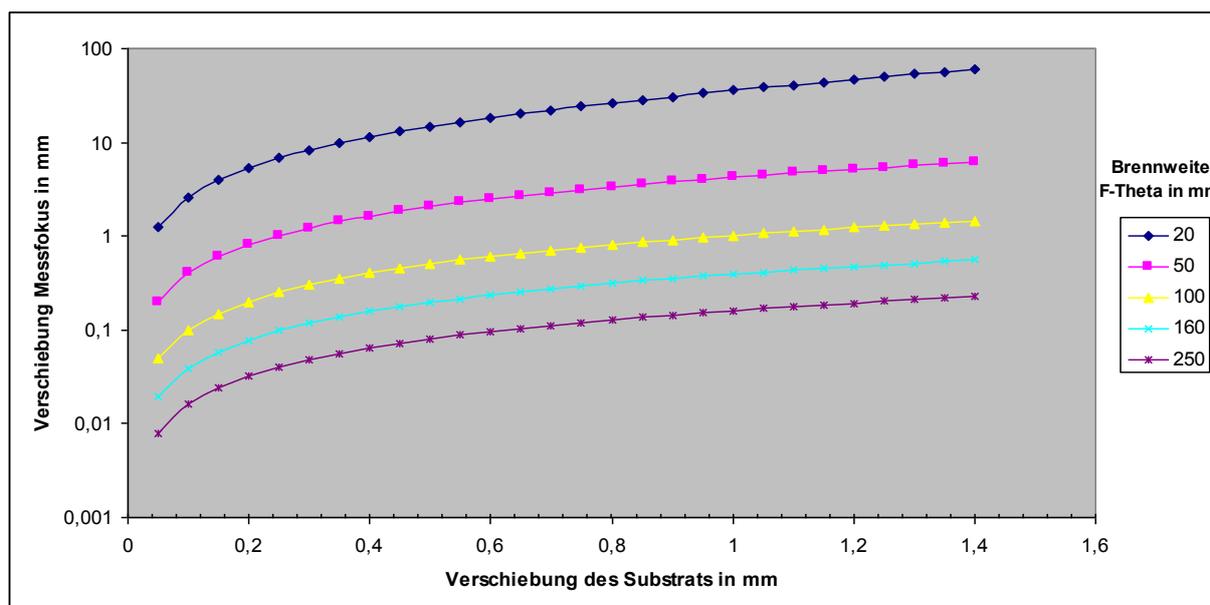


Abb. 6.1.3.38: berechnete Verschiebung der Messfokusebene zur Verschiebung der Substratoberfläche bei verschiedenen Brennweiten der F-Theta-Linse

Entscheidend für die Erhöhung der Auflösung ist wie in Abbildung 6.1.3.38 dargestellt die Brennweite der F-Theta-Linse. Bei der verwendeten Brennweite von 160 mm treten bei kleinen Höhenänderungen der Substratoberfläche lediglich sehr geringe Verschiebungen der Fokusslage auf. Bei einer Verschiebung der Substratoberfläche von 50 μm tritt eine Verschiebung der Messfokusslage von 19,5 μm auf. Diese geringe Verschiebung führt folglich auch nur zu einer nicht messbaren Änderung des Intensitätsprofils auf der CCD-Zeile. Eine scheinbare Lösung wäre hierfür eine langbrennweitigere Messoptik. In diesem Fall würde sich jedoch

auch die Rayleigh-Länge vergrößern und eine exaktere Detektion der Fokusslage verhindern. Wie aus Abb. 6.1.3.38 zu entnehmen ist, wären Brennweiten von weit unter 50 mm nötig, um eine effektive Messung im Bereich von 10 μm realisieren zu können.

Optimierung der Werkstoffeigenschaften

Anhand von Pulvermischungen aus Zink und Kupfer sollte untersucht werden, inwiefern mittels Lasermikrosintern definierte Mischkristallphasen bzw. intermetallische Phasen generierbar sind. Dafür wurden Pulvergemische definierter Zusammensetzung anhand des Zink-Kupfer-Phasendiagramms ausgewählt. Die Zusammensetzungen der mit A, B, C und D bezeichneten Pulverausgangsmischungen sind in Tab. 6.1.3.1 2. Spalte aufgeführt. Generiert werden sollten: α -Mischkristall, β -Messing, γ -Messing und ϵ -Messing. Aus den Pulvermischungen wurden entsprechende Probekörper generiert. Aufgrund der niedrigeren Siedetemperatur des Zinks (907°C) gegenüber der Schmelztemperatur des Kupfers (1085°C) musste eine Kombination aus nicht zu hoher Pulsenergie bei gleichzeitig genügend hoher mittlerer Laserleistung verwendet werden, bei der das Verdampfen des Zinks vermieden wurde und das Verschmelzen bzw. Anlösen der Komponenten gewährleistet werden konnte. Anschließend wurden die Probekörper röntgendiffraktometrisch und metallographisch untersucht, um Rückschlüsse über die Vollständigkeit der Umsetzung zu erhalten. Danach wurden die Proben in einem Hochtemperaturofen unter Schutzgasspülung (Argon) thermisch nachbehandelt und erneut röntgendiffraktometrisch und metallographisch ausgewertet. Entsprechend der Mischungsverhältnisse wurden spezifische Ofentemperaturen (Probe A: 700°C; Probe B und C: 650°C; Probe C: 450°C; Dauer: je 3h) gewählt.

Tab. 6.1.3.1: Anteile der Gefügekomponenten von Sinterproben aus Cu/Zn-Pulvermischungen

sample number	powder mixture ratio	Cu (%)	Zn (%)	ZnO	α -brass		β -brass		γ -brass		ϵ -brass		Cu/Zn ratio as laser sintered (metal phase)
				Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	
A	4,00	85	9	0,8	-	-	-	-	-	-	1	4	6,62
B	1,08	55	14	-	-	-	7	7	-	-	3,4	13,6	1,89
C	0,54	37	23	-	-	-	8	8	-	-	4,8	19,2	0,99
D	0,20	16	31	3,2	-	-	10	10	-	-	5,8	23,2	0,50

Die durch die Mischungsverhältnisse erzielbaren Messingphasen wurden durch das Lasermikrosintern nicht erreicht. Im generierten Gefüge lagen große Anteile ungelösten Kupfers und Zinks vor. Weiterhin wurden als Legierungsphasen in begrenztem Maße ϵ -Messing (Probe A) bzw. ϵ - und β -Messing (Probe (B, C, D) detektiert, jedoch kein α -Mischkristall des Messings (Tab. 6.1.3.1). Eine Erklärung hierfür könnte sein: da die Pulsenergie begrenzt werden musste, um eine Zerstörung des Gefüges zu vermeiden, lösten sich die Zinkkörner schneller

und vollständiger, als die des Kupfers. Die geschmolzenen Zinkpartikel lösten die Partikel des Kupfers an. Für die Reaktion wurde demzufolge mehr Zink und weniger Kupfer bereitgestellt, als für die Bildung der jeweiligen Phase notwendig war. Die Dauer der Energiezuführung reicht nicht aus, um im Gefüge ein Diffusionsgleichgewicht herzustellen.

Nach dem Tempern lagen die Metallanteile der Gefüge vollständig als Messinglegierungen vor (Tab. 6.1.3.2). Bei den Proben A und B bildete sich ausnahmslos α -Messing, in der Probe C blieb zusätzlich das nicht im Kupfer lösliche Zink als ausgeschiedene β -Phase übrig. Bei diesen Proben war kein ϵ -Messing mehr nachweisbar. In Probe D (geringster Kupferanteil zugemischt) konnte nach der Wärmebehandlung keine β -Phase detektiert werden, stattdessen hatte sich die ϵ -Phase verstärkt sowie nur in dieser Probe deutlich die γ -Phase gebildet. Die beim Tempern entstandenen Messingmodifikationen entsprachen somit den Cu/Zn-Verhältnissen der Legierungen.

Tab. 6.1.3.2: Anteile der Gefügekomponenten von getemperten Proben aus Cu/Zn-Pulvermischungen

sample number	Cu/Zn ratio as laser sintered (metal phase)	Cu (%)	Z (%)	ZnO	α -brass		β -brass		γ -brass		ϵ -brass		ratio as annealed (metal phase)
				Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cu (%)	Zn (%)	
A	6,62	-	-	8,8	78,3	10,7	-	-	-	-	-	-	7,3
B	1,89	-	-	7,2	65,5	25,5	-	-	-	-	-	-	2,57
C	0,99	-	-	9,6	48,2	23,8	8	8	-	-	-	-	1,77
D	0,50	-	-	18,4	-	-	-	-	14,6	23,4	7,8	31,2	0,41

Mit steigendem Zinkgehalt in der Ausgangsmischung stieg auch der Zinkoxidgehalt in den getemperten Proben. Die nach dem Tempern vorliegenden Zinkoxidphasen entstanden vermutlich überwiegend aufgrund der Verunreinigung der Ofenatmosphäre.

Anhand der metallographischen Untersuchungen konnten die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie bestätigt werden. Beispielgebend sind in Abb. 6.1.3.39 Querschliffe der Probe A (Ausgangspulvermischung Cu:Zn = 75:25) dargestellt. Nach dem Lasermikrosintern konnten im Gefüge Kupfer (rötlich) und Messing (gelblich) eindeutig zugeordnet werden (Abb. 6.1.39 links). Die Unterscheidung zwischen Zink und Zinkoxid war nicht eindeutig (bläulich). Zu erkennen war jedoch, dass nur eine partielle Umwandlung zu Messing stattgefunden hat.

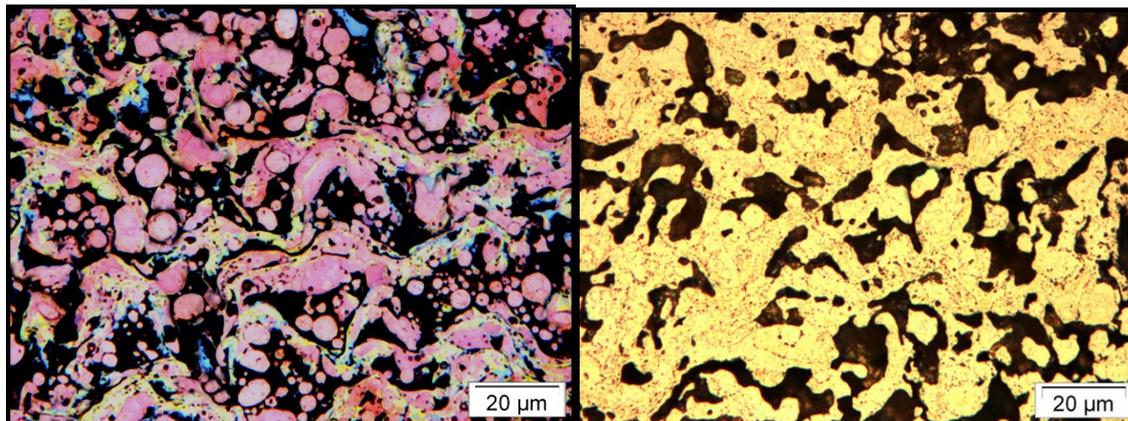


Abb. 6.1.3.39: lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschliffen; links - lasergesinterter Körper (Ausgangspulvermischung Cu:Zn = 75:25); rechts - Körper thermisch nachbehandelt ($T = 700^{\circ}\text{C}$, Dauer: 3 h)

Nach dem Tempern konnte im Gefüge lediglich Messing (gelblich) beobachtet werden. Zinkoxid ließ sich nicht eindeutig nachweisen, evtl. könnte es im Gefüge in den Einschlüssen vorgelegen haben. Eine weitere Vermutung war, dass das Zinkoxid während der Präparation zerstört wurde. Weiterhin konnte ein kleinerer Porenanteil im Vergleich zur ungetemperten Probe festgestellt werden. Zugleich wurde eine Schrumpfung der Proben durch das Tempern zwischen 0,1% und 2% gemessen. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass bei der Präparation, insbesondere beim Schleifen/Polieren, die Zinkanteile aus dem Gefüge gerissen wurden.

Der durch Lasermikrosintern erzeugte Festkörper entsteht durch die rasche Erstarrung einer Schmelze, während beim anschließenden Ofensinterprozess ausschließlich Festkörperreaktionen stattfinden. Nach dem Ofensintern lag das Material in der seiner Endzusammensetzung entsprechenden Kristallstruktur vor.

Untersuchungen zum Lasermikrosintern von Keramik

Carbide

Die Untersuchungen zum direkten Lasermikrosintern von Carbiden ohne Zusatz von Matrixmaterial wurden in einer vorhandenen Anlage durchgeführt. Zur Erzeugung der notwendigen extrem dünnen Schichten kam ein Pinsel zum Einsatz.

Die Versuche wurden mit einem MOPA-Faserlaser bei einer Pulswiederholrate von 250-350 kHz durchgeführt. Die eingebrachte Pulsenergie lag bei 8-10 μJ , die Leistung entsprechend bei 2-3,5 W. Der Gaußsche Radius auf der Probenoberfläche betrug etwa 25 μm . Es wurden Linien mit einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s abgefahren.

Abb. 6.1.3.40 links zeigt einen stufenförmigen Sinterkörper aus Tantalcarbide, rechts ist deutlich eine Schmelzstruktur zu erkennen. Teilweise lagen feine Risse im Gefüge vor. Der Grund waren vermutlich thermische Spannungen.

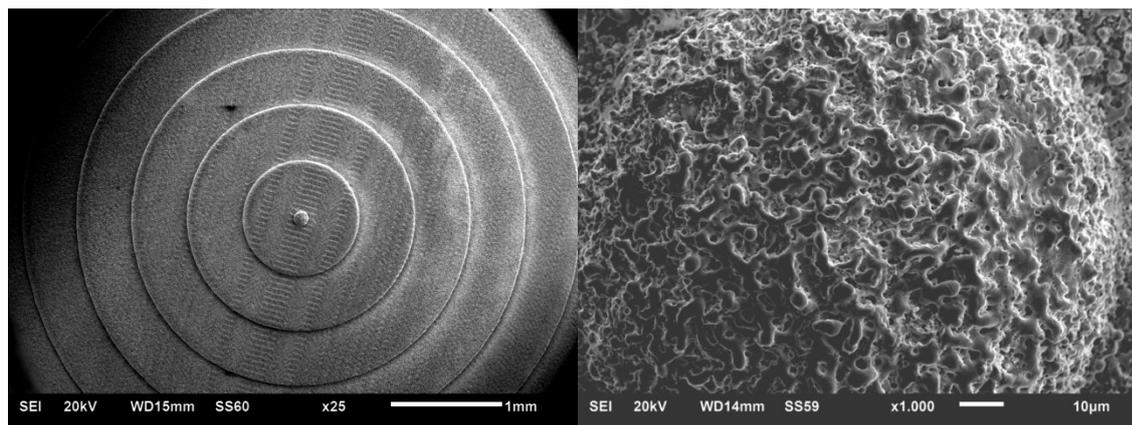


Abb. 6.1.3.40: REM-Aufnahmen eines Sinterkörpers aus Tantalcarbid, Bauhöhe 200 µm

Die Analyse mittels Röntgendiffraktometer zeigte einen Anteil von nahezu 100% Tantalcarbid. Eine geringe Menge an Aluminium stammte vom Probenhalter. Daraus konnte geschlossen werden, dass es sich um ein phasenreines Sinterprodukt und nicht um eine Verfestigung über die Zersetzung des Carbids und einer damit einhergehenden Verschmelzung des gebunden Tantals handelte.

Bei Wolframcarbid wurde ein geringerer Verschmelzungsgrad erreicht. Weiterhin war ein geringfügiger durch Zersetzung entstandener Anteil Wolfram in den Sinterkörpern enthalten.

Weiterhin konnten aus einer Mischung aus Silizium- und Kohlenstoff-Pulver (Masseverhältnis = 95:5) durch Lasermikrosintern Körper generiert werden, die Anteile von Siliziumcarbid besaßen. Demzufolge war es möglich, eine direkte Umwandlung der Ausgangsstoffe mittels Lasermikrosintern zu bewirken.

Siliziumdioxid

Das Verfahren Reaktions-Lasermikrosintern sollte die Verwendung von bei NIR-Strahlung gut absorbierenden unterstöchiometrischen oxidischen Materialien zur Generierung von Bauteilen aus Keramik ermöglichen. Dies konnte anhand von Untersuchungen mittels Siliziummonoxid gezeigt werden. Durch Reaktionssintern entstand Siliziumdioxid und es konnten auch komplex geformte Körper generiert werden. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Geschwindigkeit der Energieeinbringung mittels Laserstrahlung die Morphologie des Sintergefüges wesentlich beeinflusste. Bei geringer Intensität jedoch gleicher Fluenz bildete sich eine amorphe glasähnliche Phase aus. Bei Erhöhung der Pulsspitzenleistung entstand hingegen eher ein feinkristallines Gefüge.

In weiteren Untersuchungen wurde versucht, den Sintermechanismus weiter zu verifizieren und die Festigkeit der gesinterten Körper wesentlich zu erhöhen.

Es gelang, Festigkeiten der gesinterten Strukturen durch Optimieren der Füllstrategie und einer thermischen Nachbehandlung von bis zu 490 MPa zu erzeugen. Dabei wurde allerdings ein merklicher Schrumpfung von bis zu 20% festgestellt. Die Einflüsse der thermischen Nachbehandlung der reaktionsgesinterten Strukturen auf die Festigkeit und das Gefüge wurden nä-

her betrachtet. Es wurden Untersuchungen zur Aufklärung der Bindungsmechanismen des Reaktionssinterprozesses von SiO-Pulver unternommen. Für diese Untersuchungen wurden elektronenmikroskopische Aufnahmen (ESEM) und Strukturuntersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) erstellt. Die unbehandelte Struktur wies ca. 52% nichtkristalline Phasen, ca. 35% nanokristallines Gefüge und ca. 13% elementares Silizium auf. Die mit gleichen Parametern generierte thermisch nachbehandelte Struktur wies hingegen 75% gut kristallisiertes Cristobalit und nur 25% nicht kristalline Phasen auf. Die Untersuchung bestätigte, dass Auskristallisieren und Homogenisieren der Strukturen durch eine thermische Nachbehandlung erfolgt und dadurch ein wesentlich festeres Gefüge erzeugt werden kann. Da die kristalline Phase eine höher Dichte als die amorphe Phase aufweist, lässt sich auch der auftretende Schrumpf gut erklären.

Mit den ermittelten Parametern für hohe Festigkeiten wurden abschließend funktionale Bauteile und Demonstratoren hergestellt. Dazu wurde z. B. eine Zahnkappe (6.1.3.41) mit 5 mm Bauhöhe und einer stufenlosen glatten Oberfläche in 9 Stunden Bauzeit generiert. In dem generierten Mikroturm mit einem Durchmesser von 3 mm bildet sich innen eine voll ausgebildete Wendeltreppe (Abb. 6.1.3.42).

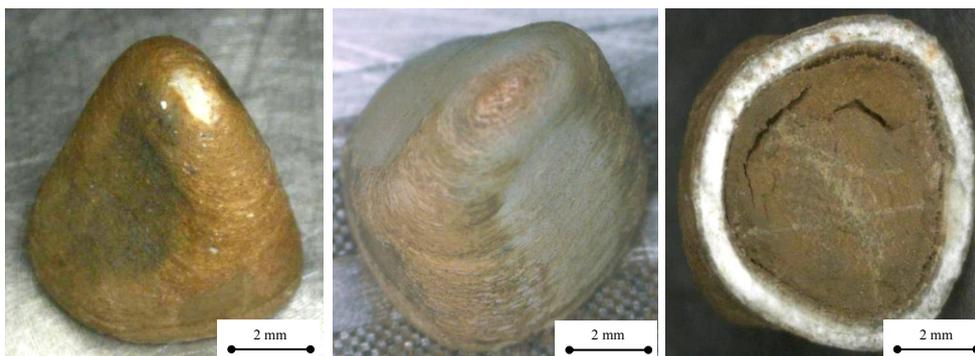


Abb. 6.1.3.41: Zahnkappe aus SiO₂ a) unbehandelt, b) und c) bei 1400°C 6 h getempert

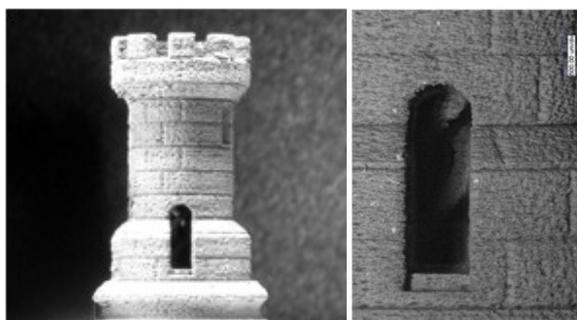


Abb. 6.1.3.42: hochaufgelöster Demonstrator aus SiO₂, Durchmesser 3 mm, rechts Detail

AP 1.2 Ultrakurzpuls-lasermikrosintern

Voruntersuchungen zur Bestrahlung einer Pulveroberfläche mit ultrakurzen Pulsen

Es wurden umfangreiche Untersuchungen zur Wirkung von ultrakurzen Pulsen hoher Frequenz auf eine Pulveroberfläche durchgeführt. Je nach applizierter Intensität bzw. Streckenenergie konnten die Ergebnisse wie folgt grob eingeteilt werden:

	Hohe Streckenenergie	Niedrige Streckenenergie
Niedrige Intensität	verschiedene massive Schmelzstrukturen	typische Erscheinungen für fs - Laserbearbeitung (Nanoripple, Nanodräh-te)
Hohe Intensität	tiefe Trennspalte mit Schmelze	neuartige kompaktierte Strukturen, Nanospikes, Nanoschmelze

Dazwischen existierten noch zahlreiche Übergangsformen, z.B. Schmelzperlen mit Nanoripple.

Hohe Streckenenergie – Massive Schmelzstrukturen und Trennspalte

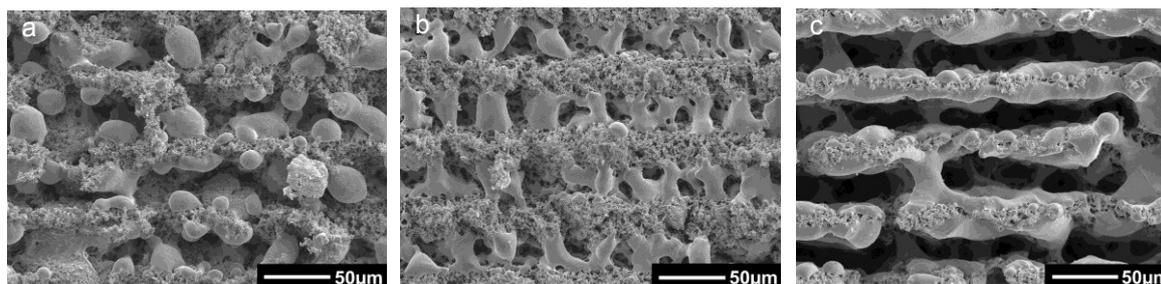


Abb. 6.1.3.43: REM-Aufnahmen von Bearbeitungsspuren im Pulverbett , 1 Bestrahlung; a: $E_S = 8,4 \text{ J/m}$, Scangeschwindigkeit 500 mm/s; b: $E_S = 12 \text{ J/m}$, Scangeschwindigkeit 500 mm/s; c: $E_S = 68 \text{ J/m}$, Scangeschwindigkeit 100 mm/s

Die Ausbildung der Schmelzformationen war abhängig von der eingebrachten Streckenenergie E_S . Ab Streckenenergien von ca. 3 J/m entstanden größere Schmelzperlen (Abb. 6.1.3.43 a). Bei weiterer Erhöhung der Streckenenergie gingen die Formationen in strukturierte Schmelzspuren mit einer Breite von ca. 25 μm über. Die Schmelzperlen verbanden sich mit dem Spurrand und bildeten ein regelmäßiges Muster von Querverbindungen (Abb. 6.1.3.43 b). Mit der höchsten verfügbaren Streckenenergie, die gleichzeitig mit der höchsten Intensität verbunden war, wurden in das Pulverbett tiefe Trennspalte eingeschnitten. Diese waren aufgrund der hohen Energieeinbringung seitlich verschmolzen. Die Tiefe der Gräben betrug über 100 μm bei einer Breite von ca. 30 μm (Abb. 6.1.3.43 c).

Vergleich hochrepetierende fs-Strahlung mit cw-Strahlung

Es wurde untersucht, ob die Ausbildung der beobachteten Schmelzstrukturen typisch für die Applikation der hochrepetierenden fs-Laserstrahlung ist oder allgemein mit der Energiezuführung zu tun hatte.

Bei beiden Laser-Regimen mit fs- und mit cw-Strahlung konnte während der Bearbeitung in Abhängigkeit von der Streckenenergie ähnlich intensive Plasmabildung beobachtet werden.

Bei relativ hoher Streckenenergie war der Vernetzungsgrad entlang einer bestrahlten Linie mit fs-Laserstrahlung etwas größer (Abb. 6.1.3.44 links und Mitte). Mit cw-Laserstrahlung bildeten sich vorrangig schmale Stege senkrecht zur Scanrichtung und vereinzelt Schmelzperlen. Grund dafür war die kontinuierlich einwirkende Laserstrahlung und die Oberflächenspannung der entstehenden Schmelze. Mit fs-Laserstrahlung konnten die lokal aufgeschmolzenen Bereiche besser miteinander verbunden werden. Die Breite der erzeugten Linien war etwas geringer.

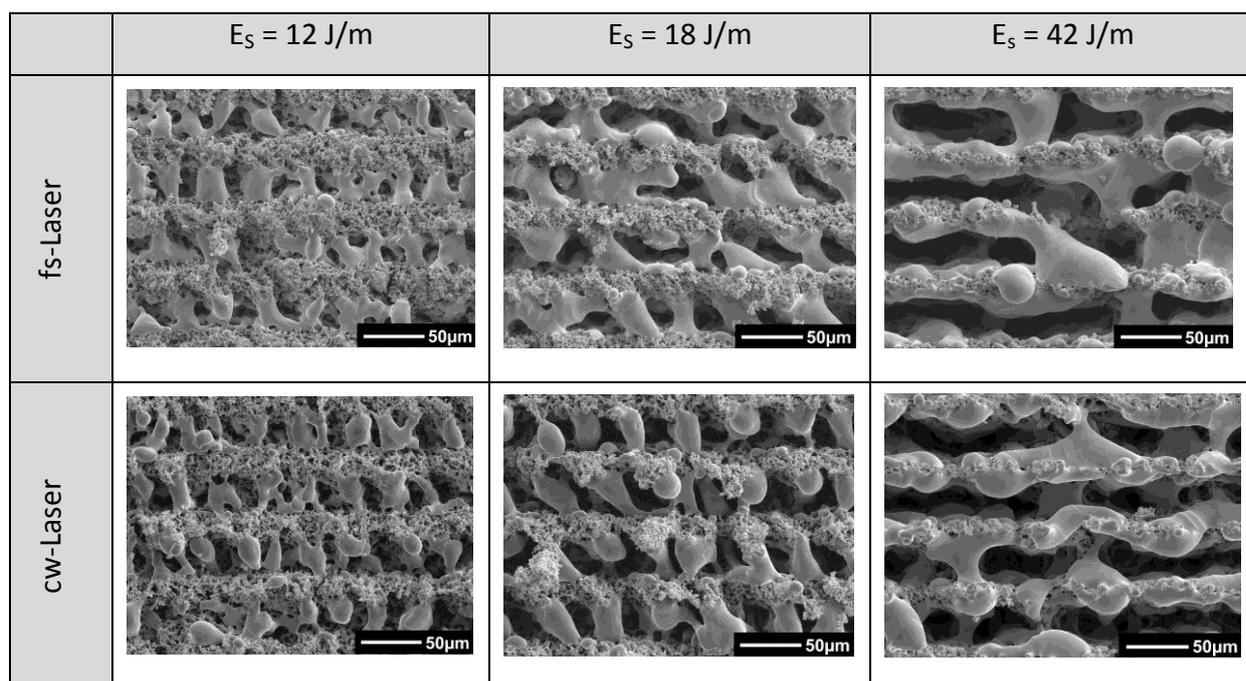


Abb. 6.1.3.44: REM-Aufnahmen von Sinterstrukturen bei gleichen Streckenenergien, Scangeschwindigkeit 100 mm/s, Pulsabstand fs-Laser 0,1 µm

Trotz wesentlich geringerer Intensität entstanden bei hoher Streckenenergie auch bei Applikation von cw-Strahlung tiefe Trennspalte, so dass dies nicht mit der hohen Spitzenintensität der fs-Laserstrahlung zusammen hängt, sondern eher mit einer genügend hohen mittleren Intensität (Abb. 6.1.3.44 rechts).

Bei kleineren Streckenenergien waren die Unterschiede zwischen beiden Regimen noch geringer, die Schmelze konzentrierte sich am Rand der Spur mit vereinzelt Schmelzbrücken. Bei beiden Strahlungsregimen traten mit abnehmender Streckenenergie und kürzerer mittlerer Einwirkzeit durch höhere Scangeschwindigkeit vermehrt Schmelzperlen auf, so dass kaum noch eine Vernetzung stattfand (Abb. 6.1.3.45). Auch bei annähernd gleicher Streckenenergie wie bei der ersten Versuchsreihe war der Effekt zu erkennen (Abb. 6.1.3.44 links und Abb. 6.1.3.45 rechts). Die kürzere mittlere Einwirkzeit wirkte trotz gleicher Energieeinbringung der Ausbildung von regelmäßigen Strukturen entgegen. Mit fs-Laserstrahlung entstanden etwas größere Strukturen mit einem höheren Grad an Vernetzung. Mit cw-

Laserstrahlung bildeten sich vorrangig kleinere Schmelzperlen. Auch hier wurden mit fs-Laserstrahlung die einzelnen Schmelzbereiche besser miteinander verbunden, bei höherer Geschwindigkeit riss dieser Vorgang aber ab. Bei weiterer Erhöhung der Scangeschwindigkeit setzte sich dieser Trend fort.

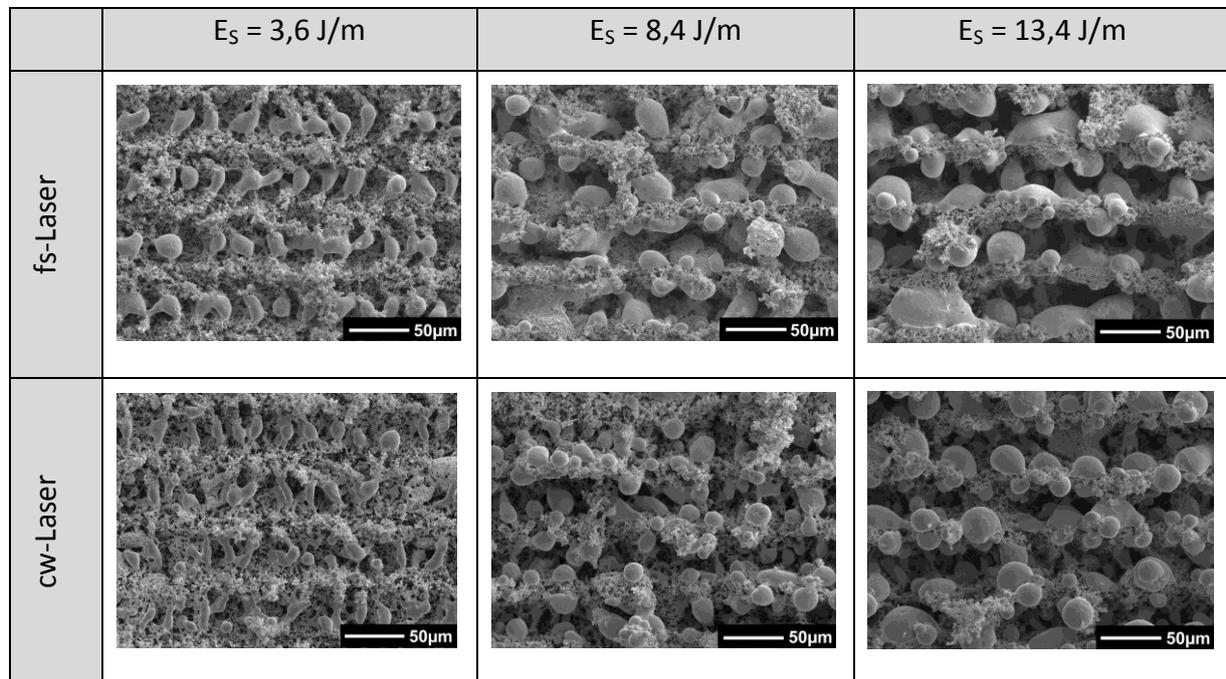


Abb. 6.1.3.45: REM-Aufnahmen von Sinterstrukturen bei gleichen Streckenenergien, Scangeschwindigkeit 500 mm/s, Pulsabstand fs-Laser 0,5 µm

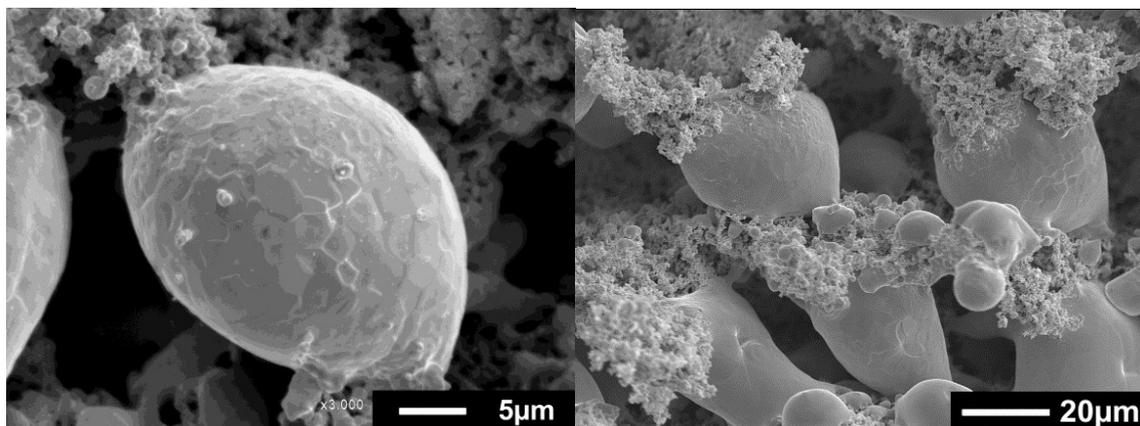


Abb. 6.1.3.46: REM-Aufnahmen von Sinterstrukturen mit Kristallbildung; links: fs - Laser, $P = 2,8 \text{ W}$; $v = 300 \text{ mm/s}$; rechts: cw - Laser, $P = 4,8 \text{ W}$; $v = 300 \text{ mm/s}$

Sowohl bei Bestrahlung mit fs-Laserstrahlung als auch mit cw-Laserstrahlung neigten die Schmelzperlen zur Kristallbildung (Abb. 6.1.3.46). Sie traten bei fast allen verwendeten Prozessparametern auf und ähnelten sich in Form und Größe. Von den isolierten Schmelzperlen konnte die Wärme nur langsam über Strahlung abgeführt werden, so dass genug Zeit zur Kristallbildung zur Verfügung stand.

Auch bei Mehrfachbestrahlung unterschieden sich die mit cw-Laserstrahlung entstandenen Schmelzstrukturen nur geringfügig in Abhängigkeit von der Anzahl der Bestrahlungen von den mit fs-Laserstrahlung erzeugten. Der Grad der Verschmelzung nahm etwas zu. In Abhängigkeit von Laserleistung und Scangeschwindigkeit trat bei 5, 10 bzw. 20 Bestrahlungen Schollenbildung auf, so dass sich z.T. das gesamte Testfeld beginnend vom rechten und linken Rand abhob (Abb. 6.1.3.47). Dieser Fernwirkungseffekt der Laserstrahlung trat in gleicher Form auch mit fs-Laserstrahlung auf. Eine Erklärung war bisher nicht möglich.

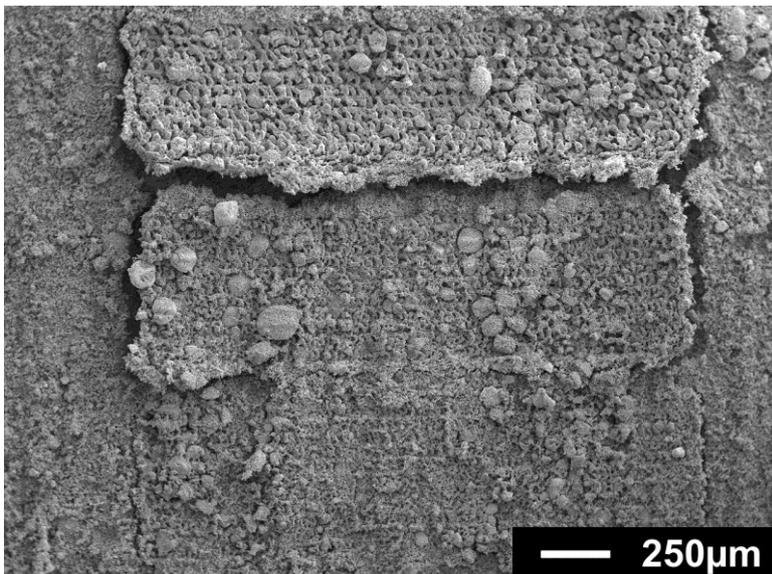


Abb. 6.1.3.47: REM-Aufnahme Sinterstruktur, cw-Laser, $P = 1,2 \text{ W}$; $v = 100 / 300 / 500 \text{ mm/s}$, 10 Bestrahlungen

Grundsätzlich entstanden bei vergleichbaren Streckenenergien und Scangeschwindigkeiten ähnliche Strukturen. Der Grad der Aufschmelzung war mit fs-Laserstrahlung etwas größer, ebenso die Vernetzung entlang der bestrahlten Linie. Mit cw-Laserstrahlung bestand eher die Neigung zur Bildung von Schmelzperlen. Geringe Unterschiede gab es bei den Strukturbreiten. Mit fs-Laserstrahlung bildeten sich im Durchschnitt um 13% schmalere Linien aus. Wie bei Verwendung von fs-Laserstrahlung entstanden auch bei cw-Laserstrahlung Kristalle. Mehrfachbestrahlungen führten bei beiden Regimen ab einer bestimmten Anzahl zu Schollenbildung.

Alle die Bildung der Schmelzstrukturen beeinflussenden Effekte wurden von der Einbringung der mittleren Energie in den Prozess getrieben. Spezifische Effekte der fs-Laserbestrahlung konnten hier nicht gefunden werden. Bei der Bearbeitung mit hochrepetierender fs-Laserstrahlung ist darauf zu achten, dass der Pulsüberlapp nicht zu groß wird. Der Effekt der Schmelzbildung bei zu großem Pulsüberlapp war bei der Pulveroberfläche wesentlich ausgeprägter als bei Festkörperoberflächen. Dies hängt mit der relativ großen Eindringtiefe der Strahlung in das Pulverbett sowie der schlechteren Wärmeleitung zusammen. Genauere Untersuchungen und Vergleiche stehen noch aus.

Niedrige Streckenenergie – Niedrige Intensität

Bei Anwendung einer geringen Intensität und Streckenenergie kam es unter Mehrfachbestrahlung zur Nano-Rippelbildung auf den Pulverkörnern (Abb. 6.1.3.48). Aufgrund der geringen eingebrachten Streckenenergie und da die Pulverkörner größtenteils ihre Kristallstruktur erhalten haben, kann davon ausgegangen werden, dass eine direkte Nanostrukturierung der Wolfram-Partikel ohne separate thermische Schmelzbildung stattgefunden hat.

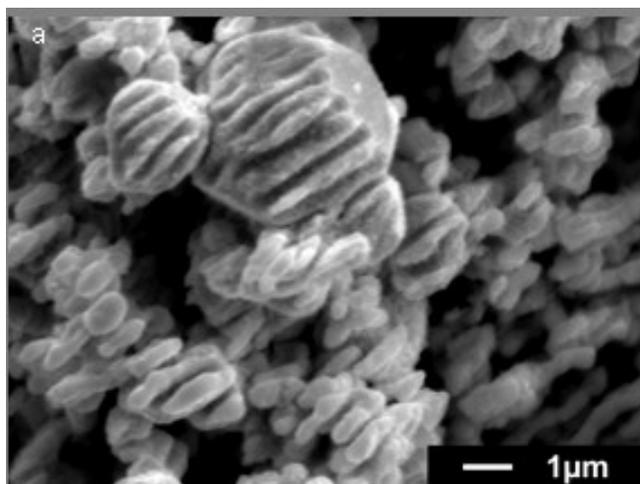


Abb. 6.1.3.48: REM-Aufnahme Nanoripple

Bei Durchführung der Versuche unter einem Helium-Druck von $p = 500$ mbar wurde die Bildung von „fibrous nanoparticle aggregates“ beobachtet (Abb. 6.1.3.49). Der Durchmesser der entstandenen Nanodrähte sollte wesentlich kleiner als 100 nm sein. Genauere Untersuchungen waren nicht Ziel des Projektes.

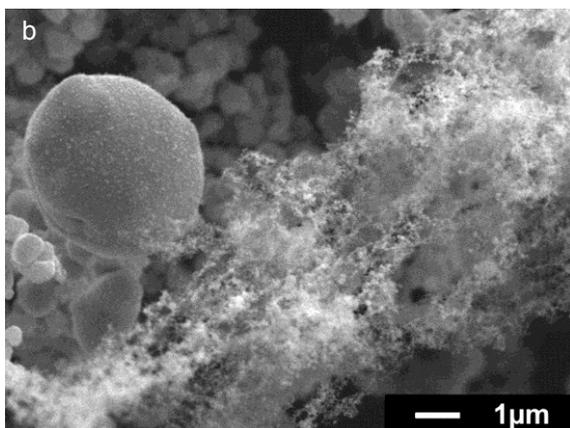


Abb. 6.1.3.49: REM-Aufnahme „fibrous nanoparticle aggregates“

Niedrige Streckenenergie – Hohe Intensität

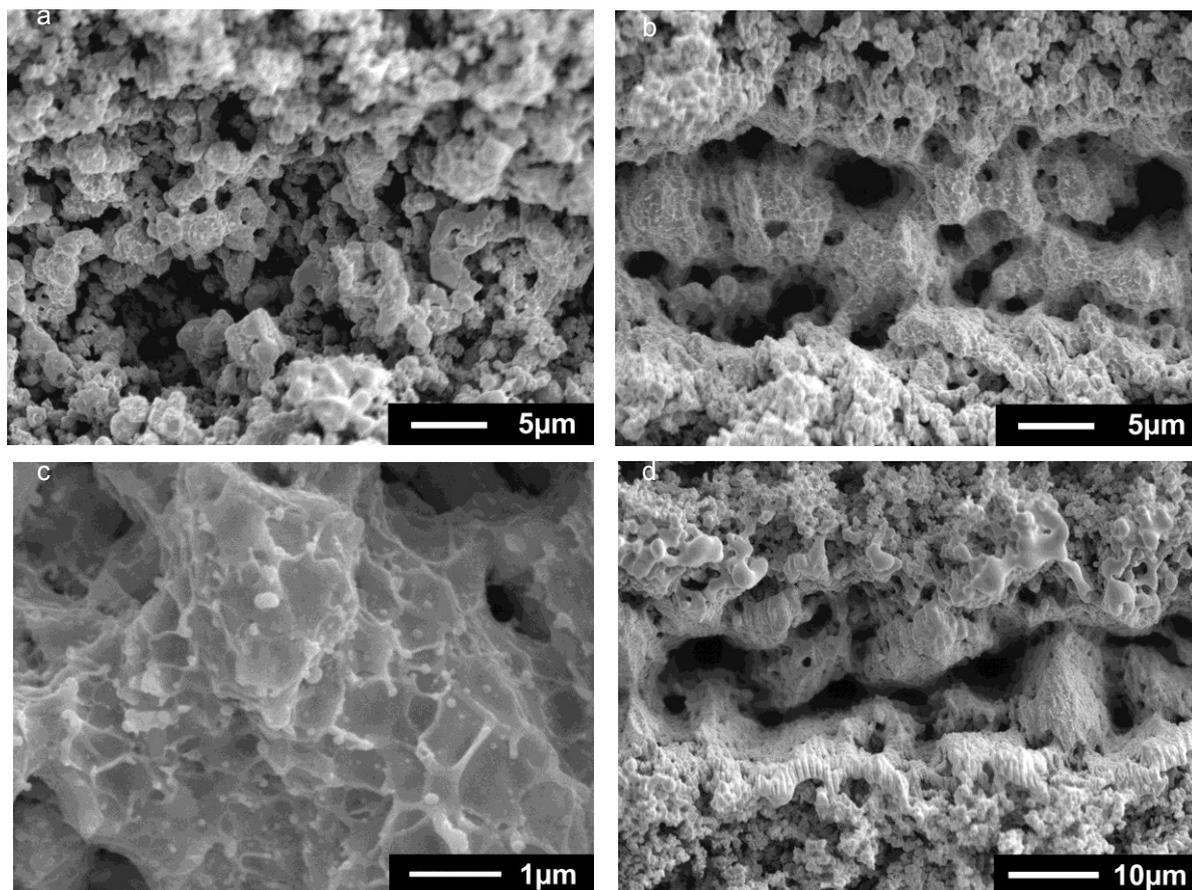


Abb. 6.1.3.50: REM-Aufnahmen von kompaktierten Strukturen, a: $I_{max} = 6.74 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$, $E_s = 0.7 \text{ J/m}$, $v = 1,25 \text{ m/s}$, $a = 10 \mu\text{m}$, 1 Bestrahlung; b, c: gleiche Parameter, 10 Bestrahlungen; d: $I_{max} = 6.74 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$, $E_s = 2.8 \text{ J/m}$, $v = 0,3125 \text{ m/s}$, $a = 2,5 \mu\text{m}$, 10 Bestrahlungen

Unter Beibehaltung der niedrigen Streckenenergie aber bei wesentlicher Erhöhung der Intensität kam es zur Ausbildung neuartiger kompaktierter Strukturen.

Bei Einfachbestrahlung waren in der Spurmitte einzelne Körner verschmolzen, andere schienen zusammengeschmolzen zu sein und dadurch aneinander zu haften (Abb. 6.1.3.50a). Nach 10 Bestrahlungsvorgängen entstanden kompaktierte, relativ dichte Strukturen, die Ähnlichkeiten mit klassisch gesinterten Formationen aufwiesen (Abb. 6.1.3.50b). Die Spurbreite betrug ca. $15 \mu\text{m}$. Höher aufgelöste REM-Aufnahmen zeigten eine Schmelze im Nanometermaßstab mit aus der Oberfläche austretenden Nanospikes (Abb. 6.1.3.50c). Die einzelnen Mikroschmelzgebilde wirkten wie aufeinander geschichtet. Ihre Größe lag bei $< 1 \mu\text{m}$ und damit im Bereich der Größe der einzelnen Körner. Somit könnte es sich auch um einzelne aufgeschmolzene oder zumindest zusammengedrückte Körner handeln. Bei Erhöhung der Streckenenergie wurden in der Spurmitte die Bildung von stark zerklüfteten Strukturen sowie am Rand Schmelz- und Rippelbildung beobachtet (Abb. 6.1.3.50d). Das zeigte, dass einerseits die Intensität hoch genug war, um eine Verdichtung des Pulvers zu bewirken, dass andererseits aber die eingebrachte Energie vor allem im Bereich niedrigerer Intensität am Rand schon so hoch war, dass störende Sekundäreffekte auftraten. Ab einem Pulsabstand

von größer 20 μm und damit einer Streckenenergie von kleiner 0,35 J/m nahm die Kompaktheit der Strukturen merklich ab.

Für die Ausbildung der kompaktierten Strukturen hat sich somit bei der Spitzenintensität eine Untergrenze von ca. $5 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$ und bei der Streckenenergie eine Untergrenze von ca. 0,35 J/m sowie eine Obergrenze von ca. 3 J/m ergeben. Weiterhin waren mehrere Bestrahlungen zur Ausbildung der kompaktierten Strukturen erforderlich.

Die Herausbildung dieser Strukturen sollte auf die gleichen Mechanismen wie beim Lasermikrosintern mit ns-Pulsen zurückzuführen sein. Die Verdampfung von Material an der Pulveroberfläche führte zu einem Rückstoß, welcher die Partikel in Richtung Pulverbett beschleunigte. Die Expansion des Materialdampfplasmas übte ebenfalls einen Druck auf die sich bildende Oberfläche der Sinterstruktur aus. Die Kräfte müssen dabei so groß sein, dass sie zumindest zur Deformation der Partikel und zur Bildung von Nanoschmelze führen.

Lasermikrosintern mit ultrakurzen Pulsen

Niedrige Streckenenergie – Niedrige Intensität

Beim Lasermikrosintern werden sukzessive dünne Pulverschichten (in der Regel Dicke 1 μm) durch Rakeln aufgebracht und mit Laserstrahlung bearbeitet. Es wurde zunächst untersucht, ob es möglich ist, einen Lasermikrosinterprozess bei relativ niedriger Intensität und Streckenenergie zu realisieren.

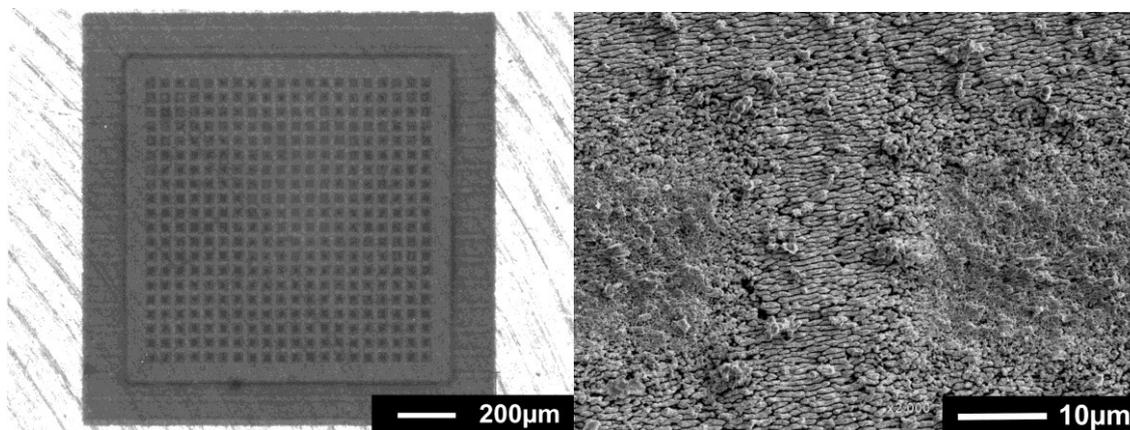


Abb. 6.1.3.51: Mikro-Gitterstruktur, links Lichtmikroskopaufnahme, rechts REM-Aufnahme Detail, $I_{\text{max}} = 1.77 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$, $E_S = 3 \text{ J/m}$, $v = 0,6 \text{ m/s}$, $f = 1 \text{ MHz}$, 6 Bestrahlungen und Rakelprozesse

Die Vorwärmung des Pulvers sollte noch unterhalb der Schmelztemperatur liegen, ebenso sollten die Pulverpartikel im Prozess möglichst wenig aufgeschmolzen werden. Die Idee war, den Sinterprozess nur über die Erhöhung der Temperatur und den durch den fs-Laserpuls ausgeübten Strahlungsdruck zu realisieren. Mit einem solchen Regime gelang es zwar, hochaufgelöste Strukturen zu erzeugen (Strukturbreite 17 μm), aber der Schichtaufbau erfolgte nur bis in eine Höhe von maximal 1 μm (Abb. 6.1.3.51 links). Die erzeugten Mikro-Linien waren durchzogen von Nanoripplern (Abb. 6.1.3.51 rechts).

Die zu erwartenden Effekte auf die Partikel aufgrund des Strahlungsdrucks von fokussierter Femtosekundenlaserstrahlung traten nicht ein. Der hohe Strahlungsdruck von $p = 1.175 \cdot 10^5$ Pa führte zwar zu hohen auf die Partikel wirkenden Kräften von $43 \mu\text{N}$ (Durchmesser $1 \mu\text{m}$) bzw. $4 \mu\text{N}$ (Durchmesser $0,3 \mu\text{m}$). Diese waren um fast 9 Größenordnungen höher als die wirkenden Gravitationskräfte. Aufgrund der ultrakurzen Einwirkzeit führten die hohen Kräfte allerdings nicht zu einer relevanten Bewegung der Partikel (nur ca. 10^{-16} m) und infolge auch nicht zu wirksamen kinetischen Energien (lediglich ca. 10^{-14} μJ). Insofern war es erstaunlich, dass überhaupt ein sichtbarer Aufbau von Strukturen stattfand.

Es ist vorstellbar, dass der Sinterprozess im Nanometermaßstab durch elektromagnetische Felder, z.B. mittels Plasmonen, angetrieben wurde. Bei Bestrahlung von Festkörperoberflächen mit fs-Laserstrahlung werden Plasmonen aus dem freien Elektronengas gebildet. Bei metallischen Nanopartikeln, deren Abmessungen viel kleiner als die Lichtwellenlänge sind, führen die Plasmonen außerdem zu ungewöhnlichen optischen Eigenschaften. Es kommt in Abhängigkeit von den Resonanzfrequenzen zu einer schmalbandigen Lichtabsorption sowie einer Lichtstreuung ins Fernfeld. Zusätzlich tritt ein verstärktes Nahfeld (Faktor $10 - 10^6$) um das Teilchen auf, die räumliche Ausdehnung beträgt typischerweise einige 10 nm. Das verstärkte Nahfeld kann bereits bei niedrigen Laserstrahl-Intensitäten zu Nanoablation führen. Ob damit auch Sinterprozesse angetrieben werden können, ist bisher noch nicht erforscht und könnte Gegenstand zukünftiger Grundlagenuntersuchungen sein.

Niedrige Streckenenergie – Hohe Intensität

Alternativ sollte versucht werden, die im Pulverbett erzeugten kompaktierten sinterähnlichen Strukturen als Grundlage für einen Mikrosinterprozess zu nehmen. Damit könnten u.a. Mikrosiebe generiert werden, da diese aus thermisch hochbeanspruchbaren und physiologisch unbedenklichen Materialien wie Wolfram oder Tantal bisher nicht preiswert herstellbar sind.

Durch zyklisches Rakeln und Sintern auf einem angerauten Substrat wurde versucht, die flächigen Strukturen zu festigen und eine gewisse Bauhöhe zu realisieren. Nach dem Sintervorgang mit 10 Bestrahlungen erfolgte ein Zyklus mit 2-6maligem Rakeln (je nach entstandener Pulverschichtdicke), dann wieder ein Sintervorgang usw.. Das Sinterergebnis war stark von der Dicke der Pulverschicht abhängig. Eine dünne Pulverschicht führte zu dichteren Strukturen, eine dicke Schicht zu losereren Strukturen mit unregelmäßiger Höhe.

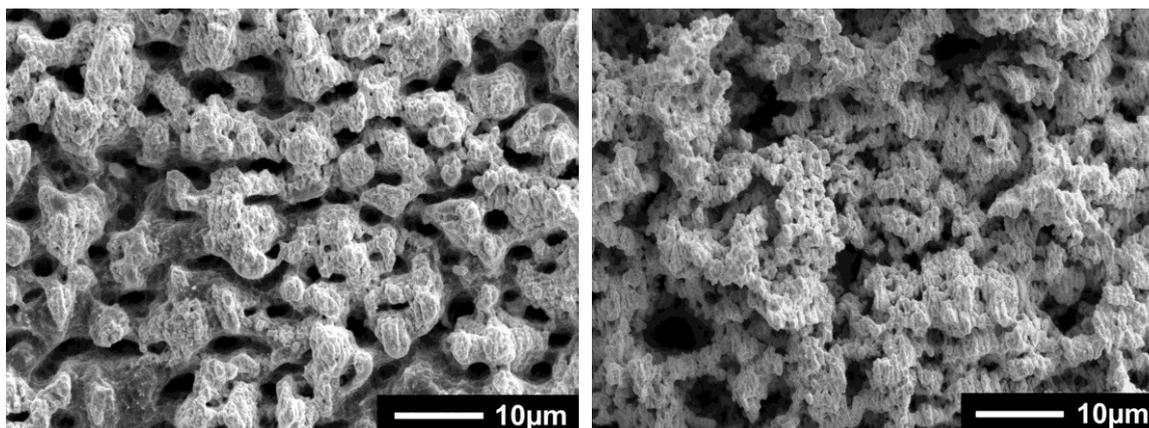


Abb. 6.1.3.52: REM-Aufnahmen von Sinterflächen in Abhängigkeit von der Anzahl der Sinter-/Rakelzyklen, $E = 7 \mu\text{J}$, Linienabstand $l = 10 \mu\text{m}$, 10 Bestrahlungen je Sintern; links: 6x Sintern/Rakeln; rechts: 20x Sintern/Rakeln

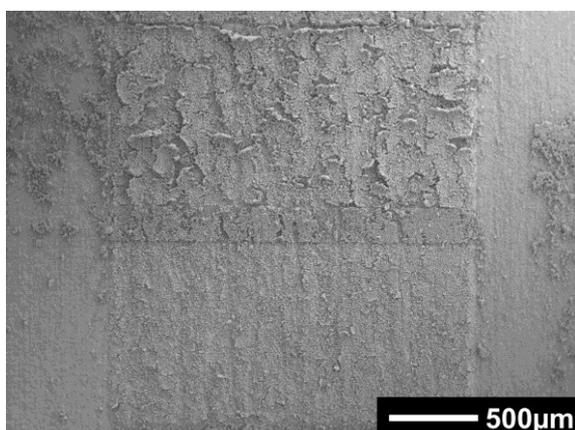


Abb. 6.1.3.53: REM-Aufnahme von Sinterflächen bei verschiedenen Pulsabständen, Linienabstand $l = 10 \mu\text{m}$; $a = 10 \mu\text{m}$ (obere Fläche), $a = 20 \mu\text{m}$ (untere Fläche)

Auch bei ursprünglich dünnem Pulveraufzug bildeten sich mit zunehmender Anzahl von Rakel-/Sinterzyklen immer unregelmäßigere und dickere Pulverschichten. Das führte zur Abnahme der Sinterdichte und Zunahme von Rippelbildung und schließlich zum Abreißen des Aufbaus (Abb. 6.1.3.52)

Ein Grund dafür war vermutlich die immer geringere vertikale Vernetzung. Weiterhin entstanden bei Pulsabständen kleiner $10 \mu\text{m}$ Risse in den gesinterten Flächen (Abb. 6.1.3.53). Dies war ein Hinweis auf Spannungen im Sintergefüge. Aufgrund der geringen Vernetzung vertikal und mit zunehmender Zyklanzahl auch horizontal bauten sich die Spannungen in dieser Form ab.

Es gelang nicht, aus dem Pulver herausnehmbare Strukturen zu erzeugen. Auch die siebähnlichen Strukturen aus Abb. 6.1.3.52 links zerbröckelten beim Versuch, sie zu separieren. Entweder war der Sinterverbund noch nicht voll ausgebildet oder das Material durch die kurzen Pulse extrem versprödet. Weitergehende Strukturuntersuchungen, die den Rahmen des Projektes gesprengt hätten, werden hierzu Erkenntnisse erbringen.

Hohe Streckenenergie

Ein weiterer Ansatz zur Generierung einer 3D Struktur war die Verwendung von Parametern, bei denen eine relativ hohe Streckenenergie vorlag und bei denen vorrangig Schmelzstrukturen entstanden. Dafür wurde ein hoher Pulsüberlapp realisiert. Trotz weiter Variation der Parameter ($v = 1 \dots 5000 \text{ mm/s}$, $P = 0,4 \dots 6,7 \text{ W}$) traten ähnliche Effekte wie bei der niedrigen Streckenenergie auf. Nach mehreren Sinter-/Rakelzyklen bildeten sich immer unregelmäßigere und dickere Pulverschichten. Neben unregelmäßigen nicht miteinander verbundenen Schmelzstrukturen, teilweise in Form von Schmelzperlen, bestand der Großteil der Fläche aus nicht oder nur sehr lose zusammen haftenden Körnern mit einer aufgeprägten Rippelstruktur (Abb. 6.1.3.54). Trotzdem traten Spannungen auf, die bei höheren Pulsenergien in Form von Rissen sichtbar wurden.

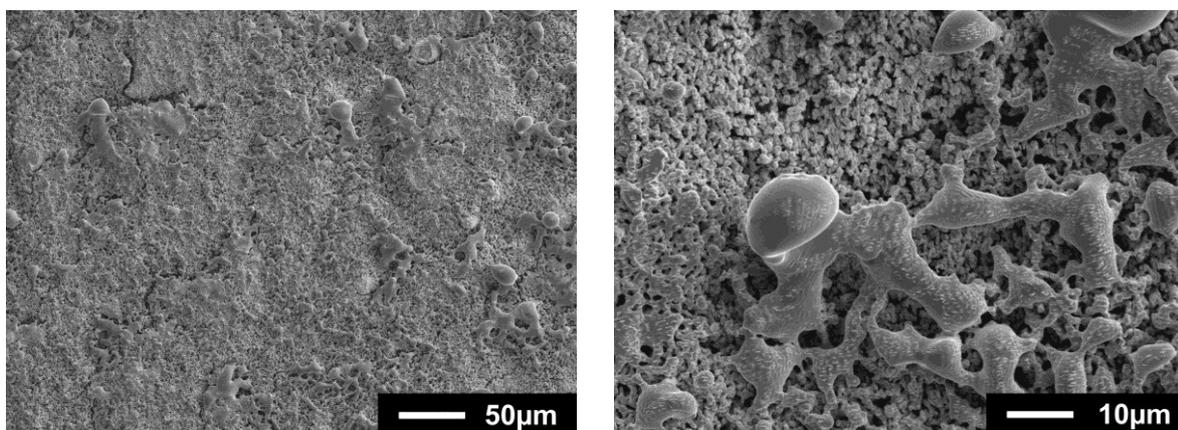


Abb. 6.1.3.54: REM-Aufnahmen einer Sinterfläche nach 10 Sinter-/Rakelzyklen, $E = 6,7 \mu\text{J}$, Linienabstand $l = 10 \mu\text{m}$, 1 Bestrahlung je Sintern, Pulsabstand $a = 0,1 \mu\text{m}$, Wolframsubstrat

Um eine bessere Anbindung der Sinterschichten an das Substrat und damit bessere Ausgangsbedingungen für einen Aufbau von Strukturen zu erreichen, wurden Versuche mit Wolfram als Substratmaterial durchgeführt. Da die Schmelztemperatur von Wolfram (ca. 3420°C) über den Verdampfungstemperaturen der ursprünglichen Substrate aus Aluminium (2467°C) und auch Edelstahl lag, waren bessere Voraussetzungen zum Aufbau von Startschichten gegeben.

Dennoch konnte auch hier trotz weiter Parametervariation (Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Defokussierung) kein Aufbau von Körpern realisiert werden. Abb. 6.1.3.55 links zeigt eine Fläche, die mit einem Pulsabstand von $a = 0,05 \mu\text{m}$ bearbeitet wurde. Zur Verringerung der Intensität und damit zur Erzeugung von weniger verdampftem Material wurde die Defokussierung auf $0,3 \text{ mm}$ erhöht. Der größte Teil der bearbeitenden Fläche bestand aus Rippelstrukturen, die entweder nur in das Grundsubstrat eingebracht wurden oder die in Verbindung mit den Körnern des Wolframpulvers entstanden. Sehr vereinzelt wurden Körner geschmolzen oder lose gesintert. In Abb. 6.1.3.55 rechts sind Strukturen bei Verwendung eines Pulsabstandes von $a = 0,1 \mu\text{m}$ zu sehen. Das Pulver schien teilweise zusammengepresst und auch in die Substratoberfläche gedrückt worden zu sein.

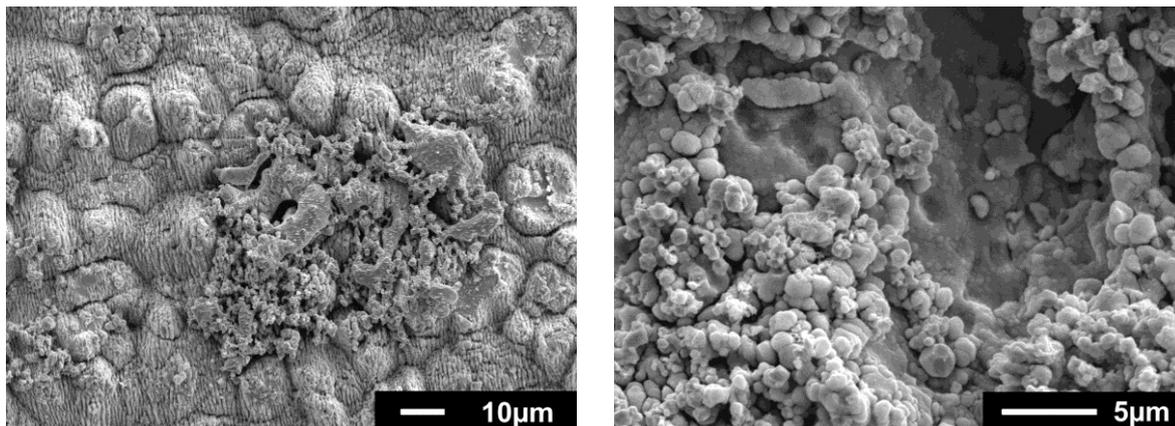


Abb. 6.1.3.55: REM-Aufnahmen von Sinterflächen nach mehreren Sinter-/Rakelzyklen, $E = 6,7 \mu\text{J}$, Linienabstand $l = 10 \mu\text{m}$, 1 Bestrahlung je Sintern, Defokussierung $0,3 \text{ mm}$; links: Pulsabstand $a = 0,05 \mu\text{m}$; rechts: $a = 0,1 \mu\text{m}$, Wolframsubstrat

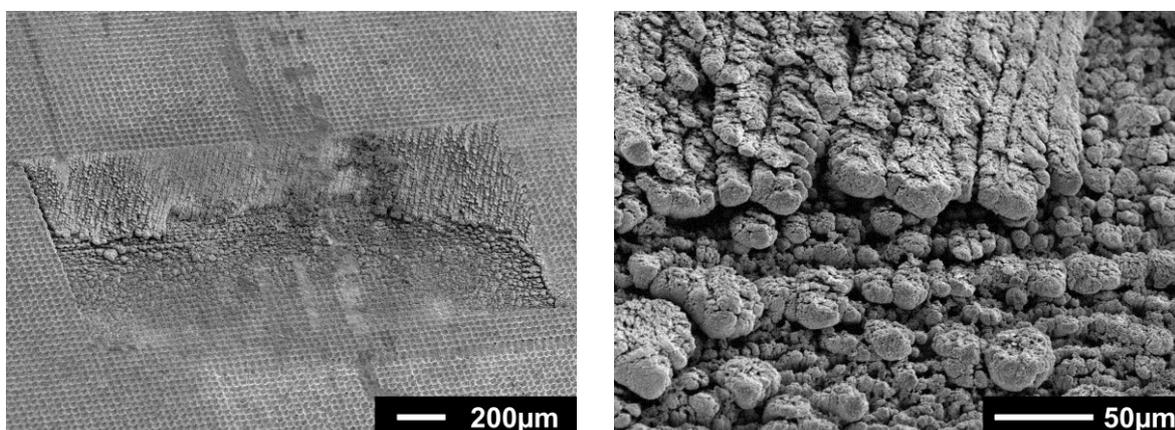


Abb. 6.1.3.56: REM-Aufnahmen einer Sinterfläche nach mehreren Sinter-/Rakelzyklen, $E = 4,8 \mu\text{J}$, Linienabstand $l = 10 \mu\text{m}$, 1 Bestrahlung je Sintern, Defokussierung $0,4 \text{ mm}$, Pulsabstand $a = 0,001 \mu\text{m}$

Bei extremer Verringerung des Pulsabstandes auf z.B. $a = 0,001 \mu\text{m}$ entstanden die in Abb. 6.1.3.56 dargestellten Formationen. Die bestrahlte Fläche hatte sehr unterschiedliche Eigenschaften. Im unteren Teil waren kaum Veränderungen zu erkennen. Die Strukturen ähnelten den bisher Erzeugten (Nanorippel auf dem Substrat). Im oberen Bereich schien das Substrat abgetragen und dann mit verfestigtem Pulver wieder gefüllt worden zu sein. Für die schräge Musterung, die nicht mit der senkrechten Bewegung des Rakels übereinstimmte, konnte noch keine Erklärung gefunden werden. Auch mit diesen Parametern war es nicht möglich, einen Aufbau zu erreichen.

Ausgangspunkt weiterer Untersuchungen waren Parameter, bei denen in vorangegangenen Versuchen Linien mit tiefen Gräben und steilen Wänden entstanden waren. Ziel war es, die Trennspalte durch das Rakeln wieder mit Pulver zu füllen und im nächsten Sinterschritt zu verfestigen.

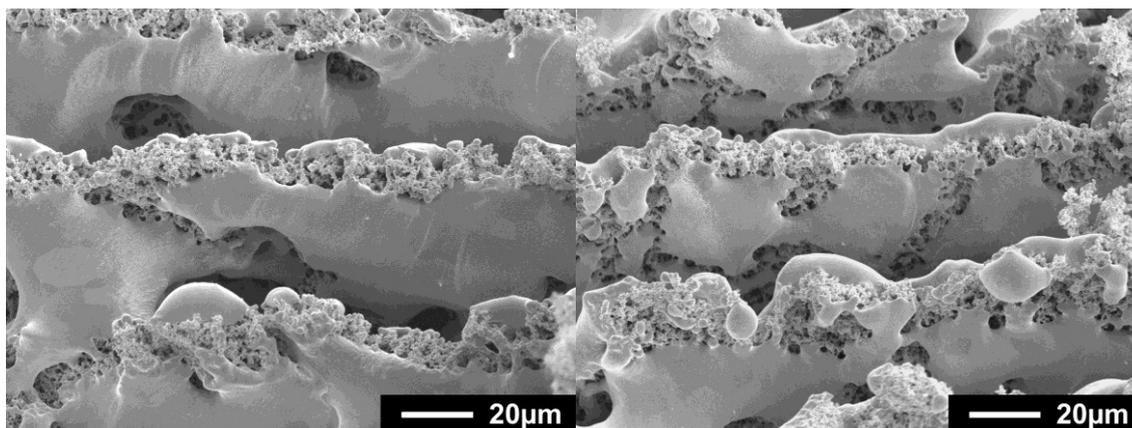


Abb. 6.1.3.57: REM-Aufnahmen von „Wänden“ einer Linienstruktur (Winkel 30°), $E = 5,2 \mu\text{J}$, $v = 100 \text{ mm/s}$, Linienabstand $l = 50 \mu\text{m}$; links: Wand, entstanden im unbearbeiteten Pulver; rechts: Wand, entstanden in unmittelbarer Nähe des vorher erzeugten Grabens

Die Eigenschaften der Trennspalte wurden zuerst an Linienstrukturen untersucht. Es zeigte sich, dass die beiden Wände einer Spalte einen unterschiedlichen Verschmelzungsgrad aufwiesen (Abb. 6.1.3.57). Die Wand, die im unbearbeiteten Pulverbett entstand, war fast vollständig und relativ kompakt verschmolzen. Die Wand, die auf der Seite des vorher erzeugten Grabens lag, wies weniger Schmelze auf. Vermutlich stand im unbearbeiteten Gebiet eine große Menge an Pulver für die Schmelze zur Verfügung. Auf der gegenüberliegenden Seite war aufgrund der starken Aufschmelzung des vorher erzeugten Grabens nur noch wenig Pulver vorhanden. Beide Wände waren teilweise durch Schmelzbrücken verbunden (Abb. 6.1.3.57 links).

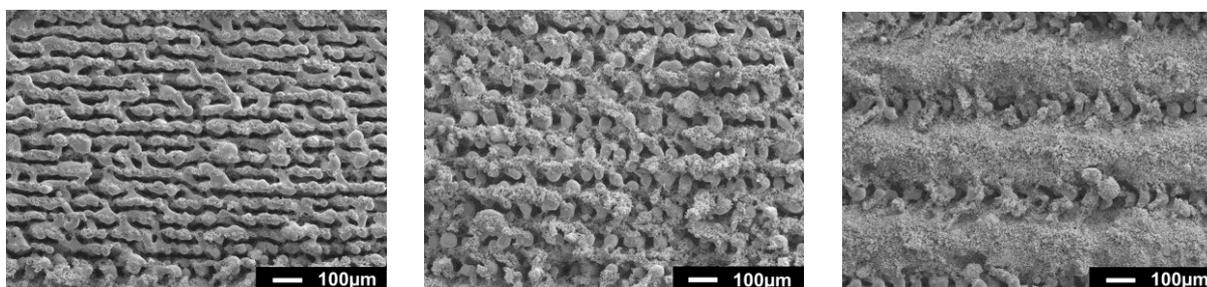


Abb. 6.1.3.58: REM-Aufnahmen von Linienstrukturen bei unterschiedlichen Linienabständen, $E = 6,7 \mu\text{J}$, $v = 100 \text{ mm/s}$; links Linienabstand $50 \mu\text{m}$; Mitte: $100 \mu\text{m}$; rechts $300 \mu\text{m}$

Die regelmäßigsten Spalte mit wenig Schmelzbrücken zwischen den Wänden eines Grabens ergaben sich bei Laserleistungen zwischen 5 ... 6,7 W und Scangeschwindigkeiten von 50 bzw. 100 mm/s in Abhängigkeit von der Dichte der gerakelten Schicht. Weiterhin zeigte sich der Linienabstand als ausschlaggebend für die Strukturausbildung. In Abb. 6.1.3.58 sind als Beispiel Strukturen bei $E = 6,7 \mu\text{J}$ und $v = 100 \text{ mm/s}$ zu sehen. Bei Vergrößerung des Linienabstandes von $50 \mu\text{m}$ auf $100 \mu\text{m}$ entstanden keine Spalte sondern hauptsächlich Schmelzperlen, die nur sehr vereinzelt verschmolzene Bereiche bildeten (Abb. 6.1.3.58 links und Mitte).

Bei weiterer Vergrößerung des Linienabstandes waren aneinander gereihete Schmelzperlen zu erkennen, die eine gewisse Tiefe im Pulverbett erreichten (Abb. Abb. 6.1.3.58 rechts). Dieser Effekt konnte nicht aufgeklärt werden. Vermutlich lagerten sich an die Schmelzstrukturen der vorher generierten Linie die Schmelzstrukturen der nächsten Linie an und es entstanden kompakte Formationen. War der Abstand zur vorher erzeugten Linie zu groß, ballte sich das Pulver lediglich zu Schmelzperlen zusammen.

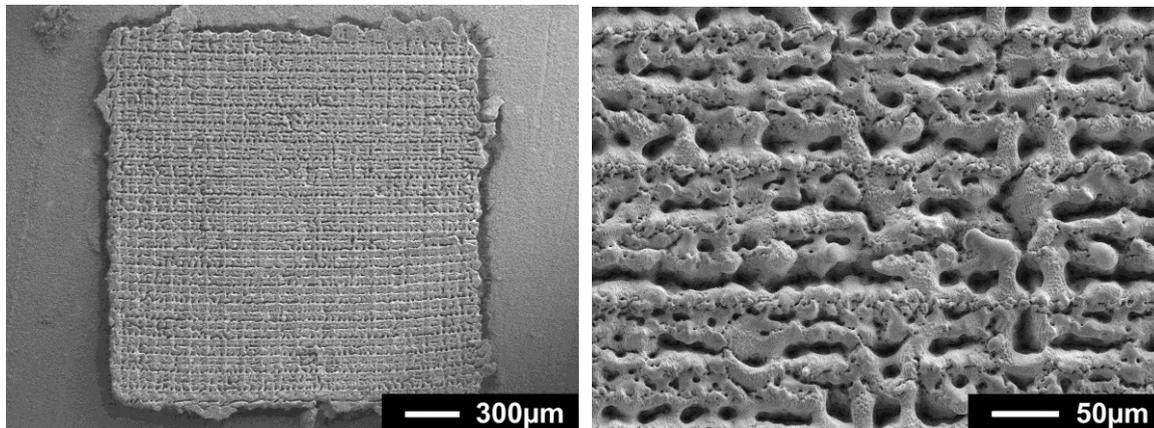


Abb. 6.1.3.59: REM-Aufnahme einer Gitterstrukturen bei unterschiedlichen Linienabständen, $E = 6,7 \mu\text{m}$, $v = 300 \text{ mm/s}$, Linienabstand $25 \mu\text{m}$

Durch Erzeugung von senkrechten und waagerechten Linien sollte die Vernetzung erhöht und untersucht werden, ob durch diese Gitterstrukturen festere Körper generiert werden können. Wenn zuerst alle Linien einer Richtung abgearbeitet wurden und danach die andere Richtung folgte, waren die Strukturen stark durch die zuerst generierten Linien bestimmt. Die zweite Bestrahlung mit um 90° gedrehten Linien verursachte hauptsächlich die Bildung von Rippeln auf den Schmelzformationen. Deshalb wurde immer nur eine Linie einer Richtung gesintert und dann die nächste um 90° gedreht usw. und somit die Fläche erzeugt. Weiterhin wurden nicht direkt nebeneinander liegende Linien generiert sondern zuerst größere Abstände gewählt, dann das Gitter verschoben und die dazwischen liegenden Linien gesintert. Das führte zu einer gleichmäßigeren Oberfläche, bei der die Spannungen reduziert werden konnten (Abb. 6.1.3.59). Trotzdem traten teilweise Risse auf. Es konnten zusammenhängende Flächen gesintert werden, die allerdings nur eine geringe Festigkeit besaßen, so dass sie beim Herausnehmen aus dem Pulverbett zerbrachen.

Abb. 6.1.3.60 zeigt Bruchkanten einer gesinterten Fläche. Zu erkennen sind tiefe Einstiche (Abb. 6.1.3.60 links), die aber nur aus einer relativ dünnen (hier ca. $5 \mu\text{m}$), oberflächlich geschmolzenen Schicht bestanden (Abb. 6.1.3.60 rechts). Die Bruchkante besaß ebene Flächen mit relativ scharf ausgeprägten Kanten. Dies deutete auf eine kristalline Struktur hin. Beim Rakeln und erneuten Sintern zeichnete sich eine mangelhafte vertikale Vernetzung ab, so dass die Festigkeit der Gesamtgebilde nicht wesentlich verbessert werden konnte.

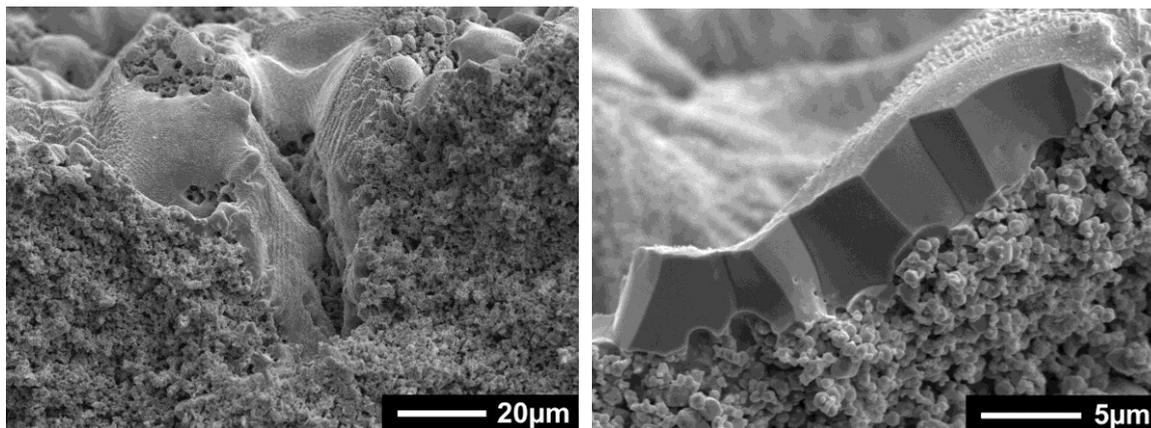


Abb. 6.1.3.60: REM-Aufnahmen der Bruchkante einer Gitterstruktur, $E = 5,8 \mu\text{J}$, $v = 300 \text{ mm/s}$, Linienabstand $25 \mu\text{m}$

Sintern von Molybdän mit verändertem Schichtaufzug

Als Alternative zum Aufbau mit Wolfram-Pulver wurden Versuche mit Molybdän-Pulver (Alfa Aesar, APS 3-7 μm) durchgeführt. Ein Vorteil war der Aufbau unter Normalatmosphäre. Dadurch konnte der Prozess beobachtet und direkt durch Veränderung der Parameter beeinflusst werden. Bei der verwendeten normalen Abfolge von Sinter- und Rakelzyklen entstanden nach mehreren Durchläufen ähnliche Schwierigkeiten durch zu dicke Pulverschichten, wie sie bei Wolfram-Pulver beobachtet wurden. Aus diesem Grund wurde das Pulver per Hand mit einem Pinsel aufgetragen. Dadurch konnten sehr dünne Pulverschichten erzeugt werden. Weiterhin wurden Sinterstrategien verwendet, die auch beim Sintern mit ns-Pulsen zum Einsatz kommen. Die Füllung bestand aus aneinander gesetzten Linien, die von Bestrahlung zu Bestrahlung gedreht wurden (139°). Der Linienabstand und die Anzahl der Bestrahlungen pro Sintervorgang wurden variiert.

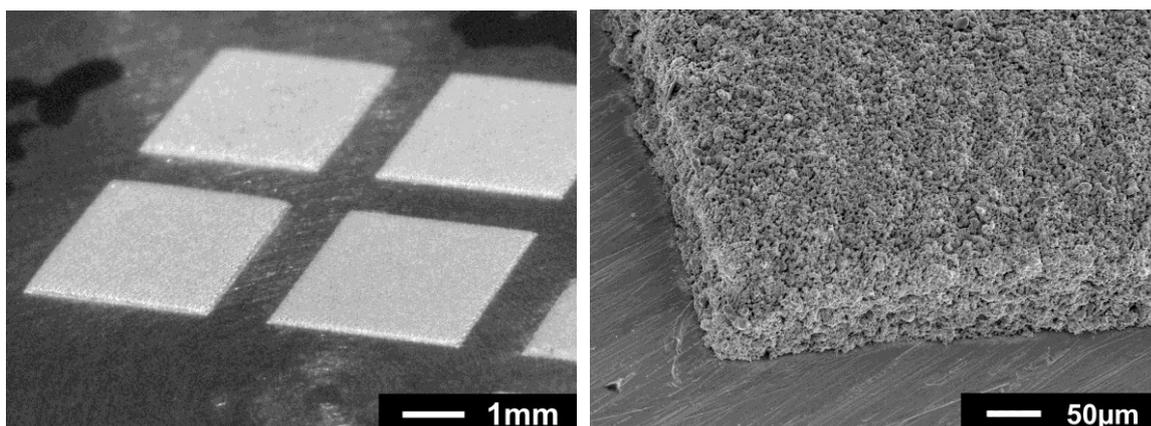


Abb. 6.1.3.61: Sinterstrukturen aus Molybdän, Linienabstand $50 \mu\text{m}$, 2 Bestrahlungen (139°); links: obere Reihe: $P = 4,8 \text{ W}$, $v = 500 / 1000 \text{ mm/s}$; untere Reihe: $P = 3,8 \text{ W}$, $v = 500 / 1000 \text{ mm/s}$; rechts: $P = 3,8 \text{ W}$, $v = 500 \text{ mm/s}$; Pulveraufzug mittels Pinsel

Dadurch war es möglich, in Abhängigkeit von den Parametern, Körper mit verschiedenen Bauhöhen zu generieren. Die maximale Bauhöhe wurde bei einem Linienabstand von $50 \mu\text{m}$ (2 Bestrahlungen) erreicht (Abb. 6.1.3.61). Allerdings waren die Strukturen sehr porös und es

entstanden keine vollständig verschmolzenen Schichten. In Abhängigkeit vom Linienabstand traten unterschiedlich stark ausgeprägt Schmelz- und Rippelbildungen auf (Abb. 6.1.3.62). Die Festigkeit aller Körper war gering. Dies war vermutlich auch der Grund, dass der Aufbau ab einer bestimmten Höhe abbriss.

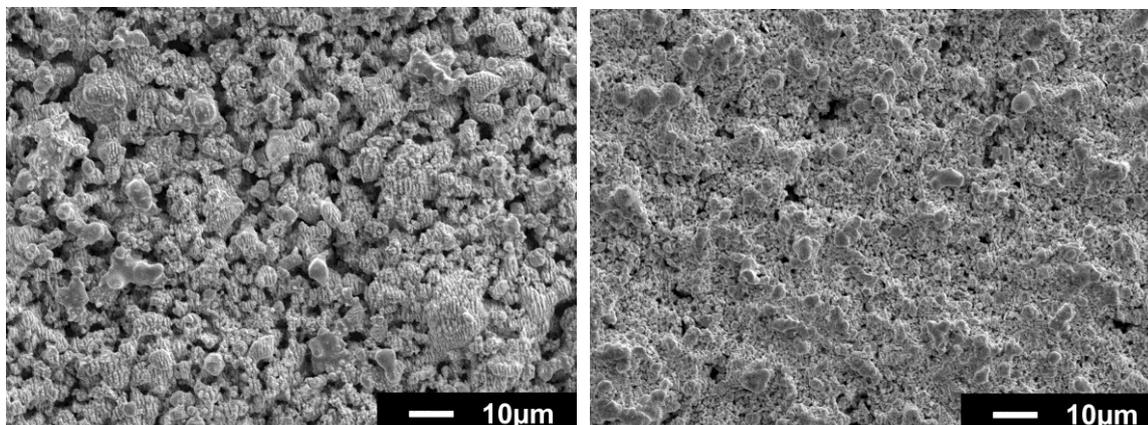


Abb. 6.1.3.62: REM-Aufnahmen von Sinterstrukturen aus Molybdän, $P = 3,8 \text{ W}$, $v = 500 \text{ mm/s}$; links: Linienabstand $50 \mu\text{m}$, 2 Bestrahlungen (Drehung 139°); rechts: Linienabstand $25 \mu\text{m}$, 2 Bestrahlungen (Drehung 139°); Pulveraufzug mittels Pinsel

AP 1.3 Hochleistungslasermikrosintern

Voruntersuchungen zur Bestrahlung eines Pulverbettes mit cw - Hochleistungsfaserlaser

Die Versuche wurden mit dem Monomode-Faserlaser im cw-Betrieb und dem Polygonspiegelscanner mit einer Optikbrennweite von $f_0 = 230 \text{ mm}$ durchgeführt. Als Werkstoff kam Molybdänpulver der Firma Alfa Aesar (APS $3\text{-}7 \mu\text{m}$) zum Einsatz.

Voruntersuchungen im losen Pulverbett zeigten, dass ein Verschmelzen der Pulverkörner auch bei hoher Intensität und Scangeschwindigkeit möglich war (Abb. 6.1.3.63). Es bildeten sich jedoch keine durchgehenden Linien sondern Inseln, in denen einzelne Körner miteinander verbunden waren bzw. Teilstücke mit zusammenhängender Schmelze.

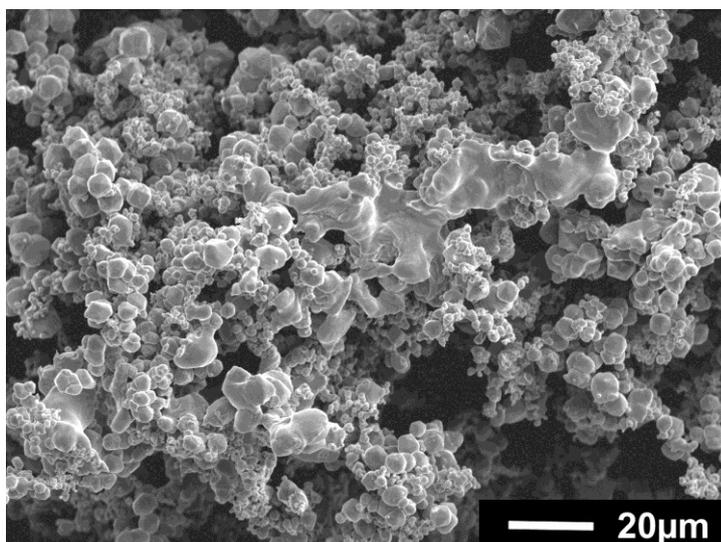


Abb. 6.1.3.63: REM-Aufnahme von Schmelzstrukturen, $v = 4.500 \text{ m/min}$, $P = 330 \text{ W}$

Lasermikrosintern mit ultraschneller Strahlableitung

Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnten Parameter für das Lasermikrosintern zum direkten Aufbau auf ein Substrat abgeleitet werden. Jeder Versuch wurde mit 5 Sinter-/Rakelzyklen ohne Absenken der Probe begonnen. Danach erfolgte die Absenkung des Substrates (Aluminium, Durchmesser 25 mm) zwischen den Sinter- und Rakelvorgängen um 2 μm . Dadurch konnte ein schrittweiser Aufbau realisiert werden. Es wurden jeweils Einzellinien und eine verschiedene Anzahl von nebeneinander liegenden, sich überlappenden Linien erzeugt. Der Linienabstand betrug 20 μm . Die Versuche endeten nach 50 Zyklen, das heißt bei einer Rakelhöhe von 100 μm .

Mit diesem Regime war es möglich, erste Sinterkörper zu generieren (Abb. 6.1.3.64). Es konnten Laserleistungen von bis zu 2070 W (bei Defokussierung 1,0 mm $\hat{=}$ Strahldurchmesser von ca. 73 μm) appliziert werden. Mit steigender Laserleistung erhöhten sich die Strukturbreite, der Substratabtrag und der Spureinfall, die Bauhöhe nahm nur unwesentlich zu und lag bei Einzellinien im Bereich von 73...83 μm und bei 10 Linien zwischen 83...97 μm . Daraus folgte eine effektive Schichtdicke von 3...17 μm und es war zu vermuten, dass ein stabiler Aufbau auch bei größeren Rakelhöhen gewährleistet wäre.

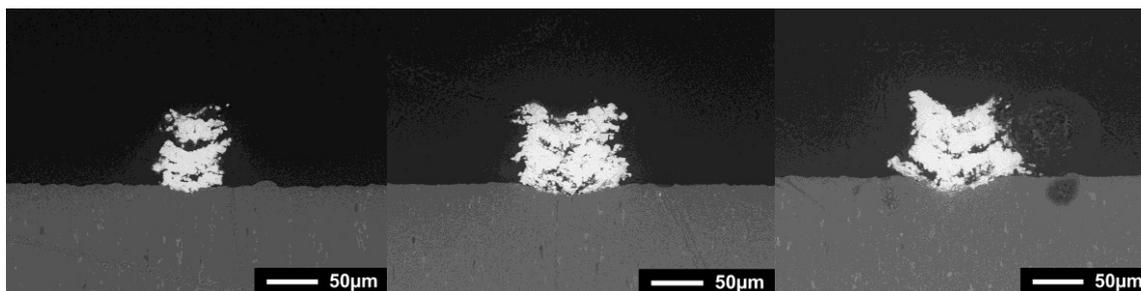


Abb. 6.1.3.64: REM-Aufnahmen von Querschliffen bei unterschiedlicher Laserleistung; v.l.n.r.: $P = 665 / 1.330 / 2.070 \text{ W}$; Defokussierung 1,0mm, $v = 9.000 \text{ m/min}$, Einzellinien

Bei Bearbeitung in der Fokusebene (Fokusbereich ca. 21 μm) war durch die damit verbundene hohen Intensität schon bei einer Leistung von 330 W ein Spureinfall auf der Oberfläche zu beobachten (Abb. 6.1.3.65). Bei einer Linienanzahl von 5 bildete jede einzelne Linie eine Kerbe aus (Abb. 6.1.3.65 rechts). Hier war auch ein Substratabtrag zu erkennen. Die Abarbeitung der einzelnen Linien geschah im Bild von links nach rechts, in dieser Richtung nahm die abgetragene Tiefe beständig zu. Bei einer Laserleistung von 500 W war kein vollständiger Aufbau mehr gegeben. Bei einer Leistung von 665 W und ab einer Linienanzahl von 5 erfolgte kein Aufbau. Das Substrat wurde tief abgetragen.

Die schmalste vollständig aufgebaute Einzellinie wurde bei einer Leistung von 330 W bei einer Scangeschwindigkeit von 9.000 m/min erreicht und betrug 38 μm . Sie stellt die bisher erreichte Auflösungsgrenze dar.

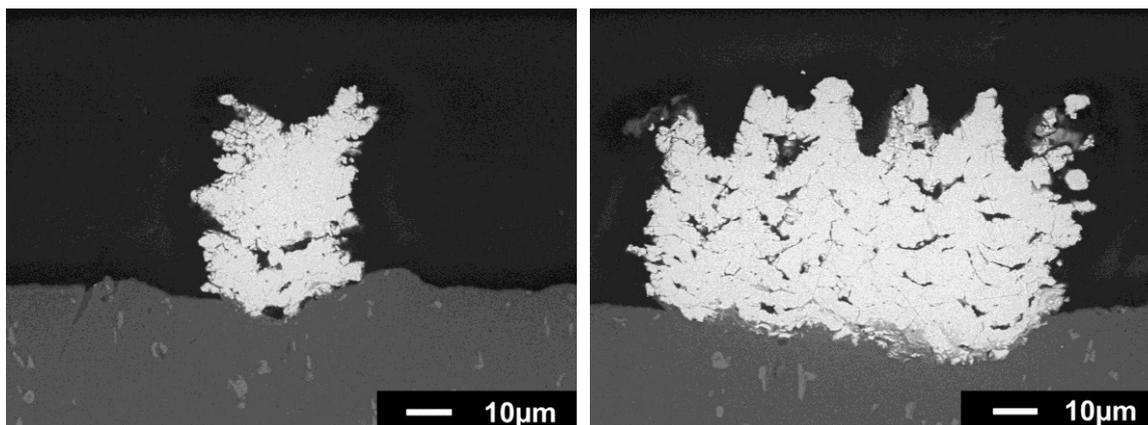


Abb. 6.1.3.65: REM-Aufnahmen von Querschliffen; links: Linienanzahl 1; rechts: Linienanzahl 5, Linienabstand 20 µm, $P = 330 \text{ W}$, $v = 9.000 \text{ m/min}$

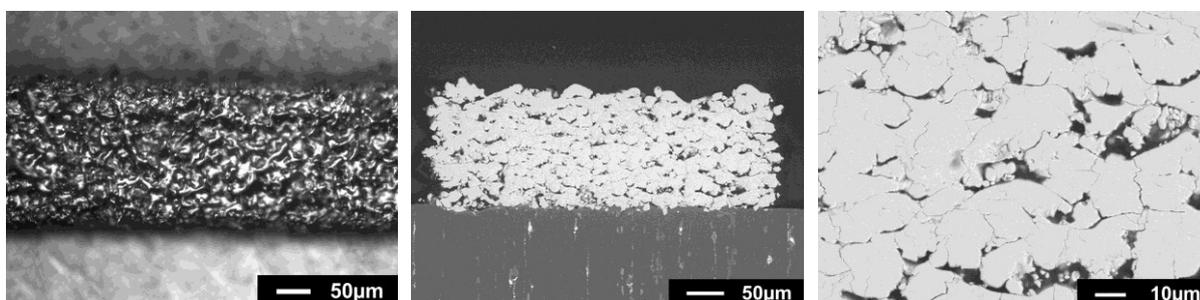


Abb. 6.1.3.66: links: Digitalaufnahmen einer Sinterstrukturen, $P = 1.000 \text{ W}$, $v = 9.000 \text{ m/min}$, 10 Linien; Mitte und rechts: REM-Aufnahmen eines Schliffes, $P = 665 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, 25 Linien; Linienabstand jeweils 20 µm, Defokussierung 1,0 mm

Trotz der hohen Intensität war aufgrund der hohen Scangeschwindigkeit und der damit verbundenen kurzen Einwirkzeit ein Sintern des Molybdänpulvers möglich. In Abb. 6.1.3.66 links ist die aufgeschmolzene Oberfläche einer Sinterstruktur zu erkennen. Die Querschliffe in Abb. 6.1.3.66 Mitte und rechts zeigen neben den verbundenen Körnern eine Restporosität. Aus der starken Plasmabildung, die während des Prozesses beobachtet wurde, kann ein hoher Druck bei der Materialverdampfung angenommen werden, der vermutlich ebenfalls zur Verfestigung des Pulvers bzw. der Schmelze beitrug. Ab einer Intensität von ca. $1 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ war nur noch ein unvollständiger Aufbau von Strukturen möglich.

Zweistrahllasermikrosintern

Zur Demonstration der Funktionsfähigkeit der neuartigen Zweistrahl-Technologie und zur Messung der Baugeschwindigkeit wurde eine Demonstratorstruktur gesintert. Dabei wurde einmal die Hülle getrennt gesintert und einmal mit den gleichen Parametern wie der Innenbereich. NIR- und UV-Laser wurden dazu parallel betrieben. Zum Vergleich wurde die Struktur auch mit der herkömmlichen Technologie erstellt.

Die Proben wurden nach dem Lasersintern kurz überschleift und im Hochtemperaturofen getempert. Eine Messung der Druckfestigkeit ergab im Vergleich zu Werten, die bereits mit

Lasermikrosintern von Keramik erreicht wurden, eine deutliche Erniedrigung. Ungetemperte Proben erzielten wie erwartet eine noch geringere Druckfestigkeit als der Mittelwert der jeweiligen Serie, jedoch waren es nicht die niedrigsten Werte der Serie. Auch das äußere Erscheinungsbild der Körper (kaum Rissbildung, keine Ausbrüche) gab keine Garantie auf einen hohen Druckfestigkeitswert.

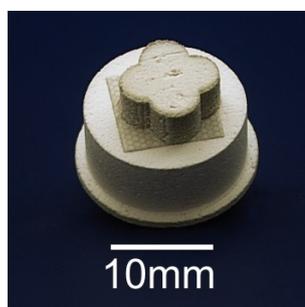
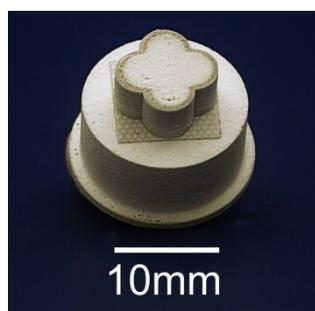
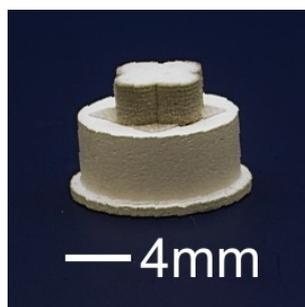
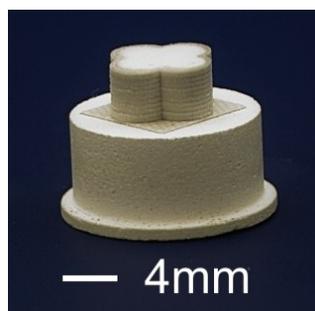


Abb. 6.1.3.67a: Aufbau mit getrennt gesinteter Außenhülle und Innenfüllung (serielle und parallele Zweistrahltechnologie)

Abb. 6.1.3.67b: Aufbau ohne Aufteilung des Bauteils (parallele Zweistrahltechnologie)

Die grundsätzliche Machbarkeit der doppelten Zweistrahltechnologie (seriell und parallel) konnte gezeigt werden, es entstand eine deutlich bessere Außenkontur bei Aufteilung des Teiles in Kontur und Innenbereich (Abb. 6.1.3.67 a und b). Der Innenbereich konnte durch Anwendung von zwei Strahlen effektiver gesintert werden. Durch die Anwendung der Zweistrahl-Technologie mit parallelem UV- und NIR-Laser konnte die Baurate um einen Faktor > 10 gesteigert werden. An einer Erhöhung der Festigkeit muss weiter geforscht werden.

Untersuchung zum Einsatz einer neuartigen patentierten Drehringraketel mit Magnetfeldpulververdichtung

Die neuartige patentierte Rakel mit Drehmechanismus wurde konstruiert, entwickelt und aufgebaut sowie mechanischen Tests unterzogen. Die lineare Bewegung der Rakel ließ einen Pulveraufzug mit einer Dauer von unter 1 s zu, wobei ein dauerhafter Betrieb aufgrund der ungünstigen Zahnriemenführung noch nicht möglich war. Die Rotation der Rakel zum Scheren und Verdichten des Pulvers funktionierte ebenfalls, allerdings mit der Einschränkung einer mit unter 2 U/s zu geringen Drehzahl. Der Motor für die Rotation der Rakelplattform war überlastet. Durch optimalere Untersetzungen, stärkere Motoren sowie die Überarbei-

tung bzw. Neukonstruktion verschiedener Komponenten wird die notwendige Funktionalität erreicht.

Die Entwicklung eines Prototyps einer neuartigen Einrichtung zur Magnetfeldpulververdichtung sowie erste Vorversuche erfolgten per Auftrag. Der Prototyp bestand aus einer Topfspule und einem mit einem Nd: Bor-Magnet bestückten Anker (Abb. 6.1.3.68 links). Die Vorversuche zur Magnetfeldpulververdichtung wurden mit einer Pulvermischung aus Al_2O_3 und SiO_2 durchgeführt. Untersucht wurde die Abhängigkeit der Pulververdichtung von der Stoßzahl und der Stoßenergie. Die ermittelten Abhängigkeiten sind in Abb. 6.1.3.69 dargestellt.



Abb. 6.1.3.68: Prototyp Pulververdichter; links: Topfspule und Anker mit Nd: Bor-Magnet; Mitte: Impulsstromversorgung; rechts: Versuchsaufbau, Raketkammer mit Verdichter, Impulsstromversorgung mit Auslösetaster

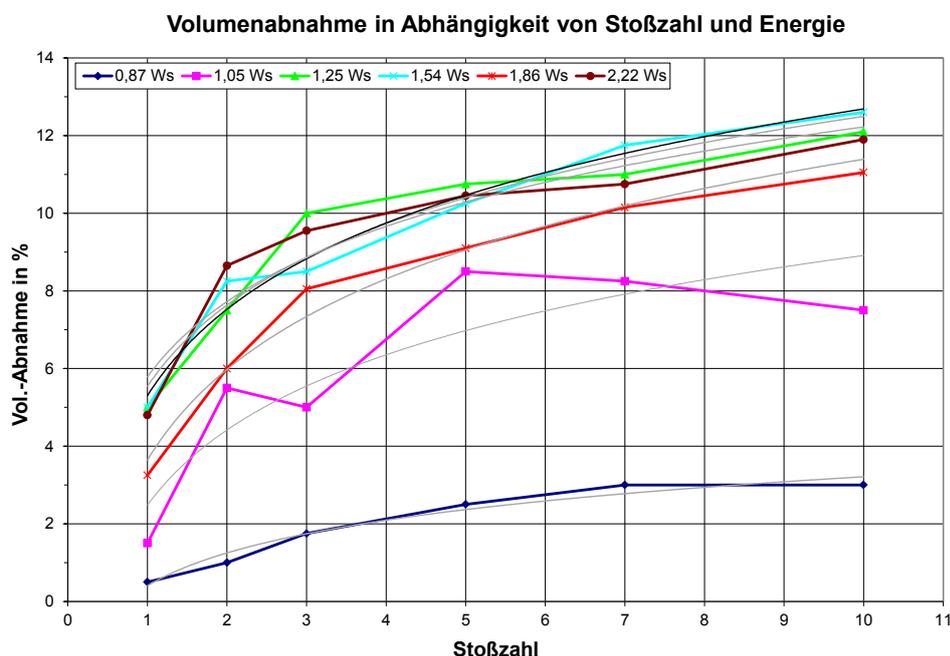


Abb. 6.1.3.69: Abhängigkeit der Volumenabnahme von der Stoßzahl und der Stoßenergie

Erst ab einer Mindestenergie wurde der Anker abgestoßen. Lag die Energie darunter, hielt der Magnet den Anker trotz des Stromimpulses fest. Bei jedem Stoß nahm das Volumen ab (Ausnahme Energie 1,05 J), die Abnahme wurde mit jedem Stoß geringer (logarithmischer Zusammenhang). Bis zu einer Energie von 1,25 J stieg die Verdichtung an. Über dieser Ener-

gie konnte keine eindeutige Tendenz festgestellt werden, es war jedoch hauptsächlich eine geringere Verdichtungswirkung zu verzeichnen.

Sinterversuche mit Magnetfeldpulververdichtung wurden an einer Sinteranlage mit einem Bauraum- bzw. Rakeldurchmesser von 35 mm und einem Faserlaser durchgeführt. Die Brennweite der Fokussieroptik betrug 80 mm. Als Werkstoff wurde Molybdän-Pulver (APS 3-7 μm , Alfa Aesar) verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6.1.3.68 rechts zu sehen.

Um den Einfluss der Magnetfeldpulververdichtung beurteilen zu können, wurden verschiedene Pulveraufzugsmechanismen verglichen. Es wurden Parameter gewählt, bei denen erfahrungsgemäß relativ poröse Strukturen entstehen. Ziel war es, eine höhere Sinterdichte besser auswerten zu können. Es kam ein Stoß pro Rakelvorgang zur Anwendung.

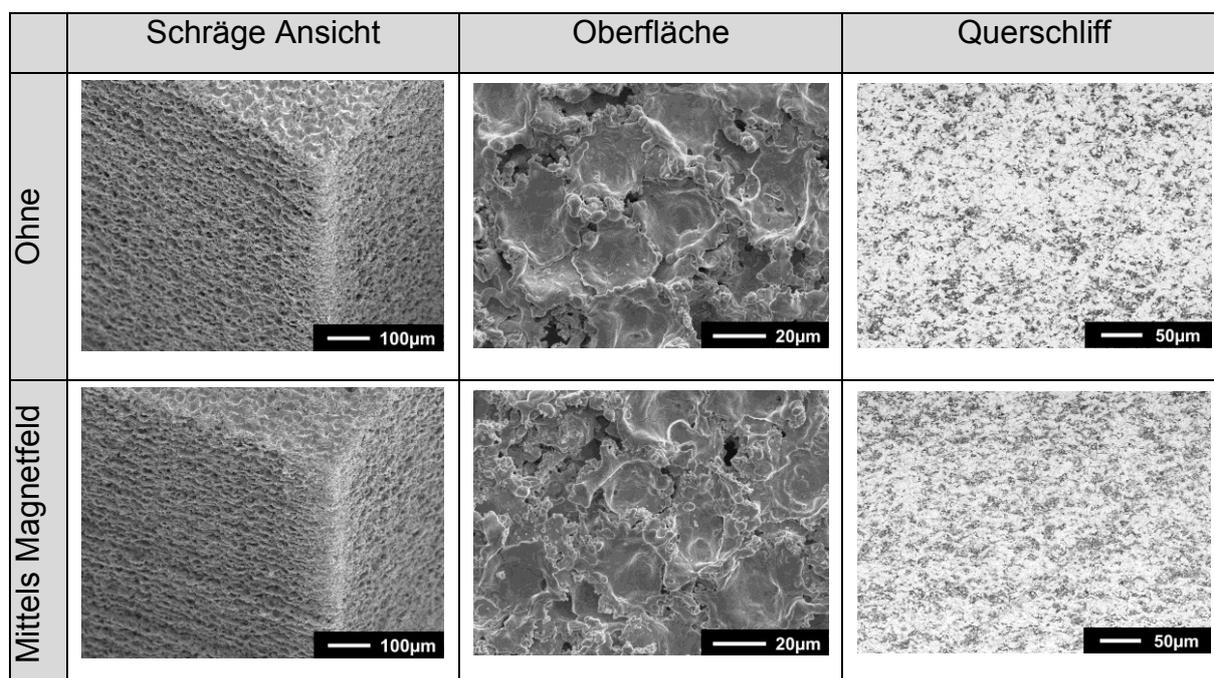


Abb. 6.1.3.70: REM-Aufnahmen von mit unterschiedlicher Pulververdichtung gesinterten Körpern, $P = 6,2 \text{ W}$, $f = 25 \text{ kHz}$, Puls- und Linienabstand $75 \mu\text{m}$, 4 Bestrahlungen

Die Auswertung der Sinterkörper zeigte kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Aufzugsverfahren. Die Körper besaßen die für diese Sinterparameter typischen Eigenschaften. Aufgrund des großen Puls- und Linienabstandes, bei dem sich die Pulse nicht überlappen, wurde die Fläche erst durch mehrere Bestrahlungen vollständig gesintert. Dabei entstanden unregelmäßig angeordnete Schmelzpunkte mit einem gewissen Anteil an Hohlräumen (Abb. 6.1.3.70 mittlere Spalte) und eine begrenzte vertikale Vernetzung (Abb. 6.1.3.70 linke Spalte). Unterschiede zwischen den Aufzugsverfahren waren äußerlich nicht erkennbar.

Querschliffe der Körper zeigten ebenfalls die für diese Sinterparameter charakteristische Struktur mit einer relativ großen Porosität (Abb. 6.1.3.70 rechte Spalte). Aufgrund der eventuell beim Schleifen und Polieren entstandenen Schliiffartefakte war es schwierig, zwischen diesen und einer hohen Dichte zu unterscheiden. Es konnte nur abgeschätzt werden, dass die Dichten der Körper ähnlich waren. Die Verdichtung mit zusätzlichem Magnetfeld führte

zu einer gleichmäßigeren Struktur über das gesamte Volumen. Grund für die ähnlichen Dichten könnte gewesen sein, dass das bei diesen Parametern verstärkt auftretende Plasma das evtl. höher verdichtete Pulver schon bei der ersten Bestrahlung wieder lockert und teilweise wegdrückt.

Zusammenfassung

Es wurde erfolgreich vertikale und laterale Messtechnik in den Lasermikrosinterprozess integriert. Zusätzlich wurde ein neuartiges Regime mit verdichtetem Pulveraufzug entwickelt. In Anwendung der Erkenntnisse gelang erstmalig die Generierung von integrierten Mikromaschinen.

Durch einen Nachsinterprozess konnte die vollständige Umwandlung eines Pulvergemisches in eine Messinglegierung gezeigt werden.

Es wurden erstmals Tantal- und Wolframcarbid direkt ohne Binder gesintert. Dazu wurde das Nanopulver in extrem dünnen Schichten mit einem Pinsel aufgebracht.

In einem aktiven Reaktionssinterprozess gelang die Verarbeitung von SiO-Pulver und die Generierung von Mikrokörpern aus SiO₂.

Es wurden erste Untersuchungsergebnisse zur Bestrahlung einer Pulveroberfläche mit Ultrakurzpuls-Laser präsentiert. Bei relativ hoher Streckenenergie bestand kein Unterschied zur Bestrahlung mit cw-Laser. Bei hoher Intensität und reduzierter Streckenenergie entstanden kompaktierte Strukturen, die Ähnlichkeiten zu Sinterstrukturen aufwiesen. Es gelang nicht, einen Lasermikrosinterprozess zu realisieren.

Erste Untersuchungen zum Hochleistungs-Lasermikrosintern waren erfolgreich. Es konnte eine ultrahohe Scangeschwindigkeit von 9.000 m/min im Sinterprozess umgesetzt werden.

Es wurden eine neuartige Drehringrakel aufgebaut und erste Untersuchungen zur Pulververdichtung mit Magnetfeld durchgeführt.

6.2 Arbeitspaket 2 – 3D Lasermikroschneiden

6.2.1 Ziel des Arbeitspaketes

AP 2.1 3D Lasermikroschneiden

Als Versuchstand sollte zunächst eine kombinierte Laseranlage, deren Laserquellen sich neben 3D Lasermikroschneiden auch für die anderen zu untersuchenden Verfahren Ultrakurz-puls-lasermikrosintern und Lasermikrostrukturieren eignen, aufgebaut werden. Auf einem robusten schwingungsgedämpften Grundgestell sollten

- zwei Laserquellen (ein Nanosekunden-Kurzpuls-Laser und ein hochrepetierender Ultrakurz-puls-fs-Laser),
- der gesamte optische Strahlengang,
- die in Strahlrichtung mit einer präzisen z-Achse bewegbaren Strahlfokussierungs- (Festobjektive) und –ablenkeinheiten (Scanner),
- ein hochpräzises x-y-phi-Achssystem zur exakten Positionierung der Proben (um neben dem Scanner auch verschiedene Fokussieroptiken für die Untersuchungen einsetzen zu können)

untergebracht werden.

Um 3D Körper aus dem Volumenmaterial herausarbeiten zu können, müssen die Materialien für die applizierte NIR - Laserwellenlänge transparent sein. Hierfür kamen Gläser wie z.B. Borosilikatgläser sowie transparente Keramiken und Kunststoffe wie z.B. Polymethylmethacrylat (PMMA) in Frage. Weiterhin sollten die Materialien mit Laserstrahlung trennbar sein, ohne dass großvolumige Zerstörungen induziert werden.

Es gab zwei grundlegend unterschiedliche Verfahrensprinzipien:

- das Material wird an der Lasereinwirkstelle dauerhaft zerstört,
- es werden im Material dauerhafte Spannungen induziert,

die Beide untersucht werden sollten. Die erste Variante sollte vor allem bei transparenter Keramik und bei transparentem Kunststoff anzuwenden sein, da sich diese Materialien in der Regel nicht durch induzierte Spannungen trennen lassen. Bei Glas hingegen sollte es möglich sein, ein Bauteil durch Spannungen sauber abzutrennen. Beim zweidimensionalen Schneiden von Glas funktionierte dieses Prinzip bereits.

Neben dem eigentlichen Trennverfahren war vor allem die Strategie der Schnittfolge bei Hinterschneidungen zu untersuchen, da sich das Bauteil nach der Bearbeitung einfach und sauber von der Hülle lösen lassen musste. Es waren umfangreiche Untersuchungen zur Erzielung definierter geometrischer Formen und entsprechender Oberflächen durchzuführen. Dabei sollte eine Auflösung besser 40 µm erzielt werden.

Neben dem ns-Kurzpuls laser waren auch andere Laserquellen, wie beispielsweise Faserlaser, frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser oder Ultrakurzpuls laser hinsichtlich der grundsätzlichen Eignung für das Verfahren zu untersuchen, um die Abmessungen der Strukturen möglichst weiter reduzieren und die Oberflächenqualität verbessern zu können.

Die generierten Bauteiloberflächen sollten hinsichtlich der werkstofftechnischen Beeinflussung durch die Laserbearbeitung untersucht werden, insbesondere auf Mikrocracks, die zu späteren Rissen im ausgeschnittenen Körper hätten führen können. Das Trennen der Bauteile durch Mikrozerstörungen sollte zu einer entsprechend rauen Oberfläche führen. Deshalb sollte untersucht werden, ob die Oberfläche durch eine Nachbehandlung geglättet werden kann.

Letztendlich bestand das Ziel, eine neuartige Technologie für das Rapid Microtooling zu entwickeln, mit der mikrostrukturierte Kleinteile aus transparenten Materialien schnell und flexibel erzeugt werden können. Im Bereich der transparenten Keramik und bei Glas waren zu Projektbeginn keine vergleichbaren Rapid-Technologien verfügbar. Bei speziellen Kunststoffen existierte als Konkurrenztechnologie die Stereolithografie, wobei die Auflösung und Oberflächenqualität begrenzt waren.

AP 2.2 2D Hochleistungsschneiden

Es sollten Untersuchungen zum 2D Hochleistungsschneiden von sowohl sprödharten Materialien wie Glas, Keramik und Verbundmaterial als auch an dünnen Metallfolien mit dem Ziel einer hohen Trenngeschwindigkeit durchgeführt werden.

Der für das avisierte Spannungsrisstrennen sprödharter Materialien notwendige hohe Temperaturgradient sollte durch eine Gaskühlung oder auch durch eine Selbstabschreckung bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten erreicht werden.

6.2.2 Verwendung der Zuwendung

AP 2.1 3D Lasermikroschneiden

Zu Beginn des Vorhabens wurde von der Forschergruppe zunächst ein neuartiger Versuchstand konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Dieser wurde für die Untersuchungen zum 3D Lasermikroschneiden aber auch arbeitspunktübergreifend für das Lasermikrostrukturieren und das Lasermikrosintern eingesetzt. Auf einem schwingungsgedämpften Granitaufbau, der eine höchstmögliche Steifigkeit aufweist und damit verbunden eine präzise und reproduzierbare Bearbeitung bis in den sub-Mikrometerbereich ermöglicht, wurden die Laserquellen, das optische Strahlführungs- und Formungssystem sowie das Achssystem montiert. Als Laserquellen wurden ein damals neuartiger faserbasierter hochrepetierender Femtosekundenlaser „Impulse“ der Fa. Clark MXR aus den USA (Repetitionsrate bis 25 MHz, mittlere Leistung bis 14 W bei 2 MHz (mit einem zusätzlichen extern ansteuerbaren internen Modulator), min. Pulsdauer ca. 180-250 fs) als auch ein Nanosekunden-Kurzpuls laser der Fa. Edge-

wave aus Deutschland (Repetitionsrate bis 30 kHz, mittlere Leistung bis 34 W bei 30 kHz, min. Pulsdauer 6 ns) integriert. Beide Laserquellen wurden mit laserexternen stufenlos regelbaren Strahlabschwächereinheiten zur Einstellung der gewünschten Laserleistung für den jeweiligen Bearbeitungsprozess ausgestattet. Die Bearbeitungsstationen für das Lasermikrosintern und für das 3D Laserschneiden/Lasermikrostrukturieren wurden räumlich durch den Granitaufbau abgetrennt. Die Laserstrahlquellen stehen über Umlenkspiegel- und Klappspiegelanordnungen wahlweise an beiden Bearbeitungsstationen zur Verfügung.

Die weiteren Ausführungen beziehen sich nur auf die Bearbeitungsstation für das 3D Laserschneiden/Lasermikrostrukturieren, zum Versuchsstand Lasermikrosintern wurde bereits unter 6.1.2 detailliert berichtet. Zur exakten Positionierung des Probenmaterials relativ zum einfallenden Laserstrahl bzw. dessen Fokusposition und zur Erzeugung einer Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Probenmaterial wurde ein vorhandenes präzises x-y-phi-Achssystem mit zusätzlicher z-Achse eingesetzt. Zur notwendigen hochgenauen Ansteuerung wurde eine neue CNC-Tischsteuerung mit entsprechender Bediensoftware beschafft und elektrisch an das Achssystem adaptiert. Das Achssystem kann damit Wiederholgenauigkeiten besser als 1 µm erreichen und wird den Ansprüchen vor allem der Lasermikrostrukturierung gerecht. Die gesamte Fokussiereinheit, die aus einem justierbaren Halter für verschiedene Objektive und einem Laserscanner zur schnellen Strahlableitung mit F-Theta-Objektiv besteht, ist an die z-Achse montiert und kann bezüglich der einzustellenden Fokuslage ebenfalls sehr präzise bewegt werden.

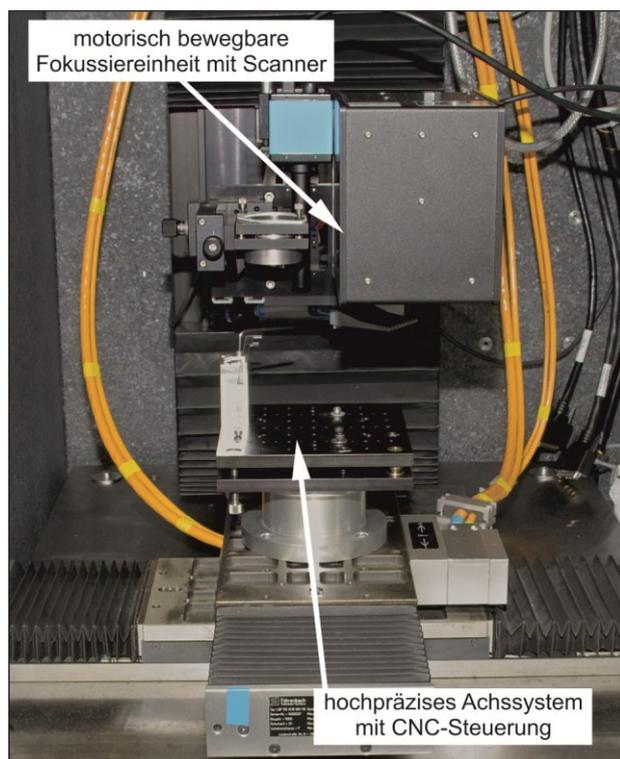


Abb. 6.2.2.1: Bearbeitungsstation für das 3D Lasermikroschneiden/Lasermikrostrukturieren – wahlweise mit Nanosekunden-Kurzpuls laser oder hochrepetierendem Ultrakurzpuls laser

Abb. 6.2.2.1 zeigt die Bearbeitungsstation für das 3D Lasermikroschneiden/Lasermikrostrukturieren. Ein leistungsfähiger Steuerrechner sowie eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) für wichtige und sicherheitsrelevante Anlagenkomponenten gehören ebenfalls zum Versuchsstand. Die Laserstrahlen beider Quellen wurden hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Eigenschaften charakterisiert. Zur Analyse der räumlichen Strahleigenschaften kam das angeschaffte Strahldiagnosegerät „Micro Spot Monitor“ von der Fa. Primes zum Einsatz. Für die Pulsdauerbestimmung beim Femtosekunden laser war die Anschaffung eines Autokorrelators erforderlich, der in die Anlage integriert wurde.

Für die Untersuchungen wurden kommerziell verfügbare und vor allem definierte

Materialien ausgewählt. Grundlegende Schneidversuche in Glas erfolgten an Bor-Krongläsern (BK 7, BK 9), an Kalk-Natron-Glas (B 270) und an Quarzglas (Lithosil SQ 2). Als Vertreter für keramisches Material wurde die Lithiumdisilikat-Glaskeramik IVOCLAR[®], wie sie in der Dentaltechnik eingesetzt wird, mit verschiedenen Einfärbungen untersucht. Bei den Kunststoffen wurde Polymethylmethacrylat (PMMA) in technischer und medizinischer Qualität, Polycarbonat (PC) und das häufig für medizintechnische Anwendungen eingesetzte Cyclo-Olefin-Copolymere (COC) ausgewählt.

Zunächst wurde in grundlegenden Untersuchungen geklärt, inwieweit sich im transparenten Material Spannungen oder lokal eng begrenzte Materialzerstörungen als laserinduzierte Wirkung erzielen lassen. An den verschiedenen transparenten Materialien wurden systematisch Prozessparameter variiert und deren Einfluss auf die Wirkung im Material und deren räumliche Ausdehnung analysiert. Als wichtige Parameter stellten sich die applizierte Laserleistung bzw. Pulsenergie, die Pulsdauer, die Wellenlänge, die Strahlfleckgröße bzw. damit verbunden die Intensität sowie das Bestrahlungsregime heraus. Daraus abgeleitet ließ sich materialabhängig die jeweils am besten geeignete Strahlquelle identifizieren. Mit dem Ziel einer möglichst hohen räumlichen Auflösung für den avisierten 3D Laserschneidprozess wurden optimale Prozessparameterbereiche ermittelt, die eine minimale räumliche Ausdehnung der laserinduzierten Wirkung im transparenten Material ermöglichten. Basierend auf diesen Ergebnissen schlossen sich Untersuchungen zur Generierung von Schnittflächen an. Dabei erfolgte die Beurteilung der Schnittfläche mit Licht- (beschafftes Mikroskop von der Firma „Keyence“) und Rasterelektronenmikroskopie sowie durch Rauheitsmessung mit dem angeschafften konfokalen Sensor der Firma „Nanofocus“.

In einem weiteren Schritt wurde die Schnittfläche in eine Schnitthülle überführt, die den 3D Körper umschloss. Für die Erzeugung dieser Schnitthülle wurde eine geeignete Bestrahlungsstrategie entwickelt, mit der zunächst geometrisch einfache Körper im transparenten Material generiert und im Anschluss aus dem Materialblock herausgelöst wurden. Für komplexere 3D Körper ist zukünftig die Unterstützung durch spezielle Software-Tools erforderlich, mit deren Hilfe automatisiert Bestrahlungsabfolgen erzeugt werden können. Untersuchungen zum leichteren Separieren der 3D Körper vom Materialblock und zur Nachbehandlung der Schnittflächen rundeten das Versuchsprogramm ab.

AP 2.2 2D Hochleistungsschneiden

Die Untersuchungen zum 2D Hochleistungsschneiden wurden an der Hochleistungs-Laseranlage mit Monomode-Faserlaser durchgeführt, die in Arbeitspaket 6.4 detailliert beschrieben wird.

Zu Beginn waren grundlegende Untersuchungen mit Variation der prozessbeeinflussenden Parameter Laserleistung und Strahlableitgeschwindigkeit und Bestrahlungsregime zu erzielbaren Wirkungen in spröden Materialien erforderlich.

Als sprödharte Materialien wurden 1 mm dickes Kalk-Natron-Flachglas, Al_2O_3 -Keramik in 96%iger Reinheit sowie ein Pyrexglas-Silizium-Verbund (Dicken Pyrexglas 530 μm , Silizium 470 μm) aus der Mikrosystemtechnik verwendet.

Anhand der erzielten Wirkungen in den verschiedenen Materialien wurde untersucht, inwieweit sich diese Ergebnisse zum Trennen des Materials umsetzen lassen.

Eine weitere Untersuchungsreihe beschäftigte sich mit dem Trennen dünner Edelstahlfolien der Edelmetallgüte 1.4301 mit Stärken von 10 μm und 25 μm . Geeignete Parametersätze und erzielte Qualitäten wurden charakterisiert.

6.2.3 Ergebnisse

AP 2.1 3D Lasermikroschneiden

Betrachtungen zur Absorption von Laserstrahlung in transparenten Materialien

Die für das 3D Lasermikroschneiden eingesetzten Materialien mussten verfahrensbedingt für die jeweils applizierte Laserwellenlänge transparent sein, um im Volumenmaterial entsprechende Schnittflächen frei wählbar einbringen zu können. Transparenz bedeutet aber gleichzeitig, dass der Absorptionskoeffizient für Einzelphotonenabsorption im Wellenlängenbereich der genutzten Laser (z.B. 532 nm, 1064 nm) mit $\alpha \approx 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ erwartungsgemäß sehr gering ist. Zum Vergleich liegt der Absorptionskoeffizient für Metalle bei $\alpha (\lambda = 1064 \text{ nm}) \approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$ oder für Halbleiter, z.B. Silizium, bei $\alpha (\lambda = 1064 \text{ nm}) = 25 \text{ cm}^{-1}$. Die Ursache ist in der Bandstruktur der Elektronenhülle, genauer im Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband (auch als Bandlücke oder Bandgap E_{gap} bezeichnet) solcher transparenter Materialien begründet.

Bei Materialien, die für die betrachtete Wellenlänge transparent sind, ist der Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband größer als die eingestrahlte Photonenenergie E_{ph} , d.h. über einen Einzelphotonenabsorptionsprozess können keine Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband gebracht werden, ausgenommen eine geringe Anzahl von Elektronen, die von Defekten und Verunreinigungen im Materialverbund stammen. Es ist infolge dessen ein nichtlinearer Absorptionsprozess (Mehrphotonen- bzw. Multiphotonenabsorption) erforderlich, um Laserenergie für die Bearbeitung im Material deponieren zu können. Aus dem Verhältnis zwischen der Energiedifferenz von der Bandlücke und der Photonenenergie lässt sich die Anzahl der Photonen, die zum Überwinden der Bandlücke nötig sind und damit die Ordnung der Multiphotonenabsorption (MPA) ermitteln. Beispielsweise ist ein 4-Photonen-Prozess notwendig, um die Bandlücke beim Glas BK 7 in der Größe von 4,7 eV überwinden zu können.

Die Multiphotonenabsorption ist ein statistischer Prozess und die Wahrscheinlichkeit des Eintretens hängt stark von der Intensität der applizierten Laserstrahlung ab, wobei bei höheren Ordnungen pro Zeiteinheit mehr Photonen (höhere Energie oder kürzere Pulse) angebo-

ten werden müssen, damit der Prozess stattfinden kann. Für eine 2-Photonenabsorption sind Intensitäten von einigen MW/cm^2 nötig, 3- und Mehrphotonenprozesse erfordern Intensitäten im GW/cm^2 - bis TW/cm^2 -Bereich. An diese Erfordernisse angepasst müssen auch die Laserquellen und Fokussieroptiken ausgelegt sein. Eingesetzt wurden deshalb Kurzpuls- (Pulsdauer einige Nanosekunden) und Ultrakurzpuls laser (minimale Pulsdauer 150 - 250 fs).

Untersuchungen zur gezielten Erzeugung von lokal begrenzten Materialzerstörungen mit Kurzpuls-(ns)-Laserstrahlung

Gläser und transparente Glaskeramik

Zunächst wurde mit Kurzpuls laserbestrahlung bei einer Wellenlänge von 1064 nm unter Variation der applizierten Pulsenergie untersucht, welche laserinduzierte Wirkung im Glasvolumen mit einem F-Theta-Objektiv der Brennweite 56 mm erzielt werden kann. In einem Glasblock aus BK 9 wurden oberhalb einer Schwellenenergie von ca. 1 mJ (entspricht ca. $50 \text{ GW}/\text{cm}^2$) laserinduzierte Wirkungen in Form von Mikrodefekten beobachtet, die in der Draufsicht aus einer Anordnung radial verlaufender Risse mit einem dunkel erscheinenden Zentrum als Ausgangspunkt, das die ursprüngliche Lage des Laserstrahlfokuspunktes repräsentiert, bestanden, s. Abb. 6.2.3.1.

Die Gesamtausdehnung eines solchen Defekts betrug ca. $130 \mu\text{m}$ in lateraler Richtung. In Richtung des einfallenden Laserstrahls (axiale Richtung) war der Defekt mehr kanalartig ausgeprägt und erstreckt sich über wenige $100 \mu\text{m}$. Die reproduzierbare Erzeugung dieser Defekte mit einer Ausbeute von 100 %, d.h. jeder applizierte Laserpuls erzeugt auch einen Mikrodefekt, gelang jedoch erst mit Einsatz der doppelten Pulsenergie, verursacht durch die stochastische Natur der Multiphotonenabsorption. Durch die erhöhte Pulsenergie vergrößerten sich auch die Einzeldefekt abmessungen lateral auf $150 \mu\text{m}$ und axial auf knapp

$500 \mu\text{m}$. Unterhalb der Schwellenenergie von 1 mJ wurden keine Veränderungen im Material festgestellt. Insofern standen für das 3D Laserschneiden lasergenerierbare Mikrodefekte zur Verfügung, die zueinander so angeordnet werden mussten, dass eine Schnittfläche entstand. Dabei wurde die Auflösung durch die Abmessungen der Einzeldefekte begrenzt.

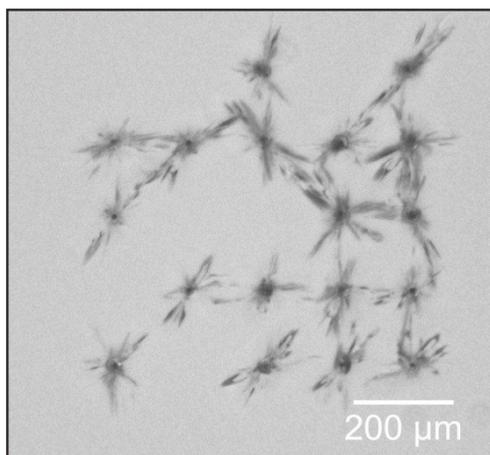


Abb. 6.2.3.1: Lichtmikroskopaufnahme von Mikrodefekten in Glas BK9 - Sicht von oben (Parameter: Wellenlänge 1064 nm, Pulsenergie 1,2 mJ, Pulsdauer 6 ns, Pulsabstand $150 \mu\text{m}$)

Die Bestrahlung der anderen Gläser BK 7 und B 270 führte zu vergleichbaren Ergebnissen bezüglich Defektausdehnungen und eingesetzter Pulsenergie werte. Im Gegensatz dazu konnte in Lithosil selbst bei der höchstmöglichen Pulsenergie von 2,2 mJ am Bearbeitungsort keine 100%ige Ausbeute an Mikrodefekten erzielt werden, weil die Bandlücke fast doppelt so groß im Vergleich zu den zu den anderen Gläsern war. Es musste somit ein 8-Photonenprozess

stattfinden, dessen Wahrscheinlichkeit bei gegebener Intensität bzw. Pulsenergie natürlich wesentlich geringer war. Dieses Defizit hätte sich durch höhere Pulsenergie oder eine stärkere Fokussierung kompensieren lassen. Außerdem zeigten die Mikrodefekte in axialer Richtung eine größere Ausdehnung im Vergleich zu den anderen Gläsern.

Mit der Applikation kürzerer Wellenlängen und damit einer kleineren Strahlfleckgröße im Fokus bei gleicher Brennweite wurde überprüft, inwieweit sich eine damit verbundene Reduzierung der Ordnung der Multiphotonenprozesse förderlich auf die Erzeugung kleinerer Mikrodefektanmessungen und damit einer höheren Auflösung auswirkt. Mit der nachträglich in den Kurzpuls laser integrierten Frequenzverdopplungseinheit (Wellenlänge 532 nm) konnte mit sonst beibehaltenen Prozessparametern die laterale Ausdehnung der Mikrodefekte mit Ausnahme von Lithosil halbiert werden. Die axialen Ausdehnungen schrumpften sogar auf ein Fünftel gegenüber jenen, die mit der Grundwellenlänge erzeugt wurden. Zusätzliche Untersuchungen mit einem anderen Lasersystem mit frequenzverdreifachter Wellenlänge 355 nm haben gezeigt, dass sich die lateralen Ausdehnungen für alle Glassorten noch weiter auf knapp unter 50 µm reduzieren ließen. Durch den sehr wahrscheinlichen Einfluss von Einzelphotonenabsorptionsprozessen bei dieser Wellenlänge überboten die axialen Abmessungen aber diejenigen, die mit 532 nm Wellenlänge erzielt wurden. Insofern hat die kürzere Wellenlänge 355 nm keinen gravierenden Vorteil bezüglich der zu erwartenden Auflösung für das favorisierte Schneidverfahren erbracht.

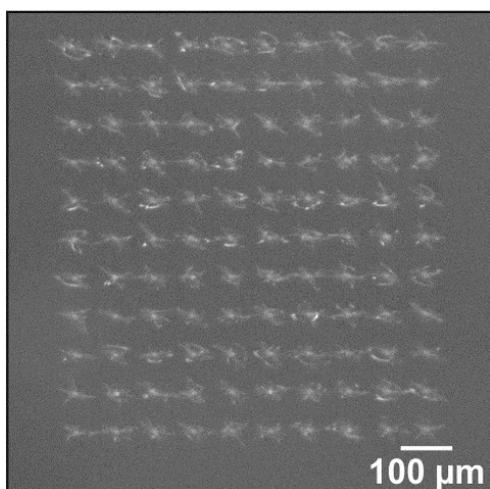


Abb. 6.2.3.2: Lichtmikroskopaufnahme von Mikrodefekten in Glas BK7 - Sicht von oben (Parameter: Wellenlänge 532 nm, Pulsenergie 0,1 mJ, Pulsdauer 6 ns, Pulsabstand 75 µm)

Der Einsatz einer deutlich kürzeren Brennweite von 15 mm führte ebenfalls zu einer beträchtlichen Verringerung der Defektanmessungen. Beispielsweise halbierte sich die laterale Ausdehnung der Mikrodefekte in Glas BK 7 bei der Applikation der Grundwellenlänge 1064 nm auf 75 µm, bei 532 nm konnte immerhin noch eine Reduzierung von 75 µm auf 50 µm erzielt werden, vgl. Abb. 6.2.3.2. In axialer Richtung betrug die minimale Ausdehnung der Mikrodefekte bei einer Wellenlänge von 532 nm und der kurzen Brennweite 80 µm. Für das Glas Lithosil haben sich etwa 20-30% größere Defektanmessungen ergeben. Zusätzlich konnte der Pulsenergiebedarf, der für eine 100%ige Ausbeute an Mikrodefekten erforderlich war, beträchtlich reduziert werden, auf Pulsenergie von weniger als 250 µJ.

Im Hinblick auf das 3D Lasermikroschneiden mussten die Einzeldefekte geeignet aneinandergereiht werden, um damit eine Schnittfläche oder Schnitthülle, die den herauszuarbeitenden Körper umschließt, erzeugen zu können. Untersuchungen zur Variation der Defektanabstände ergaben, dass das Optimum im Bereich der jeweiligen Defektanabmessung in lateraler als auch in axialer Richtung lag. Größere Abstände ge-

währten keine zusammenhängende Schnittfläche. Bei kleineren Abständen setzte sukzessive unkontrollierbare Rissbildung ein, die sich über das bestrahlte Gebiet hinaus erstreckte und damit einen örtlich begrenzten Schneidprozess verhinderte.

Untersuchungen zur gezielten Mikrodefekterzeugung in der Lithiumdisilikat-Glaskeramik IVOCLAR® ergaben, dass sich das Material sehr ähnlich wie die BK-Gläser verhielt. Die Mikrodefekte hatten dieselbe Form und gleiche Abmessungen. Die verschiedenen Einfärbungen hatten keinen feststellbaren Einfluss auf das Ergebnis.

Kunststoff

In PMMA als Vertreter der Kunststoffe wurden mit gleichem Regime (Kurzpulslaser, Wellenlänge 1064 nm, Objektivbrennweite 56 mm) analog zu den Gläsern Untersuchungen zur Erzeugung von laserinduzierten Wirkungen im Materialinnern durchgeführt. Bis zu einer Pulsenergie von 150 μJ ließ sich keine Wirkung detektieren. Oberhalb dieser Schwelle entstanden in lateraler Richtung Mikrodefekte in Form von 10-20 mm großen Löchern, eine 100%ige Ausbeute wurde jedoch erst mit einer Pulsenergie von 300 μJ erreicht. Dabei war bereits teilweise unkontrollierte Rissbildung zwischen den 150 μm voneinander entfernt liegenden Einzeldefekten zu beobachten. Entlang der Strahlausbreitungsrichtung (axiale Richtung) waren die Defekte kanalartig über eine Tiefe von einigen 100 μm verteilt. Wegen den zu erzeugenden Schnittflächen wurde mit moderater Pulsenergie von 150 μJ , bei der noch keine unkontrollierte Rissbildung beobachtet wurde, der Abstand der Einzeldefekte sukzessive bis auf 10 μm reduziert. Bis zu einem Abstand von 30 μm wurden bei der applizierten Pulsenergie Einzeldefekte mit einer Ausbeute von nur 60% erzielt, mit Abständen kleiner 30 μm trat die unkontrollierbare Rissbildung deutlich in Erscheinung und erstreckte sich sogar über das bestrahlte Gebiet hinaus. Durch die einsetzende unkontrollierte Rissbildung und die starke Schwankung der axialen Defektposition ließen sich keine Schnittflächen generieren. Der Einsatz der kürzeren Brennweite von 15 mm führte zwar zu einer nahezu vollständigen Eliminierung der axialen Lageschwankung der Defekte aufgrund der viel kürzeren Raleigh-Länge und zu geringeren lateralen Defektanmessungen von nur noch ca. 5 μm . Die unkontrollierte Rissbildung bei Einzeldefektanmessungen in der Größenordnung der lateralen Defektanmessung, die für eine Schnittflächenbildung notwendig war, setzte bereits ein, obwohl die Einzeldefektausbeute deutlich unter 100% lag. Insofern erscheint die Kurzpulslaserquelle für das 3D Lasermikroschneiden von Kunststoff ungeeignet, weil sich Schnittflächen nicht erfolgreich generieren lassen, obwohl die extrem kleinen lateralen Defektanmessungen sehr vorteilhaft für die Auflösung des favorisierten Verfahrens wären.

Untersuchungen zur gezielten Erzeugung von Materialzerstörungen mit Ultrakurzpuls-(fs)-Laserstrahlung

Glas

Die für den nichtlinearen Mehrphotonenabsorptionsprozess in transparenten Materialien notwendigen Intensitätswerte von mehr als 1 GW/cm² können auch mit ultrakurzen Pulsen gleicher Wellenlänge bei vergleichsweise geringerer Pulsenergie erzielt werden. Erste Unter-

suchungen ergaben, dass ein in einen Glasblock aus BK 9 fokussierter Femtosekundenlaserstrahl (Objektivbrennweite 56 mm) mit einer Wellenlänge von 1030 nm und einer Pulsdauer von ca. 200 fs im Material einen entlang der Einstrahlrichtung hellblau leuchtenden ca. 0,5 mm langen Kanal erzeugte, der dem Phänomen der Filamentausbildung zuzuschreiben war. Die Ausbildung solcher Licht selbstleitender Strukturen entsteht durch eine nichtlineare Wechselwirkung von Strahlung und Material bei hohen Intensitäten. Es handelt sich um eine lokale Brechzahländerung als Reaktion auf das starke elektrische Feld der Laserstrahlung. Im Material laufen in einem Bereich um den Strahlfokus selbstfokussierend und defokussierend wirkende Effekte ab, die sich im Bereich des sichtbaren Kanals gegenseitig kompensieren. Außerdem erhöht sich die Intensität der Strahlung durch die Selbstfokussierung und es wird über Frequenzkonversion sowohl die dritte Harmonische als auch Weißlicht erzeugt, wodurch die hellblaue Erscheinung erklärbar ist. Nach der Bestrahlung erschien das Material im Lichtmikroskop am Ort des Kanals verändert – eine irreversible Brechzahländerung als Modifikation war im Material verblieben. Mit der maximalen Pulsenergie des Lasers von 7 μJ am Bearbeitungsort konnten jedoch außer den Brechzahländerungen keine lokal begrenzten geeigneten Einwirkungen für den avisierten Schneidprozess detektiert werden. Untersuchungen mit anderen Femtosekundenlaserquellen mit höheren Pulsenergien von bis zu 800 μJ am Bearbeitungsort und vergleichbaren Brennweiten und Pulsdauern von 400 fs bzw. 180 fs lieferten ebenfalls keine neuen Erkenntnisse. Lediglich die Filamentlänge und der Entstehungsort variierten mit der applizierten Pulsenergie und der Pulsanzahl.

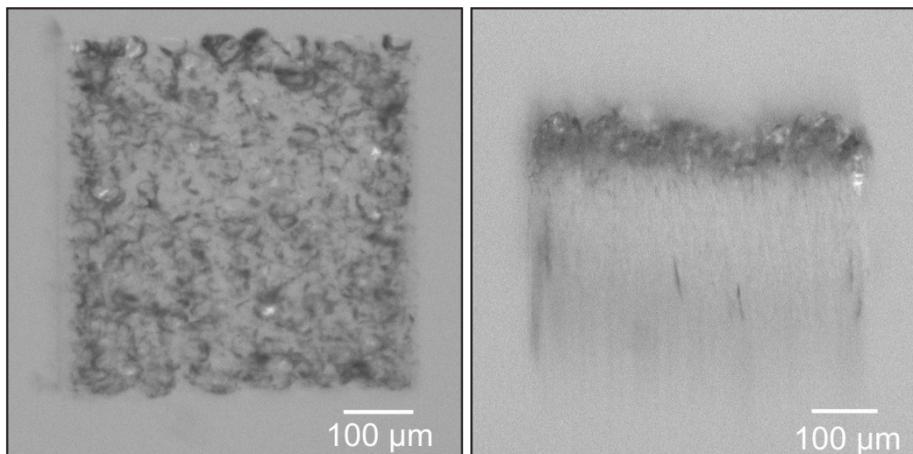


Abb. 6.2.3.3: Lichtmikroskopaufnahme von Defekten in Glas (BK9, Pulsenergie 7,6 μJ , Pulsdauer 2 ps, Pulsabstand 0,5 μm) - links: Sicht von oben, rechts: Seitenansicht

In weiteren Untersuchungen mit dem hochrepetierenden fs-Laser wurde festgestellt, dass in einem bestimmten Prozessparameterfenster Defekte in Form von schuppenartigen Materialzerstörungen generierbar waren, die sich in ihrer Morphologie gänzlich von jenen, die mit ns-Pulsen erzeugt wurden, unterschieden. Eine Aussage zur Ausdehnung der Defekte konnte nur über die axiale Richtung getroffen werden, weil keine Einzeldefekte generiert wurden, sondern eine schuppenartig zerstörte Fläche, die keine messbare Abgrenzung zuließ. Die

axiale Defektausdehnung betrug ca. 80 - 100 μm und mündete in einen stark brechzahlmodifizierten Bereich in tieferen Materialgebieten, s. Abb. 6.2.3.3. Die Entstehung

der schuppenförmigen Materialzerstörung hing stark von den applizierten Prozessparametern Repetitionsrate, Pulsenergie, Pulsdauer sowie der Pulsdistanz ab. Zwingend erforderlich waren sehr kleine Pulsdistanzen im einstelligen μm -Bereich, die nur einen Bruchteil des Strahlfleckdurchmessers betrug. Unterhalb einer Repetitionsrate von 500 kHz, also ab einem zeitlichen Pulsabstand größer $2\mu\text{s}$, ließen sich auch bei maximaler Pulsenergie von ca. 7 μJ und variiertes Pulsdauer zwischen 250 fs und 3 ps nur Materialmodifikationen, die sich nach außen als Brechzahlveränderung äußerten, aber keine Defekte generieren. Ursache für die Bildung dieser lateralen flächigen Zerstörungen im Material sollten demnach thermische Akkumulationseffekte sein, weil die Zeit von maximal 2 μs zwischen zwei aufeinander folgenden fast am selben Ort auftreffenden Pulsen im Bereich der Wärmediffusionszeit von Glas liegt. Ein Einfluss der Pulsdauer konnte nicht eindeutig zugeordnet werden, weil die Ergebnisse bei verschiedenen Pulsdauern über längere Zeitintervalle nicht exakt reproduzierbar waren. Die Pulsdauerbestimmung erfolgte indirekt über Autokorrelation ohne Darstellung des tatsächlichen zeitlichen Pulsverlaufs, sodass der exakte Pulsverlauf für die Bewertung der Ergebnisse nicht herangezogen werden konnte. Es könnte sein, dass sich laserspezifische spektrale Schwankungen auf den zeitlichen Pulsverlauf bzw. dessen spektrale zeitliche Verteilung und damit verbunden auch auf die applizierte Pulsspitzenleistung auswirkten und damit den Einfluss der Pulsdauer an sich verzerrten.

Resümierend kann festgestellt werden, dass mit den verfügbaren fs-Laserquellen und den applizierten Parametern nur flächige Materialzerstörungen hoher Rauheit entstanden, die für den 3D Lasermikroschneidprozess von Glas nur bedingt geeignet waren.

Kunststoff

Untersuchungen mit hochfokussierter fs-Laserstrahlung (Brennweite 15 mm) am Kunststoff PMMA ergaben, dass ab einer Pulsenergie von 2 μJ lichtmikroskopisch sichtbare Wirkungen im Materialinnern erzeugt wurden. Jedoch gelang es auch mit der maximal zur Verfügung stehenden Pulsenergie von mehr als 7 μJ nicht, mit jedem Puls reproduzierbar eine Wirkung zu erzeugen. Mit einer Bestrahlung mit Puls-Bursts mit mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen konnte eine 100%ige Reproduzierbarkeit erzielt werden. Die Wirkungen erschienen ähnlich wie bei den Untersuchungen mit ns-Pulsen in PMMA lateral als ca. 5 μm große Löcher, vgl. Abb. 6.2.3.4. In axialer Richtung bildeten sich Filamente ähnlich wie im Glas. Die Defektabmessung ließ sich nur schwierig erfassen und lag bei optimalen Parametern im Bereich von 50 μm - 100 μm . Auch hier galt, dass die optimalen Abstände der Defekte für die Schnittflächenerzeugung im Bereich ihrer Abmessungen liegen müssen. Dabei sollte eine Pulsenergie von 4 μJ nicht überschritten werden, um unkontrollierbare Rissbildung oder sogar partielle Schmelzbildung zu vermeiden.

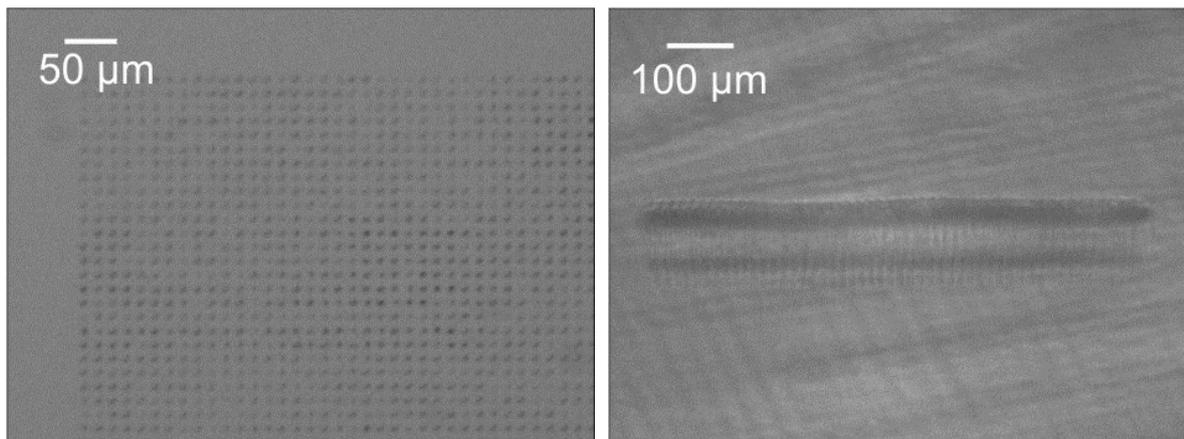


Abb. 6.2.3.4: Lichtmikroskopaufnahme von Defekten in PMMA (Pulsenergie 2 µJ, Burst mit 5 Pulsen, Pulsabstand 15 µm) - links: Sicht von oben, rechts: Seitenansicht

Untersuchungen an „clinical grade“ PMMA, also PMMA für klinische Anwendung, führten zu den gleichen Ergebnissen.

Weitere Untersuchungen an den Kunststoffen Polycarbonat (PC) und Cyclo-Olefin-Copolymere (COC) lieferten ebenfalls laterale Ausdehnungen der Einzeldefekte von ca. 5 µm. In axialer Richtung waren die Abmessungen nur schwer bestimmbar und lagen zwischen 50 µm und 300 µm. Im Gegensatz zu PMMA war eine Schwarzfärbung im bestrahlten Gebiet zu erkennen, die auf herausgelösten Kohlenstoff hindeutete. Dieser Kohlenstoff sollte durch das laserinduzierte Aufbrechen von Bindungen entstanden sein. Prinzipiell sind die C-C- und C-O-Bindungen aufgrund ihrer nahe beieinander liegenden Bindungsenergien gleichwertig hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit für das Aufbrechen. Verantwortlich dafür, ob eine Schwarzfärbung eintritt oder nicht, ist das Verhältnis zwischen freigesetzten Kohlenstoff und Sauerstoff im Material – Sauerstoffüberschuss ermöglicht eine vollständige Umsetzung zu CO₂, Sauerstoffmangel bedeutet, dass Kohlenstoff zurück bleibt. Weil der Sauerstoffgehalt in PC viel geringer als in PMMA ist und in COC gar kein Sauerstoff vorhanden ist, zeigten diese beiden Kunststoffe im Gegensatz zu PMMA eine Schwarzfärbung im bestrahlten Gebiet. Dieser Effekt war für das 3D Schneiden der transparenten Materialien sehr ungünstig, sodass keine weiteren Untersuchungen mit PC und COC erfolgten.

Aus den Untersuchungsergebnissen konnte geschlossen werden, dass laserinduzierte Wirkungen in Form von Einzeldefekten in Gläsern und transparenter Keramik mit der Kurzpuls-Laserquelle mit Nanosekundenpulsen und in Kunststoffen mit der Ultrakurzpuls-Laserquelle mit Femtosekundenpulsen im Burst-Regime reproduzierbar erzeugt werden können.

Entwicklung von Verfahrensstrategien zur Erzeugung von Schnittflächen im transparenten Material - Herausschneiden von 3D Körpern

Um unter Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse zur Erzeugung von Mikrodefekten im Material definierte 3D Körper herausarbeiten zu können, war zunächst die Erzeugung von Schnittflächen zu untersuchen. Wie bereits erwähnt, mussten die Abstände der Defekte innerhalb der gesamten Schnittfläche im Bereich der jeweiligen Einzeldefektanmessungen liegen. Erschwerend kam hinzu, dass dabei zwischen der lateralen und der axialen Richtung zu unterscheiden war.

Um den zu generierenden 3D Körper wurde eine Schnitthülle gelegt, die wiederum aus einer Anordnung von Einzeldefekten bestand. Prinzipiell muss der Körper beginnend von seiner Unterseite entgegen der Laserstrahlausbreitungsrichtung hin zu seiner Oberseite schichtweise (Layer-by-Layer-Regime) ausgeschnitten werden, weil der Laserstrahl auf dem Weg im transparenten Material bis zur jeweils vorgesehenen Position des zu erzeugenden Defekts kein bereits mit Defekten zerstörtes Material optisch verzerrungsfrei passieren kann. Die Schichtdicke wurde an die axiale Abmessung der Einzeldefekte angepasst. In jeder Schicht beschrieb der Laserbestrahlungspfad die jeweilige Außenkonturlinie des 3D Körpers. Die dreidimensionale Bearbeitung des transparenten Materials erfolgte dabei so, dass die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Material entweder durch einen bewegten Laserstrahl (Laserscanner) und/oder durch eine Bewegung des Materialblocks realisiert wurde. Zusätzlich zur Schnitthülle waren Freischnittflächen notwendig, um den 3D Körper nach dem Laserprozess aus dem Materialblock herauslösen zu können.

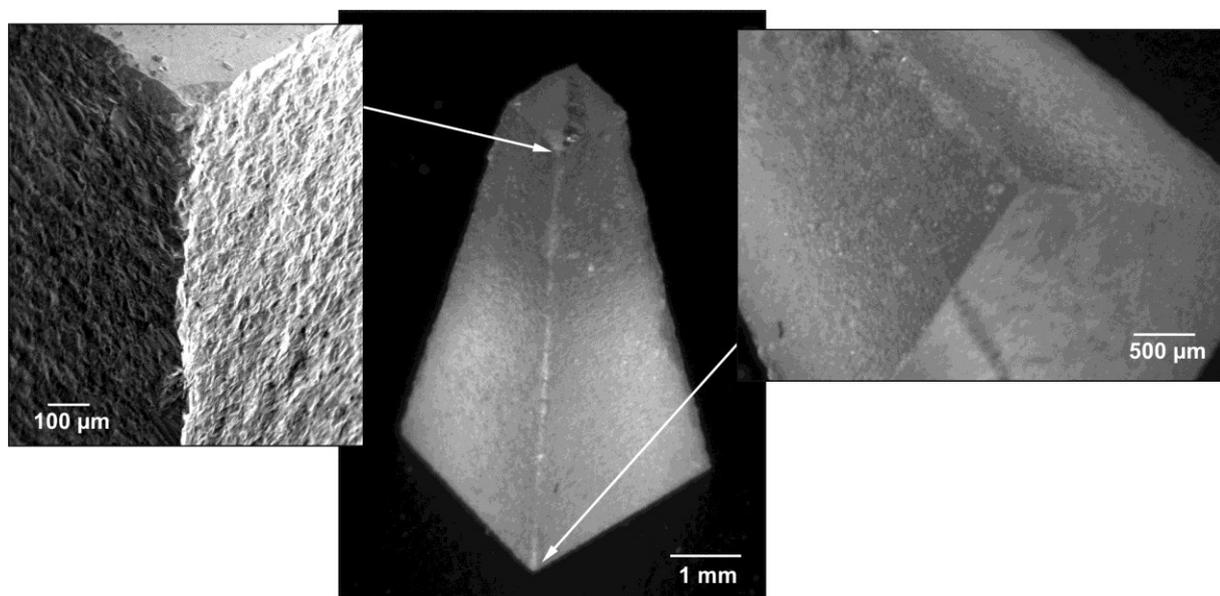


Abb. 6.2.3.5: Pyramidenstumpf aus BK7, links: REM-Aufnahme – Detailansicht der oberen Ecke, Mitte: Lichtmikroskopaufnahme (Übersicht), rechts: Lichtmikroskopaufnahme der unteren Ecke (Parameter: Pulsenergie 100 µJ, Pulsdauer 6 ns, lateraler Defektanstand 50 µm, axialer Defektanstand 75 µm)

Die Laserpfade für das Erzeugen geometrisch einfacher 3D Körper wie beispielsweise Würfel, Quader, Zylinder, Pyramiden oder Kegel ließen sich durch manuelle Programmierung des Bewegungssystems der Laseranlage realisieren, s. Abb. 6.2.3.5. Komplexere 3D Formen erforderten Software-Unterstützung durch CAD-CAM-Module. Das angeschaffte CAD-CAM-Modul „DCAM“ erlaubte die Konstruktion von 3D Formen als auch das Einlesen von CAD-Dateien von 3D Körpern aus anderen Quellen. Mit speziellen Tools wurde der 3D Körper in Schichten mit konstantem Abstand zerlegt („gesliced“) und aus den Konturen Laserpfade mit bestimmten diskreten Weginkrementen generiert, die an die zu realisierenden Abstände zwischen den Einzeldefekten angepasst waren. Mit Hilfe von speziell für die jeweilige Laseranlage entwickelten und selbst angepassten Postprozessoren konnten die Laserpfadinformationen in einem Schritt in ein für die betreffende Anlage verständliches Bearbeitungsprogramm umgesetzt und ausgegeben werden. Der Laserprozess wurde vollständig vom automatisch ablaufenden Bearbeitungsprogramm gesteuert.

Mit dem beschriebenen Prozessablauf wurden aus den verschiedenen Materialien 3D Körper herausgearbeitet. Die erzielte Qualität wurde dabei durch Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie durch Rauheitsmessung mit Hilfe der angeschafften optischen Messtechnik charakterisiert. Die Schnittflächen in Glas und Keramik waren frei von Rissen und zeigten eine typische Struktur, die man von abgesprengtem Material kennt. Die mit optimalen Prozessparametern erzielten minimalen Rauheitswerte lagen für die maximale Rauheit bei $6,5\ \mu\text{m}$, wobei der in der Norm EN ISO 25178 definierte flächenbezogene quadratische Mittelrauwert von $3,2\ \mu\text{m}$ repräsentativer erscheint. In Kunststoff konnten bedingt durch die viel kleineren lateralen Defektanmessungen im Vergleich zu Glas und Keramik deutlich geringere Rauheitswerte erreicht werden – die maximale Rauheit betrug $4,5\ \mu\text{m}$ und der flächenbezogene quadratische Mittelrauwert $1,5\ \mu\text{m}$.

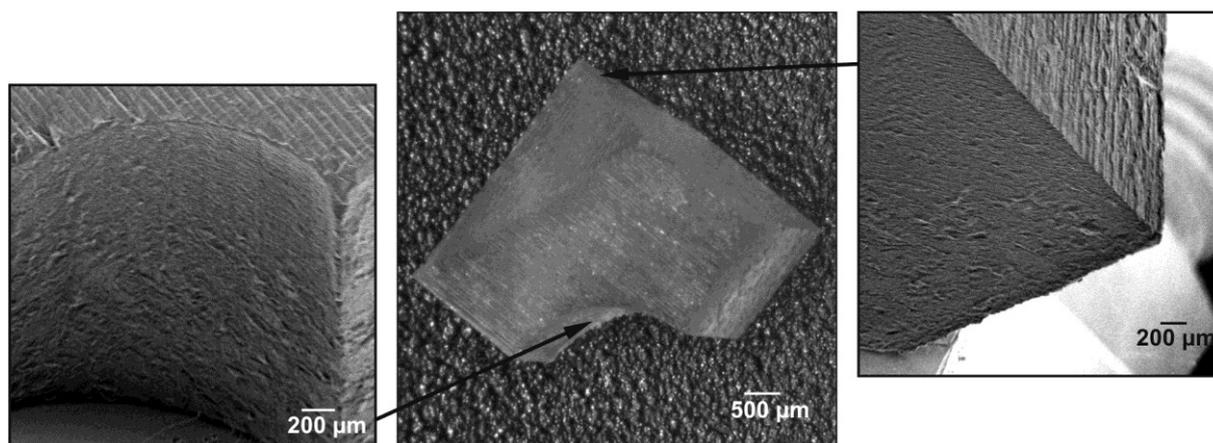


Abb. 6.2.3.6: REM-Aufnahmen (Details links und rechts) und Lichtmikroskopaufnahme (Mitte) einer Demonstratorstruktur aus PMMA, die mit CAD-CAM-Unterstützung hergestellt wurde (Parameter: Pulsenergie $2\ \mu\text{J}$, Pulsdauer $180\ \text{fs}$, Burst mit 5 Pulsen, lateraler Defektabstand $2,5\ \mu\text{m}$, axialer Defektabstand $30\ \mu\text{m}$)

Neben geometrisch einfachen Körpern konnten mit dem CAD-CAM-Support auch komplexe und gekrümmte Formen wie z.B. Tetraeder oder auch Körper, die aus verschiedenen geometrischen Formen zusammengesetzt waren, generiert und aus dem Volumenmaterial herausgelöst werden. Anhand einer Demonstratorstruktur aus Kunststoff (s. Abb. 6.2.3.6) wurde gezeigt, dass sich mit diesem Verfahren auch hinterschnittene Konturen problemlos herstellen lassen. Die Abmessungen der Demonstratorstruktur wichen nur maximal $50\ \mu\text{m}$ von den vorgegebenen Werten ab.

Es stellte sich heraus, dass die Generierung von gekrümmten Oberflächen höhere Anforderungen an das Bestrahlungsregime stellt, um vergleichbare Oberflächenqualitäten zu erzielen. Am Beispiel einer Kugel, die in Schichten mit konstantem Abstand zerlegt wurde, zeigte sich eine zunehmend geringere Auflösung hin zu den Polkappen im Vergleich zum Äquator bedingt durch die zunehmend größer werdenden Abstände in lateraler Richtung, s. Abb. 6.2.3.7 linkes Bild. Mit einem völlig anderen Ansatz, der einen konstanten Abstand der Einzeldefekte auf der Oberfläche des 3D Körpers als Ausgangsbasis hatte, wurde die Kugel mit Hilfe einfacher analytischer Berechnungen in Schichten mit angepasstem Schichtabstand zerlegt. Der Schichtabstand entsprach dabei in Äquatornähe den axialen Defektabmessungen und nahm zu den Polkappen hin ab. Die mit diesem Algorithmus generierte Kugel besaß eine homogene Oberflächenqualität entlang ihrer ganzen Hülle, s. Abb. 6.2.3.7 rechtes Bild.

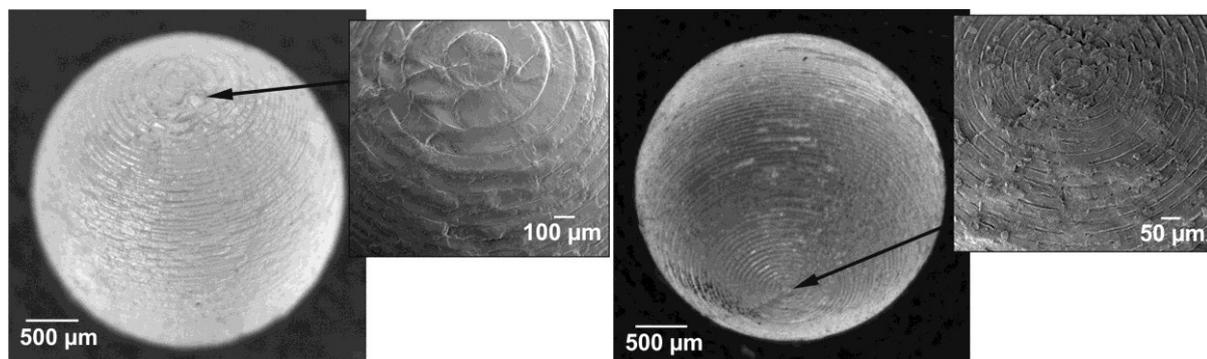


Abb. 6.2.3.7: Kugel (Radius $1.5\ \text{mm}$) aus PMMA, links: mit konstantem Schichtabstand und dadurch geringerer lateraler Auflösung an den Polkappen, rechts: mit konstantem Defektabstand auf der Oberfläche (variabler Schichtabstand) und somit homogener Auflösung auf der gesamten Oberfläche (Parameter: Pulsenergie $2\ \mu\text{J}$, Pulsdauer $180\ \text{fs}$, Burst mit 5 Pulsen, lateraler Defektabstand $2.5\ \mu\text{m}$, axialer Defektabstand $50\ \mu\text{m}$)

Eine Übertragung dieser Bestrahlungsstrategie auf beliebig frei geformte 3D Körper bedingt aber den Einsatz speziell dafür entwickelter CAD-CAM-Softwaremodule. Die im Rahmen des Projektes angeschaffte CAD-CAM-Software DCAM lieferte für Problemstellungen mit konstantem Schichtabstand einwandfrei funktionierende Abarbeitungsalgorithmen für die Laserbearbeitung. Angepasste nicht konstante Schichtabstände könnte man realisieren, indem die Hülle des 3D Teils in eine sogenannte Punktwolke (spätere Position der einzelnen Mikrodefekte) zerlegt wird, bei der die einzelnen Punkte einen gleichmäßigen mittleren Abstand

zueinander aufweisen müssen. Hier bestand jedoch die Schwierigkeit, dass neben dem zu berücksichtigenden Brechzahleinfluss in axialer Richtung die experimentellen Untersuchungen außerdem ergaben, dass die axiale Defektgröße von jener in lateraler Richtung deutlich abweicht und deshalb mit in die Berechnung der Punktwolke einfließen müsste. Im Anschluss wäre ein Bearbeitungspfad zu generieren, der alle Punkte einzeln anfährt und dort einen Laserpuls bzw. Burst auslöst (Punkt-zu-Punkt-Bearbeitung). Genutzt wird eine ähnliche Bearbeitungsstrategie bisher nur für die Erzeugung von 3D Bildern in Glas, wobei hier der Punktabstand aber nicht so genau eingehalten werden muss.

Mit der vorhandenen Software DCAM gelang die Nutzung der Punktwolke zum Schneiden von 3D Körpern noch nicht.

Das Herauslösen des 3D Körpers aus dem Materialblock wurde durch zusätzlich eingebrachte Freischnitte erleichtert bzw. überhaupt erst ermöglicht. Das Separieren von Körpern aus Kunststoffblöcken erfolgte durch sukzessives mechanisches Freilegen. Bei Glas und Keramik hingegen war das Herauslösen des 3D Körpers auch mit verschiedenen Freischnittregimes sehr schwierig und gelang insbesondere bei Körpern mit nicht ebenen Außenflächen häufig nur zufällig. Um den Separierungsvorgang in Glas zu erleichtern, wurden zwei Hilfsttechnologien untersucht:

- Kältebehandlung (Absprengen mit Eisbildung)
- Wärmebehandlung mit Abschreckung (thermischer Schock).

Für die Kältebehandlung wurde der Glasblock mit einem eingeschriebenen 3D Körper und entsprechenden Freischnitten, die bis zur Glasblockoberfläche reichten, zunächst in Wasser gelegt und angenommen, dass sich die generierten Schnittflächen über die Kapillarwirkung mit Wasser voll saugen würden. Anschließend wurde der Block über mehrere Stunden tiefgekühlt. Durch das größere Volumen des Eises sollte das Material um den 3D-Körper abgelöst werden. Dies gelang jedoch nicht, weil offensichtlich kein bzw. zu wenig Wasser in den Glasblock eingedrungen war.

Ein anderer Ansatz war das Auslösen eines thermischen Schocks, der ein Auseinanderfallen des Blocks durch ein weiteres Reißen an den bereits eingebrachten Schnittflächen bewirken sollte. Dazu wurde der Glasblock in einem Ofen bis unterhalb der jeweiligen Erweichungstemperatur (400°C-500°C) erhitzt, anschließend im kalten Wasser abgeschreckt und mit Ultraschall nachbehandelt. Die Wirkung war aber undefiniert und führte zum Teil zum Zerschlagen des 3D Körpers - das Herauslösen wurde nicht erleichtert.

Chemische Nachbehandlung zur Verbesserung der Oberflächenqualität der Schnittflächen

Zur Verbesserung der Oberflächenqualität wurden Untersuchungen zum nachträglichen Ätzen von ausgeschnittenen Quadern aus BK 7 mit der Zielstellung durchgeführt, die Rauheit der Schnittflächen zu reduzieren. Für die Ätzversuche wurde eine 20%ige Flußsäurelösung eingesetzt. Mit verschiedenen untersuchten Ätzregimes mit einer maximalen Ätzzeit von 5 min erschien die Oberfläche im Lichtmikroskop glatter. Anschließende Rauheitsmessungen an verschiedenen Stellen an der Oberfläche ergaben jedoch einen unerwarteten Anstieg der

Rauheitswerte, wobei unterschiedliche Ätzregimes keinen messbaren Einfluss auf die Rauheit gezeigt haben. Die maximale Rauheit hat sich nahezu verdreifacht auf $17,8\ \mu\text{m}$, der quadratische Mittelrauwert um Faktor 2,5 auf $6,9\ \mu\text{m}$ erhöht. Offensichtlich führte die Bearbeitung zur unregelmäßigen Aufrauung durch partielles selektives Ätzen an den Oberflächenstrukturen, bevorzugt an den aufgeschmolzenen Bereichen. Die REM-Aufnahmen in Abb. 6.2.3.8 bestätigen die gemessenen größeren Rauheitswerte gegenüber dem ungeätzten Zustand.

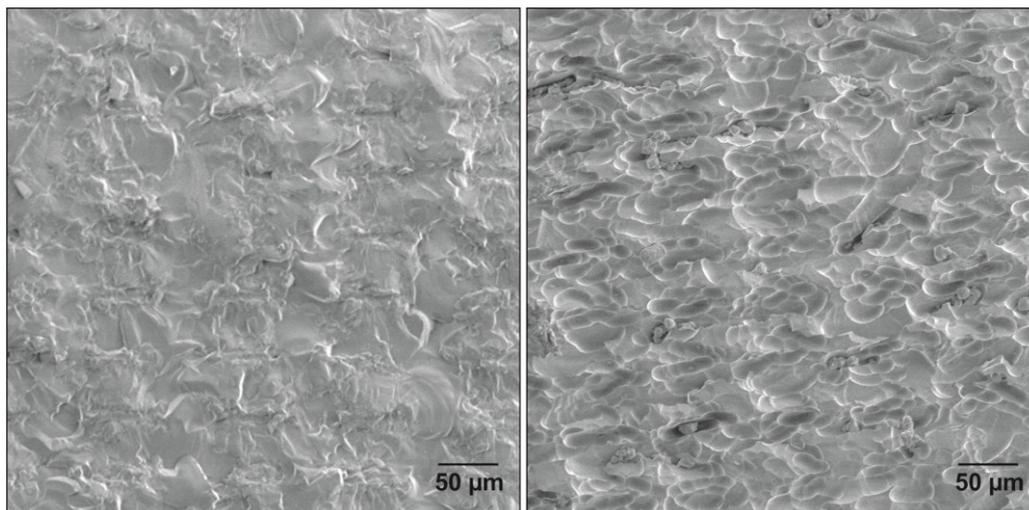


Abb. 6.2.3.8: REM-Aufnahmen einer Schnittfläche, links: vor dem Ätzen, rechts: nach dem Ätzen

AP 2.2 2D Hochleistungsschneiden

Flachglas

Die ersten Untersuchungen zum laserinduzierten Spannungsrisstrennen bei hohen Ablenkgeschwindigkeiten fanden an Kalk-Natron-Flachglas statt. Das Material wurde mit einer Laserleistung von 2.620 W (entspricht bei der eingesetzten Brennweite von 230 mm und dem damit erzielten Fokusbereich von $21\ \mu\text{m}$ einer Spitzenintensität von $1,5\ \text{GW}/\text{cm}^2$) beaufschlagt. Zunächst lag der Laserstrahlfokus auf der Materialoberseite. Bereits während der ersten Bestrahlung wurde selbst bei der höchstmöglichen Ablenkgeschwindigkeit des Galvo-Scanners von 900 m/min an der Oberfläche Material geschmolzen und teilweise verdampft, s. Abb. 6.2.3.9 linkes Bild. Trotz der hohen Transparenz des Materials gegenüber der eingestrahelten Wellenlänge von 1.070 nm wurde die Laserstrahlung an der Oberfläche u.a. durch Gefügestörungen, veränderten Bindungszuständen oder Verunreinigungen absorbiert.

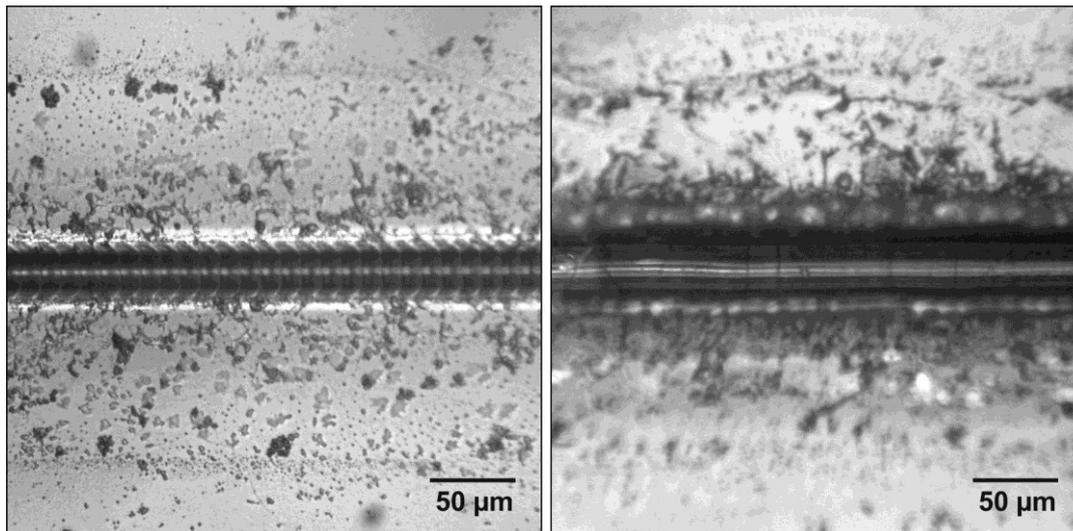


Abb. 6.2.3.9: Abtragspur in Kalk-Natron-Flachglas, links: 1 Bestrahlung, rechts: 5 Bestrahlungen, Bildebene auf Boden (Parameter: Laserleistung 2.640 W, Ablenkgeschwindigkeit 900 m/min)

Bemerkenswert war die regelmäßig geschuppte Bodenstruktur des Abtrags, obwohl der Laser im kontinuierlichen Betrieb arbeitete. Offensichtlich liefen periodische Schmelz- und Erstarrungsvorgänge ab, die zu dieser Struktur führten. Neben dem 35 µm breiten Abtraggraben war zu beiden Seiten ein ca. 70 µm breiter Saum erkennbar. Außerdem bildeten sich Schmelzablagerungen und Redeposite. Mit zunehmender Anzahl an Bestrahlungen nahm die regelmäßige Strukturbildung ab und die Abtragtiefe stieg. Zusätzlich traten Risse bzw. teilweise abgeplatzte Materialbestandteile an den Grabenrändern und auch im Graben auf, die vorzugsweise quer zur Grabenrichtung verliefen (vgl. Abb. 6.2.3.9 rechtes Bild). Eine Verlagerung der Fokusslage in die Materialmitte führte zu vergleichbaren Ergebnissen. Ein Brechen der Glasplatte an diesen grabenförmigen Vertiefungen war möglich.

Um ein noch schnelleres Aufheizen und Abkühlen und in der Folge Spannungsrisse zu initiieren, wurde der Laserstrahl mit dem Polygonspiegelscanner mit wesentlich höheren Geschwindigkeiten von bis zu 24.000 m/min über das Material geführt. Im Glas konnte keine Wirkung mehr festgestellt werden. Möglicherweise laserinduzierte Spannungen führten nicht zum Trennen des Materials.

Silizium-Pyrexglas-Verbund

Silizium-Pyrexglas-Verbund stellt eine für die Mikrosystemtechnik bedeutende Materialkombination dar. Die Verbindung von Silizium mit Pyrexglas wird durch anodisches Bonden erreicht. Der Einphotonen-Absorptionskoeffizient für Silizium (Wellenlänge 1070 nm) liegt mit zwar nur 25 cm^{-1} bei Raumtemperatur dennoch um mehr als 4 Größenordnungen höher im Vergleich zu Pyrexglas. Um Spannungsrisse zu induzieren, wurde der Laserstrahlfokus (Durchmesser 21µm) auf die Grenzfläche Silizium/Pyrexglas gelegt. Die an der Siliziumoberfläche absorbierte Energie sollte das Silizium erwärmen bzw. verdampfen und somit durch die thermische Ausdehnung bzw. die Expansion des Dampfes Spannungsrisse entlang

der Laserspur generieren. In den Untersuchungen wurden die Parameter Laserleistung und Anzahl an wiederholten Bestrahlungen variiert. Die Strahlableitgeschwindigkeit betrug 2.220 m/min. Bereits mit einer applizierten Laserleistung von 260 W konnte mit einer Bestrahlung eine Wirkung an der Grenzfläche erzielt werden. In der lichtmikroskopischen Übersichtsaufnahme in Abb. 6.2.3.10 links kann man eine ca. 25 μm breite Veränderung im Glas erkennen, die im Bereich der Grenzfläche lokalisiert ist.

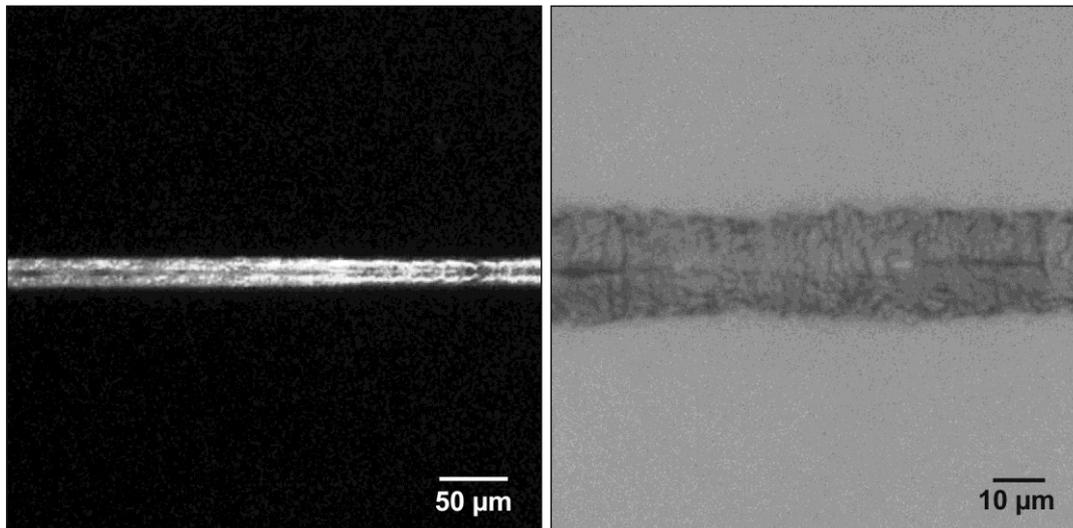


Abb. 6.2.3.10: *bestrahlter Bereich im Silizium-Pyrex-Verbund, links: lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme, rechts: Detailaufnahme mit geschmolzener Siliziumspur (Parameter: Laserleistung 260 W, Ablenkgeschwindigkeit 2.220 m/min, 1 Bestrahlung)*

Die Detailaufnahme in Abb. 6.2.3.10 rechts dokumentiert eine aufgeschmolzene und wiedererstarre Siliziumspur mit einer Breite von 20 bis 25 μm entlang des Bestrahlungspfades. Durch mehrmaliges Überfahren entstanden zunehmend Risse im bestrahlten Bereich, die aber nicht bis an die Glasoberfläche reichten.

Mit steigender Laserleistung begannen sich zunächst quer zu Strahlbewegungsrichtung kleine Risse im Pyrexglas auszubilden, die sich ab einer Laserleistung von 1 kW zunehmend schollenförmig formierten bis hin zu einem unkontrolliertem Platzen des Glases bei einer Laserleistung von 2,62 kW. Ein Trennen des Verbundmaterials durch laserinduzierte Spannungsrisse entlang des Bestrahlungspfades konnte weder mit wiederholten Bearbeitungen noch mit der höchsten verfügbaren Laserleistung erzielt werden. Auch ein Brechen entlang der bestrahlten Linie gelang nicht. Ein Grund dürfte die relativ große Dicke des Verbundes von 1 mm gewesen sein, die ein Trennen bzw. definiertes Brechen entlang der lokal begrenzten laserinduzierten Materialschädigung an der Grenzfläche verhinderte.

Keramik

Zum Spannungsrisstrennen von Al_2O_3 -Keramik mit 96%iger Reinheit und einer Dicke von 0,6 mm wurden Untersuchungen mit folgenden Parametern durchgeführt: Laserleistung bis 2,62 kW, Ablenkgeschwindigkeiten bis 1.800 m/min, Brennweite 330 mm (entspricht Fokussdurchmesser von 30 μm), Defokussierung bis 20 mm (entspricht einem Strahldurchmesser

auf der Probe von 1,18 mm) untersucht. Der Absorptionskoeffizient der Keramik liegt für die Wellenlänge 1070 nm bei etwa 10 cm^{-1} (bei Raumtemperatur) und ist mit dem von Silizium vergleichbar.

Über den gesamten Parameterbereich wurde entweder keine laserinduzierte Wirkung oder eine plötzliche unetstetige starke Laserstrahleinkopplung beobachtet. Dieser Effekt dürfte durch lokale Veränderungen der optischen Eigenschaften, insbesondere der Absorptionseigenschaften des keramischen Materials z.B. an Inhomogenitäten auftreten. Hatte die Laserstrahlung über eine längere Strecke entlang des Bestrahlungspfades in die Keramik eingekoppelt, riss die Probe komplett, wobei sich der Riss im noch unbestrahlten Bereich unkontrolliert in nicht vorhersagbare Richtung ausgebildete. Ein definiertes Spannungsrisstrennen war im untersuchten Parameterbereich nicht möglich.

Es erfolgten ergänzende Untersuchungen zum Trennen von Al_2O_3 -Keramik mittels Abtragschneiden. Dabei wurde der Laserpfad mehrmals abgearbeitet, Material abgetragen und der Abtragspalt in die Tiefe gearbeitet. Die Dicke des Materials betrug 0,7mm. Als Prozesseinflussgrößen wurden die Laserleistung bis 2.200 W, die Ablenkgeschwindigkeit zwischen 60 m/min und bis zu 13.380 m/min (Galvo- und Polygonspiegelscanner) sowie die Anzahl an Laserbestrahlungen von minimal 10 bis zu 300 bei einem Fokusbereich von 21 μm variiert. Unterhalb einer Ablenkgeschwindigkeit von etwa 60 m/min begann der Schweißprozess den Abtragprozess abzulösen.

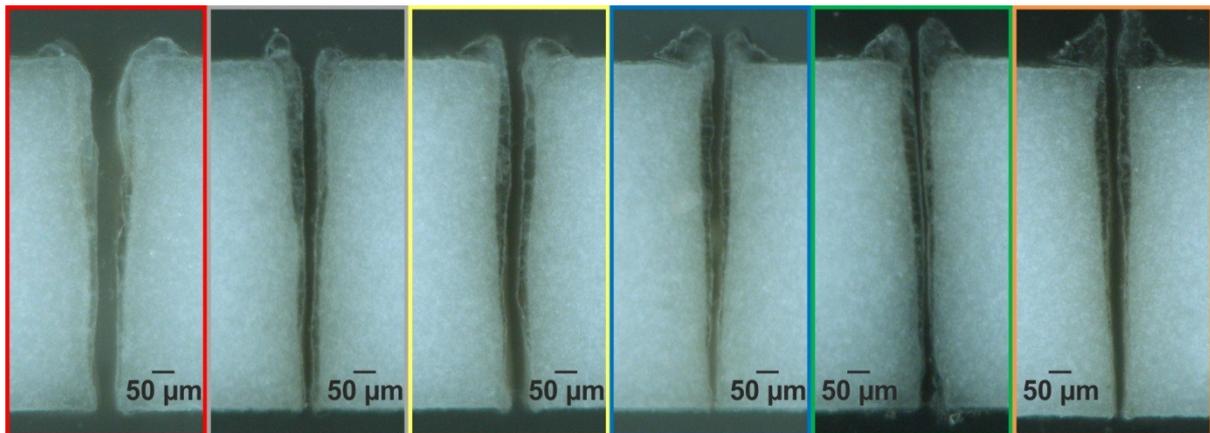
Die applizierte Laserleistung hatte einen maßgeblichen Einfluss auf die Abtragtiefe. Mit steigender Laserleistung entstanden größere Abtragtiefen. Eine steigende Anzahl an Bestrahlungen führte ebenfalls zu größeren Abtragtiefen, wobei die Zunahme der Abtragtiefe leicht degressiv mit zunehmender Anzahl an Bestrahlungen ausfiel. Mit der höchsten Laserleistung von 2.200 W auf dem Material, einer Strahlableitgeschwindigkeit von 900 m/min und 40 wiederholten Bestrahlungen ließ sich Material durchtrennen. Mit reduzierter Strahlableitgeschwindigkeit von 150 m/min konnte das Material bereits mit einer Laserleistung von 1.460 W und nur 10 Bestrahlungen getrennt werden.

Abb. 6.2.3.11 zeigt Schliffbilder von Schnittspalten in Abhängigkeit der variierten Parameter. Für die Bewertung optimaler Parameter könnte man die Schnittspaltqualität oder die Effizienz der Bearbeitung heranziehen. Bezüglich der Schnittspaltqualität wäre der Parametersatz in Spalte 2 optimal, weil die Wände eine nur geringe Welligkeit aufweisen und der Aufwurf auf der Oberseite gering ist.

Hinsichtlich der effektivsten Bearbeitung würden die Parametersätze in den Spalten 4 bzw. 6 optimale Ergebnisse liefern. Parametersatz 3 lieferte den besten Kompromiss, eine gute Qualität bei hoher effektiver Schneidgeschwindigkeit.

Mit wesentlich höheren Ablenkgeschwindigkeiten war die Streckenenergie, also die eingetragene Energie pro Weglängeneinheit, bei gleicher applizierter Laserleistung geringer. Demzufolge fielen auch die Abtragtiefen bei gleicher Anzahl an Bestrahlungen kleiner aus. Abtragspalte, die mit bis zu 40 Bestrahlungen erzeugt wurden, zeichneten sich durch nahezu

senkrechte, glatte Wände ohne Ablagerungen und verrundete Böden aus, wiesen also eine hervorragende Qualität auf.



$P = 730 \text{ W}$	$P = 730 \text{ W}$	$P = 1.460 \text{ W}$	$P = 1.460 \text{ W}$	$P = 1.460 \text{ W}$	$P = 2.200 \text{ W}$
$v = 60 \text{ m/min}$	$v = 150 \text{ m/min}$	$v = 300 \text{ m/min}$	$v = 450 \text{ m/min}$	$v = 600 \text{ m/min}$	$v = 900 \text{ m/min}$
$N = 10$	$N = 30$	$N = 20$	$N = 20$	$N = 40$	$N = 40$
$v_{\text{eff}} = 6 \text{ m/min}$	$v_{\text{eff}} = 4,8 \text{ m/min}$	$v_{\text{eff}} = 15 \text{ m/min}$	$v_{\text{eff}} = 22 \text{ m/min}$	$v_{\text{eff}} = 15 \text{ m/min}$	$v_{\text{eff}} = 22 \text{ m/min}$

Abb. 6.2.3.11: Schnittspalte bei verschiedenen Parametersätzen, P = Laserleistung, v = Ablenkgeschwindigkeit, N = Anzahl an Bestrahlungen, v_{eff} = effektive Schneidgeschwindigkeit

Analog zu den vorangegangenen Untersuchungen war auch hier eine Zunahme der Abtragtiefe mit steigender Laserleistung festzustellen. Bei konstanter Laserleistung stieg die Abtragtiefe mit zunehmender Anzahl an Bestrahlungen, wobei wie in Abb. 6.2.3.12 dargestellt der Zuwachs an Tiefe proportional zunahm, außer bei 280 Bestrahlungen, dort war die Zunahme überproportional.

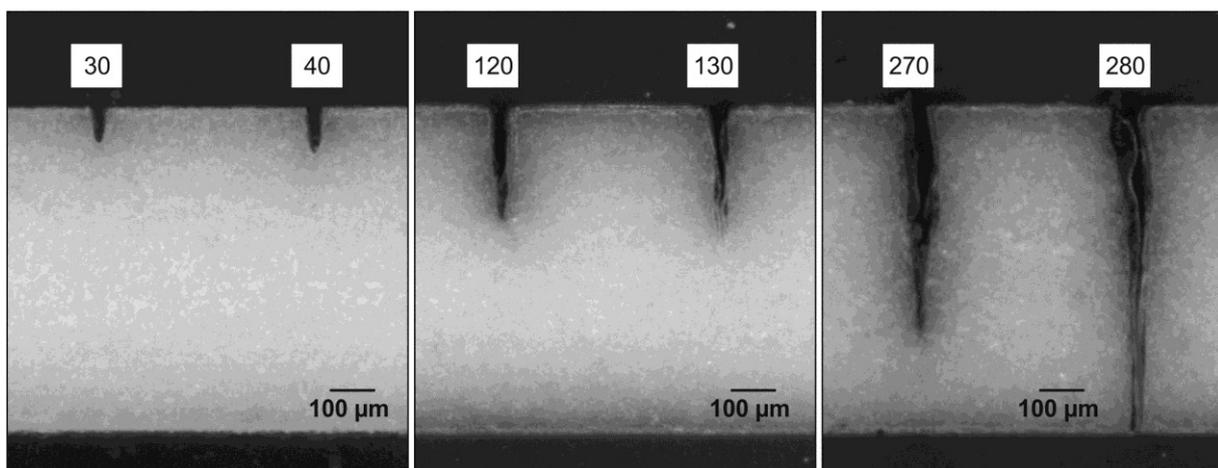


Abb. 6.2.3.12: Querschliffpräparation von Abtragspalten, die mit verschiedener Anzahl an Bestrahlungen (Wert oberhalb des jeweiligen Abtragspalts) hergestellt wurden, Parameter: Laserleistung 2.010 W, Ablenkgeschwindigkeit 2.220 m/min

Mit der Tiefe nahm allerdings die Qualität des Abtragspaltes ab – er bildete sich nicht mehr exakt senkrecht zur Oberfläche aus, sondern wich in größeren Tiefen undefiniert seitlich ab. Die Wände wurden zunehmend wellig, vornehmlich durch wiedererstartete Schmelze. Das führte soweit, dass sich die Abtragspalte durch das angelagerte Material z.T. wieder verschlossen.

Das Trennen von Al_2O_3 -Keramikplatten mit hohen Ablenkgeschwindigkeiten sollte vorrangig dann Anwendung finden, wenn dünnere Materialstärken zu bearbeiten sind oder das Plattenmaterial nicht durchgeschnitten werden muss.

Sehr gute Ergebnisse zum Trennen von dickerem Material wurden durch Ritzen und anschließendes Brechen entlang eines mittels Abtragschneiden hergestellten Ritzgrabens erzielt. Eine Grabentiefe von 25-30% der Materialdicke war besonders gut geeignet. Unter Beachtung der für die vorhandenen Substrate erforderlichen Ritztiefe von $175\ \mu\text{m}$ bis $210\ \mu\text{m}$ boten sich verschiedene Parametersätze für die Erzeugung der Gräben an, jedoch waren die höherwertigen Wandqualitäten der Gräben nur mit einer geringen Anzahl an Bestrahlungen erreichbar. Mit einer Laserleistung von $2.010\ \text{W}$, einer Ablenkgeschwindigkeit von $2.220\ \text{m/min}$ und 30 Bestrahlungen und damit einer effektiven Geschwindigkeit von $74\ \text{m/min}$ wurde eine Ritztiefe von $180\ \mu\text{m}$ erreicht. Sämtliche untersuchte Proben brachen wie beabsichtigt entlang der Ritzlinie. Die Bruchkanten folgten der Ritzlinie und waren verhältnismäßig glatt. Abb. 6.2.3.13 zeigt eine REM-Aufnahme der Bruchkante. Die Ritztiefe von mindestens $180\ \mu\text{m}$ ist deutlich zu erkennen. Die Randzone an der Oberseite der Keramik wies Mikrorisse auf. Die Porenverteilung in größerer Ritztiefe glich jener im unbearbeiteten gebrochenen Teil der Probe, so dass durch die Laserbearbeitung im Ritzgraben keine weiteren Poren erzeugt wurden.

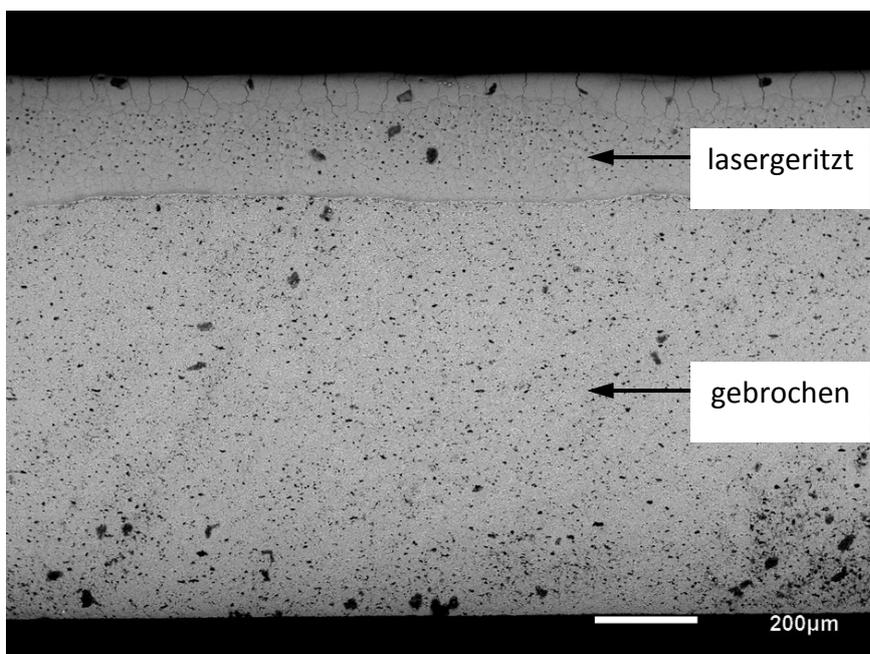


Abb. 6.2.3.13: REM-Aufnahme der Bruchkante einer geritzten und gebrochenen Al_2O_3 -Keramik

Metallfolien

In weiteren Untersuchungen wurde das Trennen von dünnen Edelstahlfolien mit hohen Schneidgeschwindigkeiten betrachtet. Die prozessbeeinflussenden Parameter Laserleistung und Ablenkgeschwindigkeit wurden zwischen 440 und 1.740 W und zwischen 300 und 1320 m/min variiert. Der Laserstrahl wurde mit einer Brennweite von 330 mm auf einen Durchmesser von 30 μm fokussiert.

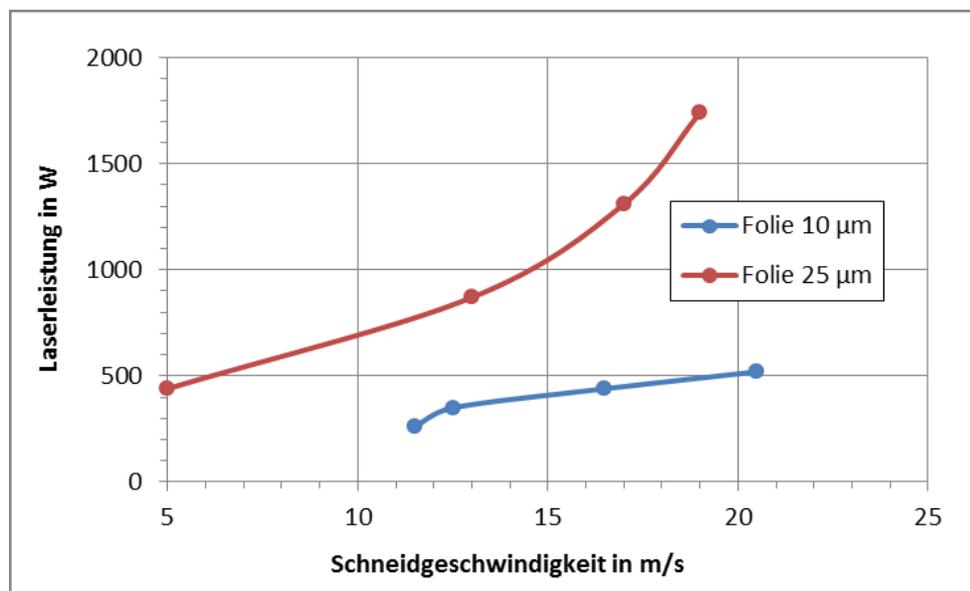


Abb. 6.2.3.14: Parameterkombinationen für das Durchschneiden dünner Edelstahlfolien

Die Proben wurden mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopie untersucht. In Abb. 6.2.3.14 sind die Parameterkombinationen dargestellt, die ein Durchtrennen des Materials bei einer Stärke von 10 μm bzw. 25 μm bei jeweils höchstmöglicher Schneidgeschwindigkeit und geringster applizierter Laserleistung ermöglichten. Wie erwartet war für die dickere Folie bei gleicher Schneidgeschwindigkeit mehr Laserleistung zum Trennen nötig. Bei ihr stieg der Leistungsbedarf exponentiell mit der Schneidgeschwindigkeit an, so dass mit einer verfügbaren Laserleistung von 2 kW Maximalgeschwindigkeiten von 1.200 m/min erreichbar wären. Bei der dünnen Folie hingegen war nur ein leichter Anstieg der Leistung mit der Geschwindigkeit zu verzeichnen. Trenngeschwindigkeiten bis 6.000 m/min sollten mit einer Laserleistung von 2 kW möglich sein.

Die Schnittspalte waren von jeweils ca. 50 μm breiten Schmelzrändern begrenzt, s. Abb. 6.2.3.15 links, die Breite betrug 25-30 μm . War die für die jeweilige Schneidgeschwindigkeit minimal erforderliche Laserleistung und damit verbundene Intensität zum Durchtrennen unterschritten, dann verblieb die Schmelze aufgrund ihrer Viskosität teilweise im Schnittspalt und erstarrte dort - der Schnitt war unterbrochen (Abb. 6.2.3.15 rechts). Mit solchen Parametern können gezielt Mikroperforationen hergestellt werden

Weiterhin wurde untersucht, wie dicht Schnittspalte gelegt werden können, ohne dass der verbleibende Steg zerstört wird. Der minimal erzielbare Schnittspaltabstand in einer 10 μm dicken Folie betrug 100 μm . Wie Abb. 6.2.3.16 zeigt, hatte der verbleibende etwas aus der

Folienebene hervorgetretene Steg eine Breite von ca. 60 μm . Dies zeugte von einer geringen thermischen Beeinflussung des Randbereiches.

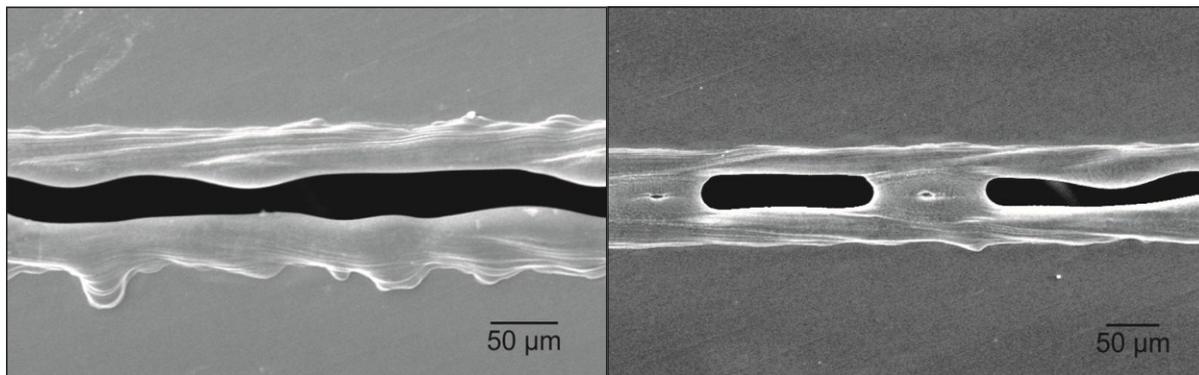


Abb. 6.2.3.15: Schnittspalt einer vollständig durchtrennten (links) und einer perforierten (rechts) 25 μm dicken Edelstahlfolie, Parameter: Laserleistung 440 W, Schneidgeschwindigkeit 300 m/min

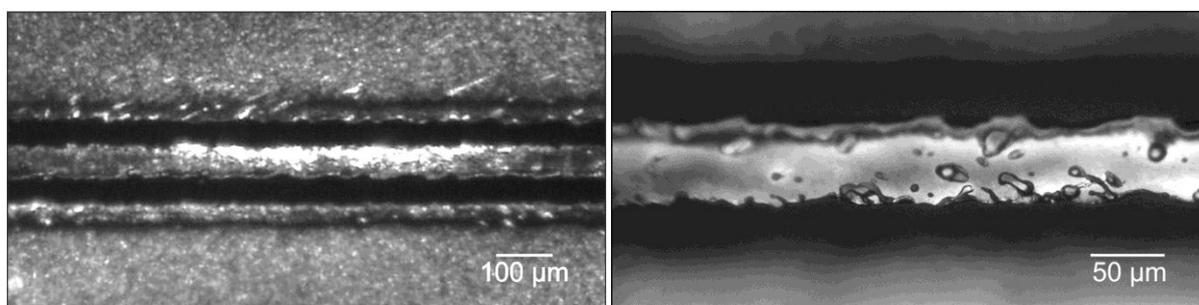


Abb. 6.2.3.16: zwei nebeneinanderliegende Schnittspalte mit einem Abstand von 100 μm in 10 μm dicker Edelstahlfolie, links: Übersichtsaufnahme, rechts: vergrößerter Ausschnitt des Stegs, Parameter: Laserleistung 520 W, Schneidgeschwindigkeit 1.230 m/min

Zusammenfassung

Es wurde eine neuartige Rapid Microtooling Technologie erfolgreich entwickelt. Mit ihr können mikrostrukturierte Kleinteile aus für die Laserstrahlung transparenten Materialien schnell und flexibel erzeugt werden. Insbesondere mit PMMA wurde bereits eine sehr gute Oberflächenqualität erzielt. Teile aus PMMA können sowohl als mikrostrukturierte Kleinteile als auch als verlorene Form für den Mikrospritzguss eingesetzt werden.

Die Untersuchungen zum Trennen mit cw-Laserstrahlung und Scanner zeigten, dass sich Al_2O_3 -Keramiken bis zu einer Dicke von 0,7 mm mit einer hohen effektiven Geschwindigkeit von 15 m/min bei guter Qualität in beliebiger Kontur trennen ließen. Mit höherer Ablenkgeschwindigkeit konnten dünne Substrate bis zu einer Dicke von 100 μm in hoher Qualität gerade getrennt werden, ebenso dickere Substrate durch Ritzen und Brechen. Dünne Metallfolien ließen sich in Abhängigkeit von der Dicke mit Geschwindigkeiten von mehr als 1.000 m/min in beliebiger Kontur trennen. Die Erzeugung einer Mikroschlitz-Perforation mit cw-Strahlung konnte gezeigt werden.

6.3 Arbeitspaket 3 – Mikropulverauftragschweißen (Micro Cladding)

6.3.1 Ziel des Arbeitspaketes

AP 3.1 Mikropulverauftragschweißen

Es war ein neuartiger Versuchstand für das Mikropulverauftragschweißen aufzubauen, bei dem erstmalig ein gepulster ns-Laser mit den notwendigen optischen Komponenten für das Verfahren verwendet werden sollte. Weiterhin sollten ein Roboter, ein Pulverförderer und eine Steuerung, welche alle Komponenten miteinander verknüpft, integriert werden. Im Weiteren sollte ein Bearbeitungskopf mit Mikropulverdüse entworfen, gebaut, getestet und kontinuierlich weiterentwickelt werden. Letztendlich sollte der Nutzer des Versuchstandes vor der Laserstrahlung und dem gefährlichen feinen Pulver geschützt werden.

Mit Hilfe des neuen Versuchstandes sollten grundlegende Parameterfelder für das neue Verfahren Mikropulverauftragschweißen (Micro Cladding) gefunden werden, welches durch Kombination des klassischen Pulverauftragschweißens (Pulverzufuhr, Relativbewegung Laserstrahlfokus) mit den Erkenntnissen aus dem Lasermikrosintern (kurze Laserstrahleinwirkzeiten, feine Pulver) zu hochaufgelösten Strukturen führen sollte. Dabei sollte zuerst mithilfe von Modellpulvern (Edelstahl, Kupfer, Wolfram) der Pulverförderprozess auf die Bedingungen des Mikropulverauftragschweißens mit seinen sehr kleinen Fördermengen angepasst werden. Durch Variation von Optiken und Prozessparametern wie z.B. Laserleistung und Repetitionsrate sollte dann versucht werden, die Körner im Pulverstrahl aufzuschmelzen.

Dann waren verschiedene Kombinationen von Substrat- und Pulvermaterial zu untersuchen. Darauf aufbauend sollten grundlegende Untersuchungen zum Aufbau von geschichteten Strukturen mit verschiedenen Pulvern durchgeführt werden. Basierend darauf stand die Realisierung von erste Beispielstrukturen auf Substraten an, z.B. Kupfer- oder Wolframleitbahnen (Höhe und Breite 30 μm) und erhabene Edelstahlmikrostrukturen (Linien Breite 50 μm , Höhe 100 μm und Flächen Breite 200 μm , Höhe 100 μm).

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollten zur Realisierung einfacher 3D Strukturen genutzt werden. Dabei waren die Auflösungsgrenzen des Verfahrens sowie die zu erzielenden Volumenbauraten zu ermittelt. Zur Demonstration des Verfahrens sollten komplexere 3D Strukturen wie z.B. Vollwürfel und Hohlwürfel (1x1x1 mm^2), 3D Körper nach CAD-Vorgabe und 3D Oberflächen zur Reparatur eines Mikroschadens an einem Werkzeug erzeugt werden.

Weiterhin war geplant, die schnelle Erzeugung von mikrostrukturierten aus Pulver aufgetragenen Flächen mittels Hochleistungsfaserlaser zu realisieren. Hierzu sollte ein neuartiges Konzept für die Pulverzufuhr erarbeitet werden.

AP 3.2 Hochleistungslasermikroschweißen

Zusätzlich sollte auch das Hochgeschwindigkeits-Mikroschweißen mit dem Hochleistungs-faserlaser untersucht werden. Die Ergebnisse des ILT Aachen zum Hochgeschwindigkeits-schneiden- und schweißen mit CO₂-Laser sollten dazu ausgewertet und auf die Prozesse mit dem Faserlaser übertragen werden.

6.3.2 Verwendung der Zuwendung

AP 3.1 Mikropulverauftragschweißen

Am Beginn der Projektlaufzeit wurde von der Forschergruppe ein staub- und laserstrahlungs-dichter Versuchstand speziell für das Mikropulverauftragschweißen konzipiert, konstruiert und aufgebaut (Abb. 6.3.2.1). Als Laserquelle für das Verfahren wurde ein Faserlaser SP-20P der Firma SPI angeschafft und außerhalb des Bearbeitungsraumes angebaut. Mit diesem



Abb. 6.3.2.1: Versuchstand zum Mikropulverauftragschweißen

ließ sich ein breites Untersuchungsprogramm realisieren, da er sich sowohl im Dauerstrichbetrieb als auch im Pulsbetrieb betreiben lässt. Es waren Pulswiederholfrequenzen zwischen 25-500 kHz und Pulsdauern von 20–200 ns einstellbar, der zeitliche Pulsverlauf konnte beeinflusst werden. Die maximale mittlere Leistung betrug 20W. Die Faser führte den Laserstrahl in den Bearbeitungsraum direkt zur Bearbeitungsoptik.

Als Pulverförderer wurde ein CPF1 der Firma Thermico eingesetzt, welcher speziell für die Zufuhr sehr kleiner Mengen feinen Metallpulvers ausgelegt ist. Durch eine Pulverheizung und ein spezielles Vibrationssystem wird auch Pulver mit Korngrößen kleiner 10 µm fließfähig gehalten. Der Pulverförderer wurde in die Gasversorgung und die Steuerung der Anlage eingebunden und ein Pulvertransportsystem zur Pulverdüse realisiert und ständig weiterentwickelt, welches eine gleichmäßige Versorgung der Bearbeitungsstelle mit Pulvermengen bis minimal 3 g/min relativ unabhängig vom

Trägergasstrom gewährleistete. Eine erste selbst entwickelte Düse, mit welcher sich ein Pulverfokus von ca. 2,5 mm auf dem Werkstück erzeugen ließ, wurde zusammen mit dem Pulverförderer untersucht und optimiert.

Zur Positionierung und zum Verfahren der Proben wurde ein kleiner Tischroboter TX60 der Firma Stäubli angeschafft und in den Bearbeitungsraum eingebracht. Dieser kann Verfahrensgeschwindigkeiten bis zu 480 m/min bei einer Wiederholgenauigkeit beim Anfahren von Punkten von besser 20 µm erreichen. Weiterhin lässt er sich komplett mit Überdruck beaufschlagen, um Eindringen von Pulver in die empfindliche Mechanik zu verhindern. Bei den ersten Vorversuchen zeigte sich jedoch, dass der Roboter zwar eine hohe Wiederholgenauigkeit beim Anfahren von Punkten erreichte, die Bahn zwischen den Start- und Endpunkten aber starke und nicht vorhersehbare laterale Abweichungen aufwies. Daher wurde für die nachfolgenden Vorversuche der Versuchstand modifiziert und eine Linearachse zum Verfahren der Probe während des Prozesses eingesetzt. So konnten Pulver hinsichtlich ihrer Eignung für das Verfahren untersucht und eine prinzipielle Machbarkeit des Mikropulverschweißverfahrens mit gepulstem Laser in der angestrebten Dimension < 30µm nachgewiesen werden. Da jedoch mit der Linearachse nur geringe Verfahrensgeschwindigkeiten (ca. 0,6 m/min) möglich waren und die Lebensdauer der Mechanik durch das feine Pulver nur wenige Tage betrug, wurde ein gänzlich neues Konzept entwickelt.

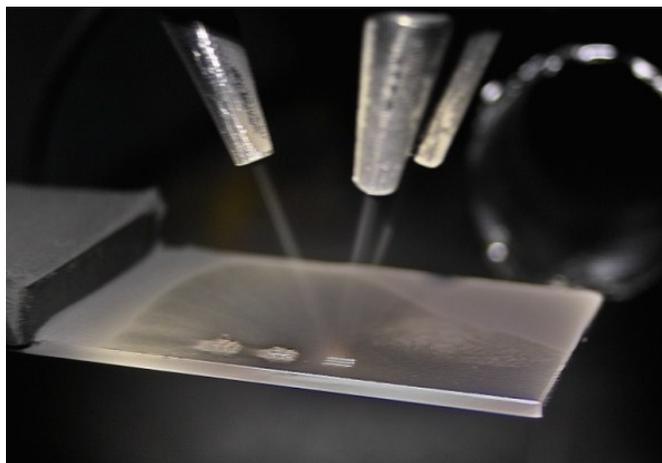


Abb. 6.3.2.2: mit Dreiachs-koaxialdüse erzeugter Pulverstrom

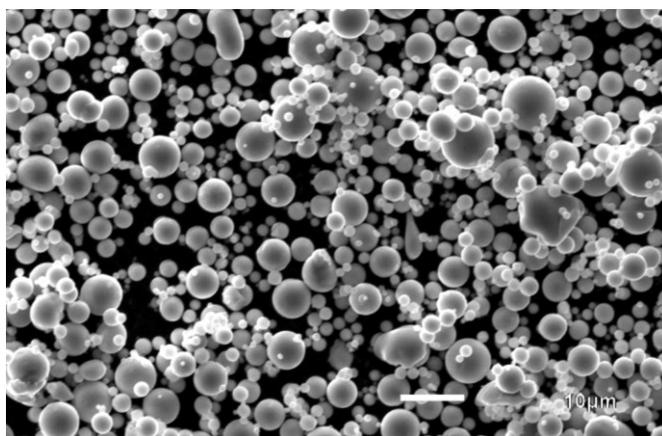


Abb. 6.3.2.3: gasverdüstes Edelstahlpulver mit sphärischer Partikelform

wurde ein gänzlich neues Konzept entwickelt.

Hierbei wurden statt der bisher üblichen Kombination aus feststehender Optik und Pulverdüse erstmals ein Galvanometerscanner zur schnellen Strahlablenkung und eine angepasste Pulverdüse mit einem größeren Pulverstrahlfleck eingesetzt. Passend zu diesem neuen Verfahren wurde der gesamte Versuchstand von der Steuerung, über die Gas- und Pulverzufuhr bis zum optischen System umgebaut. Zum Einsatz kam ein Galvoscanner Scancube 7 (Scanlab) zur schnellen Strahlablenkung und zur Fokussierung F-Theta-Optiken mit Brennweiten 60 mm, 100 mm und 160 mm. Der Roboter wurde zur Positionierung der Proben relativ zum Scanner eingesetzt.

Zur Anpassung der Pulverzuführung an den Einsatz eines Laserscanners wurde eine neue Dreistrahlkoaxialdüse konstruiert und gebaut. Sie hatte den Vorteil, damit richtungsunabhängig arbeiten zu können. Aus den Erfahrungen

mit der ursprünglichen Lateraldüse wurden ein Düsenwinkel zur Oberfläche von 65° (Abb. 6.3.2.2) und ein Düsenöffnungsdurchmesser von 2 mm gewählt, was zu einem relativ homogenen Pulverfleck mit einer Fläche von 3,8 mm² führte.

Für die Versuche zur Verfahrensentwicklung wurde Metallpulver aus einem austenitischen Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl (1.4404) mit niedrigem Kohlenstoffgehalt verwendet. Es wurden verschiedene Stahlpulver untersucht, wobei sich das gasverdünste Edelstahlpulver von NANOVAL mit einer mittleren Partikelgröße von 6,2 µm und seiner hauptsächlich sphärischen Partikelform (Abb. 6.3.2.3) am besten für das Verfahren eignete. Passend zum Pulver wurde auch für das Substratmaterial Stahl 1.4404 oder 1.4301 gewählt.

Zuerst wurde grundlegend untersucht, mit welchen Prozessparametern sich prinzipiell dünne Wände aufbauen lassen und welchen Einfluss Laserleistung, Pulswiederholfrequenz, Scangeschwindigkeit, Pulverfördermenge, Schutzgas etc. auf den Prozess haben. Im Weiteren wurden dann die Eigenschaften der Auftragschweißspuren kontinuierlich auf bestmögliche Auflösung und Reproduzierbarkeit optimiert und die Ergebnisse als Grundlage zu Untersuchungen zum Erzeugen von einfachen 2,5D Strukturen verwendet. Um komplexere größere Strukturen als es der homogene Pulverstrahlfleck erlaubte, generieren zu können, wurde die Anlage nochmals überarbeitet. Dabei wurden die Optiken und der Laser neu gemessen und neue Korrekturdateien für den Scanner erstellt. Des Weiteren wurden eine neue Software für die Scanner-, Laser- und die Robotersteuerung entwickelt und die vorher separat angesteuerten Komponenten Scanner-Steuerung, Schutzgasversorgung, Pulverförderer, Robotersteuerung und Laser so miteinander kombiniert, dass ein automatischer Prozess möglich wurde. Mit diesem Setup wurden abschließend Untersuchungen zur Generierung zusammengesetzter Volumenkörper durchgeführt.

Die geplanten Untersuchungen zum Mikropulverauftragschweißen mittels Hochleistungsfaserlaser konnten nicht durchgeführt werden, da sich der Prozess aus Sicherheitsgründen nicht in die Anlage zur Hochleistungs-Mikrobearbeitung integrieren ließ.

AP 3.2 Hochleistungslasermikroschweißen

Für die Untersuchungen zum Hochleistungslasermikroschweißen wurde die Anlage zur Hochleistungslasermikrobearbeitung genutzt, welche in Kapitel 6.4.2. Arbeitspunkt AP 4.4 / 4.5 detailliert beschrieben ist. Die Schweißuntersuchungen wurden an 1 mm dicken Edelstahlblechen und Aluminiumoxid-Substraten verschiedener Zusammensetzung durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss von Prozessparametern wie z.B. Laserleistung und Scangeschwindigkeit anhand von Blindschweißungen untersucht und die Schweißnähte und deren Schliffe mithilfe von REM- und lichtmikroskopischen Aufnahmen gemessen und beurteilt. Für die Keramiken wurde eine spezielle Halterung gebaut und mit deren Hilfe Stumpfstoßschweißungen durchgeführt.

6.3.3 Ergebnisse

AP 3.1 Mikropulverauftragschweißen

Das ursprüngliche Konzept, das Verfahren mit feststehender Optik und Pulverdüse mittels Verfahren des Substrates zu realisieren, wurde wieder verworfen, da sich die notwendigen Verfahrensgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Präzision mit einem Achssystem oder einem Roboter nicht erreichen ließen. Das neuartige Konzept, bei dem der Laserstrahl durch einen Scanner über das Substrat bewegt wird und die Pulverdüse fest zum Scanner angebracht ist, ermöglichte es, den Laserstrahl sowohl schnell als auch präzise über die Oberfläche zu bewegen. Einzige Einschränkung war zunächst der kleine Arbeitsbereich von $2 \times 2 \text{ mm}^2$, der durch den Bereich definiert war, in welchem die Pulverdüse einen relativ homogenen Pulverstrom bereitstellte.

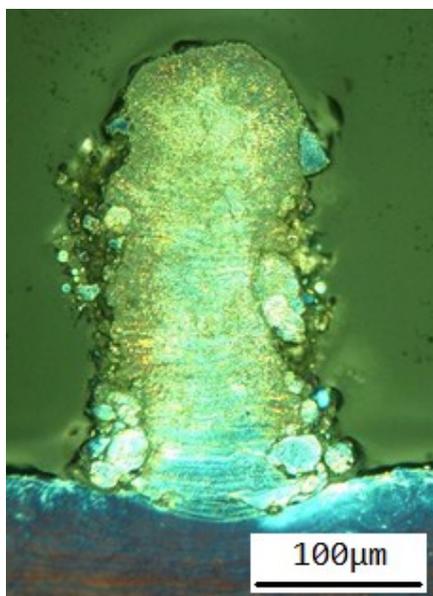


Abb. 6.3.3.1: Auftragschweißspur bei $f = 200 \text{ kHz}$,
 $v = 1,2 \text{ m/min}$, $P_{AV} = 14,5 \text{ W}$,
 $d = 80 \mu\text{m}$, 20 Bestrahlungen

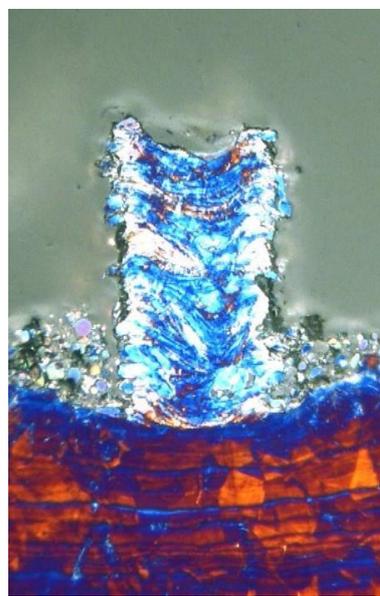


Abb. 6.3.3.2: Auftragschweißspur bei $f = 50 \text{ kHz}$,
 $v = 48 \text{ m/min}$, $P_{AV} = 14,5 \text{ W}$,
 $d = 80 \mu\text{m}$, 800 Bestrahlungen

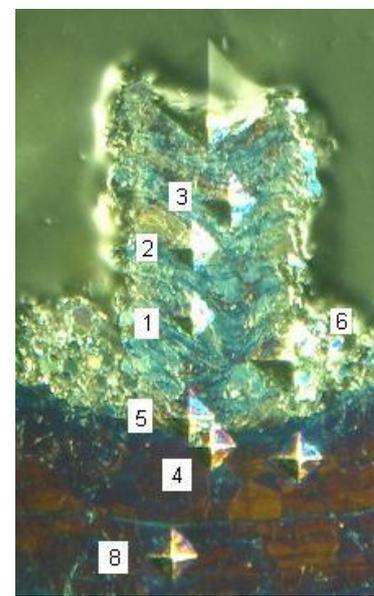


Abb. 6.3.3.3: Härteprüfung an Auftragschweißspur
 $f = 50 \text{ kHz}$, $v = 48 \text{ m/min}$,
 $P_{AV} = 14,5 \text{ W}$, $d = 80 \mu\text{m}$,
 800 Bestrahlungen

Grundlegende Untersuchungen

Zum Erzeugen von Mikro-Auftragsschweißspuren aus Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl (1.4404) wurden umfangreiche Untersuchungen mit unterschiedlichen Prozessparametern durchgeführt. Die für den Prozess am besten geeigneten Pulverförder-Parameter waren eine Pulverfördermenge von ca. $3,5 \text{ g/min}$ bei einem Trägergasdurchsatz von 10 l/min (Argon). Eine Steigerung beider Werte führte zu qualitativ schlechteren Spuren, eine Verringerung führte zum Abbruch des Pulvertransportes.

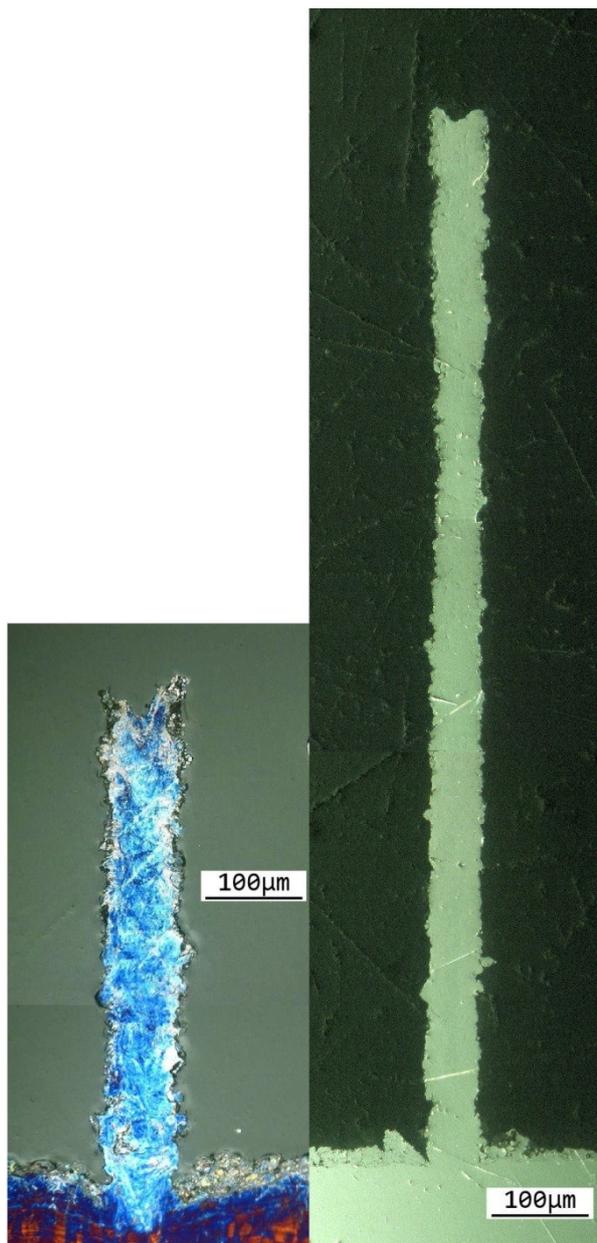


Abb. 6.3.3.4: Querschnitt durch Auftragschweißspuren, $f = 25 \text{ kHz}$
 (links) Wandstärke ca. $80 \mu\text{m}$, Höhe $500 \mu\text{m}$
 ($d = 80 \mu\text{m}$, $F = 27,6 \text{ J/cm}^2$, $v = 72 \text{ m/min}$,
 1.200 Bestrahlungen),
 (rechts) Wandstärke ca. $50 \mu\text{m}$, Höhe $1070 \mu\text{m}$
 ($d = 50 \mu\text{m}$, $F = 28,5 \text{ J/cm}^2$, $v = 65 \text{ m/min}$,
 3.100 Bestrahlungen)

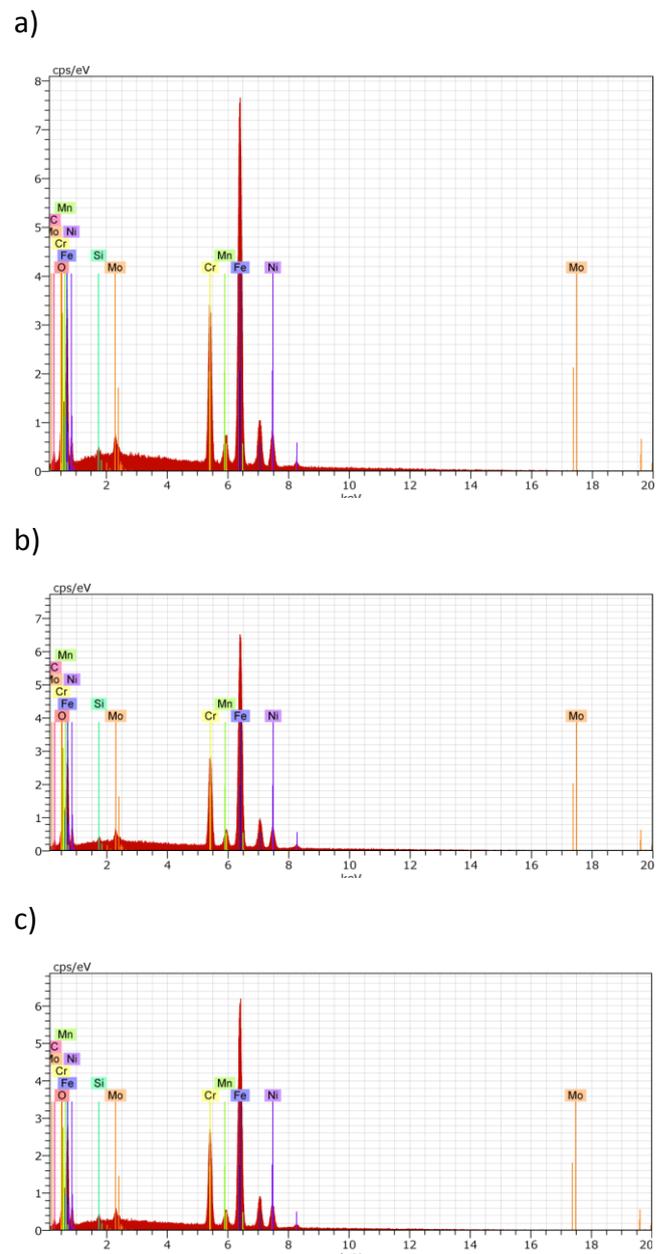


Abb. 6.3.3.5: a/b/c: EDX-Analysen am Querschliff einer Auftragschweißspur, $f = 25 \text{ kHz}$, $P = 7\text{W}$, $d = 50 \mu\text{m}$
 in der Wandmitte
 in der Wurzel
 im Substratmaterial 1.4404

Erste Untersuchungen waren darauf ausgerichtet, möglichst schmale formtreue Mikrowände aufzubauen. Um die dafür notwendigen schmalen Auftragschweißspuren erzeugen zu können, wurden Versuche mit unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten, Laserleistungen und Pulsfrequenzen durchgeführt. Die Pulswiederholraten wurden dabei zwischen 25 kHz und 500 kHz, die mittlere Laserleistung zwischen 5 W und 16,5 W sowie die Scangeschwindigkeit zwischen 1,5 m/min und 100 m/min variiert. Dabei zeigte sich, dass der entscheidende Parameter für die Qualität der Spuren und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse die Pulswiederholrate war. Mit ihr war die maximale Pulsenergie festgelegt, da bei hohen

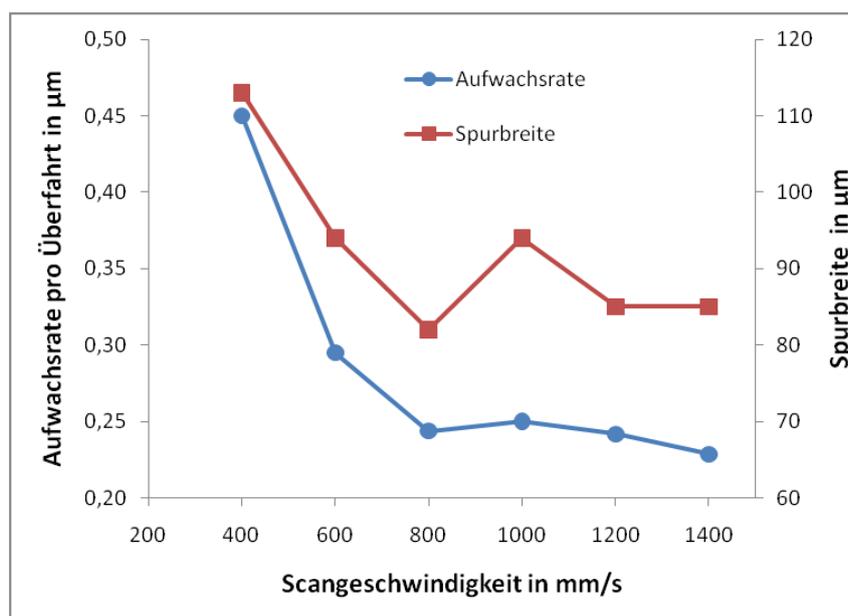


Abb. 6.3.3.6: Aufwachsrate pro Wiederholung und Spurbreite in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit bei $f = 25 \text{ kHz}$, $P = 11 \text{ W}$, $d = 80 \text{ µm}$

Frequenzen die Pulsenergie sank, weil die mittlere Leistung auf 20 W begrenzt war.. Die Scangeschwindigkeit war ebenfalls begrenzt, so dass mit zunehmender Pulsfrequenz der Pulsüberlapp und damit die Wärmeakkumulation zunahm. Ausgehend von diesen technischen Grenzen hatten sich Pulswiederholraten von 25 bis maximal 50 kHz als vorteilhaft erwiesen. Bei den Frequenzen war die Pulsenergie und infolge die Intensität bzw. Fluenz noch so hoch, so dass auch größere Pulverpartikel vollständig aufgeschmolzen werden konnten. Gleichzeitig war ein Abtrag des bereits auf der Oberfläche aufgeschmolzenen Materials zu beobachten. Ähnlich wie beim Lasermikrosintern wirkte sich dies positiv auf den Generierungsprozess aus. Der daraus resultierende „Nahteneinfall“ ist in den Abb. 6.3.3.4 gut zu erkennen und verringerte sich mit steigender Pulswiederholrate.

Ab einer Pulswiederholrate von 100 kHz bildete sich eine runde Schweißraupe mit glatter Oberseite aus, wobei die maximal anwendbare Scangeschwindigkeit verringert war. Dies lag an der begrenzten Pulsenergie. Der Prozess ging immer mehr in einen quasi-cw-Prozess über. Die Breite der Spuren nahm deutlich zu, was auf übergroßen Energieeintrag und die

daraus resultierende Nacherwärmung mit starken Pulveranhaftungen zurückzuführen war (Abb. 6.3.3.1).

Mit steigender Scangeschwindigkeit stiegen bei den höheren Frequenzen die Aufwachsrate und die Spurbreite deutlich an, während sich bei einer Frequenz von 25 kHz ab einer Geschwindigkeit von ca. 800 mm/s beide Werte kaum noch änderten (Abb. 6.3.3.6). Der Pulsabstand betrug dann 32 μm und lag im Bereich des Fokusradius, es war also nur noch ein relativ geringer Pulsüberlapp von $< 40\%$ zu verzeichnen. Ein ähnlicher Effekt war auch bei Variation der mittleren Laserleistung zu beobachten, auch hier wuchs bei hohen Pulswiederholungsfrequenzen die Spurbreite deutlich mit der Steigerung der Laserleistung, während sich bei einer Frequenz von 25 kHz über einen großen Leistungsbereich eine konstante Spurbreite von 80-90 μm und eine durchschnittliche Aufwachsrate von 0,25 μm pro Bestrahlung einstellte. Der Grund war wiederum der geringe Pulsüberlapp. Dadurch waren Akkumulationseffekte eingeschränkt, wodurch eine Erhöhung der Laserleistung, also eine Erhöhung der Pulsenergie und damit der Intensität weitgehend auf das Einzelereignis wirkte. Einflüsse könnten auch vom Zusammenspiel Pulvergasstrom und applizierter Pulsfrequenz herrühren.

Die innere Struktur und die Substratanbindung waren bei niedriger Frequenz deutlich besser als bei den höheren Frequenzen. So war das Gefüge bei höheren Frequenzen oft von Poren und Einschlüssen durchsetzt, bestand teilweise nur aus fest haftenden nicht komplett geschmolzen Partikeln und war hochgradig oxidiert. Bei einer Frequenz von 25 kHz hatte sich dagegen die chemische Zusammensetzung im Vergleich zum Ausgangsmaterial nicht messbar geändert und in der Spur ließ sich keine Oxidation erkennen (Sauerstoffanteil kleiner 1%, Abb. 6.3.3.5). Auch die Mikrohärtete entsprach mit Werten zwischen 409HV und 321HV den Werten des Substratmaterials (Abb. 6.3.3.3). Dies resultierte wiederum aus dem geringen Pulsüberlapp und der daraus folgenden geringen Nacherwärmung.

Beim Vergleich der mit unterschiedlichen Fokusburchmessern erzeugten Wände deutet sich an, dass die Auflösung des Verfahrens im Wesentlichen durch den Fokusburchmesser bestimmt ist, wenn gleichzeitig die Fluenz bei ca. 28 J/cm^2 konstant gehalten wird (Abb. 6.3.3.4). Die Wand der Breite 80 μm wurde mit einer Volumenbaurrate von ca. 0,5 mm^3/min erzeugt. Ein anderer interessanter Effekt ergab sich aus den vorhandenen Strahlengängen. Die Rayleighlänge betrug bei der Optik mit Brennweite 63 mm ca. 1 mm und mit Brennweite 100 mm ca. 2,3 mm. Hierdurch war es möglich, in diesem Bereich kontinuierlich ohne Nachführung des Fokus zu arbeiten. Es konnten Wände mit Aspektverhältnissen größer 20 generiert werden. In lateraler Richtung war die homogene Verteilung des Pulvers der begrenzende Faktor. Innerhalb eines Durchmessers von ca. 2 mm konnte mit dem Scanner gearbeitet werden. Durch direktes Nebeneinanderlegen zweier Spuren und einer kontinuierlichen Verringerung ihres Abstandes (oder umgekehrt) konnten auch Spuren mit variabler Spurbreite (90 μm auf 50 μm) erzeugt werden.

3D Strukturen

Einzelstrukturen

In ersten Versuchen zum Aufbau von Probekörpern wurden einfache Quader-Strukturen mit Pulswiederholffrequenzen von 25 kHz und 50 kHz erzeugt, da sich diese in den Versuchen zu den Auftragschweißspuren als praktikabel erwiesen. Es wurden Einzellinien mit einem Abstand von 5-25 μm aneinandergereiht und schichtweise gekreuzt.

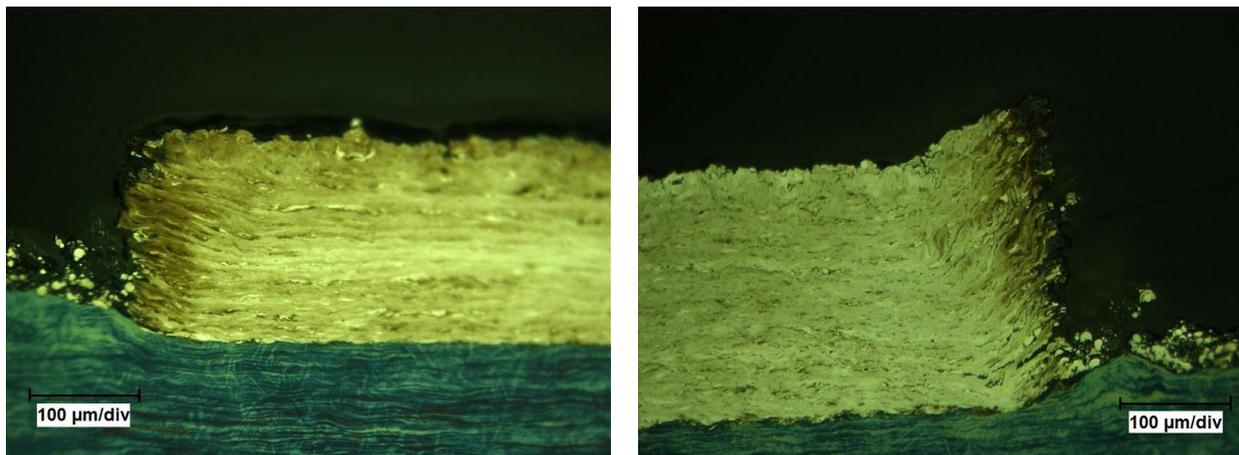


Abb. 6.3.3.7: Querschnitt von Probekörpern, 100 Schichten, $P_{AVG} = 14,5 \text{ W}$, $v = 24 \text{ m/min}$, $d_{86} = 80 \mu\text{m}$, links: $f = 50\text{kHz}$, Linienabstand $10 \mu\text{m}$; rechts $f = 25\text{kHz}$, Linienabstand $15 \mu\text{m}$

Mit beiden Frequenzen ließen sich nahezu oxid- und porenfreie Probekörper erzeugen (Abb. 6.3.3.7 links). Bei gleicher Schichtanzahl stieg die Bauhöhe mit kleinerer Frequenz und kleinerem Linienabstand sowie steigender Laserleistung. Bei einer Frequenz von 25 kHz und zu hohen Laserleistungen kam es aber zu einer deutlichen Überhöhung am Rand des Körpers (Abb. 6.3.3.7 rechts).

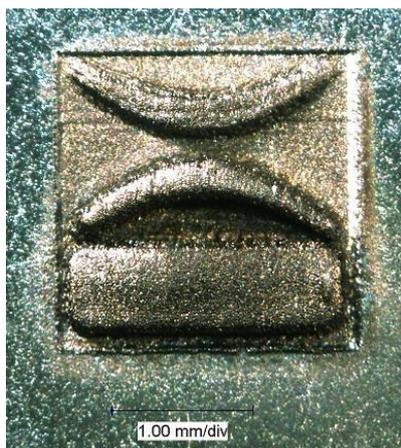


Abb. 6.3.3.8: 2,5D Teststruktur (400 Schichten mit Linienabstand $25 \mu\text{m}$, $v = 400 \text{ mm/s}$, $f = 50\text{kHz}$, $P = 12,5\text{W}$), nach Generierung geglättet

In Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse konnte eine erste freigeformte 2,5D Struktur erzeugt werden (Abb. 6.3.3.8). Zur Glättung wurde die Oberfläche defokussiert bestrahlt. Die mittlere Baurate betrug bei diesen Versuchen nur noch $0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Zur Erhöhung der Baurate wurde dann untersucht, inwieweit die Parameter, die beim Aufbau der Einzelspuren relativ hohe Bauraten hervorgerufen hatten, auch zur Generierung von 3D Strukturen geeignet waren. Zum Erzeugen kleiner Testquader wurden deshalb Linienscans aneinandergelagt und von Schicht zu Schicht um 90° gedreht, um den Einfluss der Scanrichtung zu eliminieren. Als grundlegende Prozessparameter

wurden die für die Einzelspuren ermittelten optimalen Parameter genutzt (Tab. 6.3.3.1).

Tab. 6.3.3.1: Grundlegende Prozessparameter zum Erzeugen von Quadern

Laser	Pulsrepetitionsrate	25 kHz
	mittlere optische Ausgangsleistung	7 W
	Pulslänge	200 ns
	Pulsenergie	280 μ J
Pulverförderer	Pulverdurchsatz	3,5 g/min
	Trärgasdurchsatz (Argon)	10 l/min
Scanner	Scangeschwindigkeit	74 m/min
Optik	F-Theta mit Brennweite	63 mm
	Fokusedurchmesser (86%)	52 μ m
Prozess	Intensität	$6,6 \cdot 10^7$ W/cm ²
	Streckenenergie	5,83 J / m

Auf der Grundlage wurde der optimale Linienabstand zum Erzeugen einzelner Schichten ermittelt. Wie in Abb. 6.3.3.9 gut zu erkennen ist, ergab sich die größte Bauhöhe bei einem Linienabstand von 40 μ m, was einem Überlapp von 10 μ m entsprach. Der Überlapp von Puls zu Puls betrug hingegen aufgrund von Pulsfrequenz, Scangeschwindigkeit und Fokusedurchmesser weniger als 5 μ m.

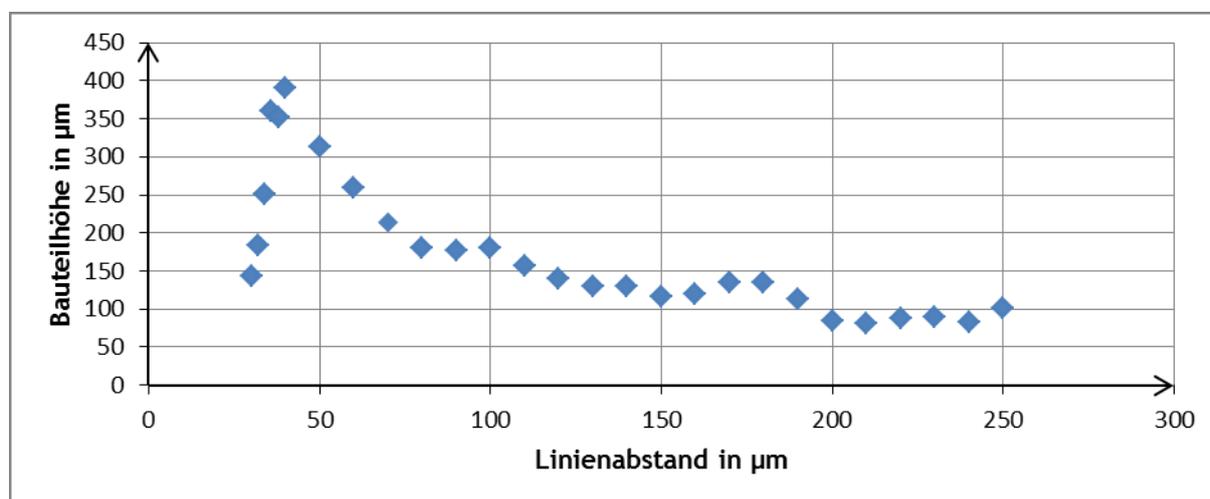


Abb. 6.3.3.9: Bauteilhöhe in Abhängigkeit vom Linienabstand

Bei diesem Linienabstand war das Aufbauverhalten im Vergleich zu den anderen Abständen auch zum Rand hin relativ stabil (Abb. 6.3.3.10), die Oberfläche war bei kleineren Abständen aber deutlich glatter und es waren weniger Fehlstellen im Gefüge vorhanden (Abb. 6.3.3.10 und 6.3.3.11).

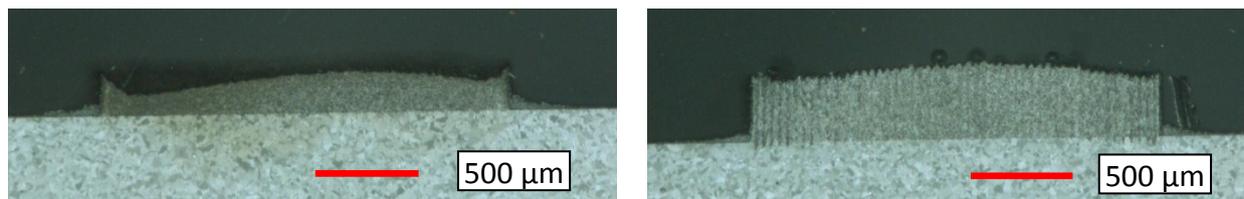


Abb. 6.3.3.10: Schliff eines Quaders mit Linienabstand 30 µm (links) und 40 µm (rechts)

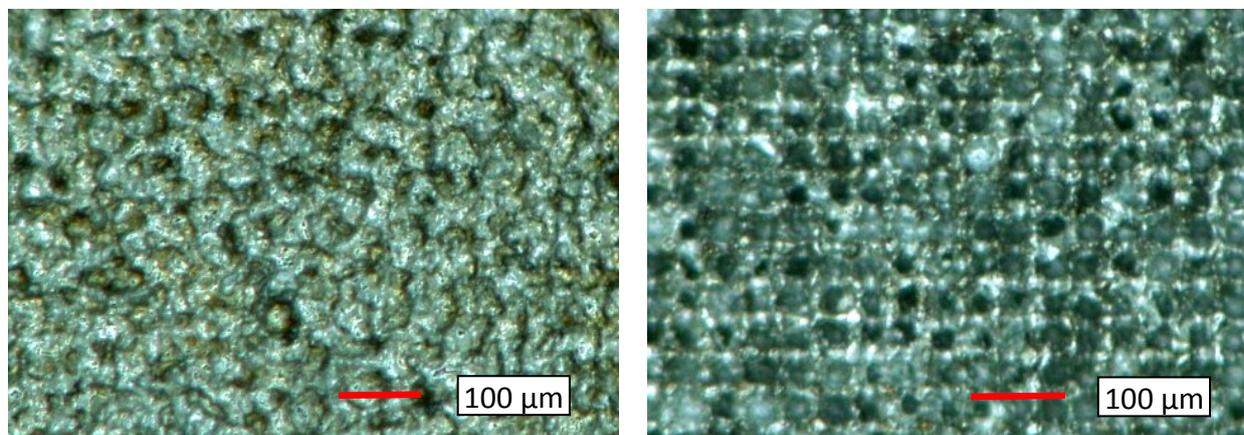


Abb. 6.3.3.11: Oberfläche eines Quaders mit Linienabstand 30 µm (links) und 40 µm (rechts)

Bei Linienabständen größer als der Durchmesser des Laserfokus nahmen die Fehlstellen deutlich zu, um bei einem Abstand von 90 µm nur noch ein Gitter zu bilden. Ein Linienabstand von 40 µm wurde daher, auch auf Grund seines relativ konstanten Aufbauergebnisses, als Grundlage für alle weiteren Versuche verwendet. Die Baurate bei Quadern mit einer Grundfläche von 2 x 2 mm² bis 0,5 x 0,5 mm² betrug auch 0,5 mm³/min, obwohl aus den Versuchen zum Aufbau von Spuren eigentlich anzunehmen war, dass die Oberflächentemperatur bei kleineren Querschnitten durch die schlechte Wärmeleitung zunehmen und somit eine höhere Baurate begünstigen sollte. Durch Messung der mittleren Laserleistung beim

Aufbauprozess wurde aber ersichtlich, dass die eingebrachte Laserleistung pro Fläche bei kleineren Querschnitten durch die proportional geringere Einschaltzeit des Lasers bei gleichbleibender Ausschaltzeit während der Umkehr des Scanners kompensiert wird. Die Höhe des aufgebauten Körpers war bei diesen Versuchen nur von der Anzahl der einzelnen Schichten abhängig (ca. 1.200/mm). Eine mit den optimalen Parametern erstellte Testpyramide zeigte eine große Konturschärfe (Abb. 6.3.3.12).

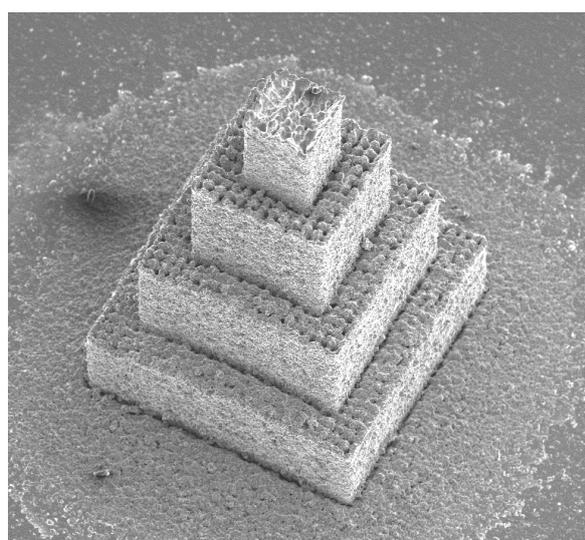


Abb. 6.3.3.12: konturscharfe Mikropyramide

Zusammengesetzte Strukturen

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden dann Untersuchungen zu zusammengesetzten Körpern durchgeführt, zunächst nur in vertikale Richtung. Durch die Lage des homogenen Pulverfleckes und die Rayleigh-Länge des Laserstrahles musste das Substrat für Bauhöhen größer 0,5 mm während des Prozesses abgesenkt werden, die beste Reproduzierbarkeit ließ sich durch ein Absenken nach einer Bauhöhe von 350 µm erzielen. So wurde durch 20maliges Nachführen des Laserstrahlfokus z.B. ein Quader mit einer Höhe von 6,2 mm bei einer Kantenlänge der quadratischen Grundfläche von 500 µm erzeugt (Abb. 6.3.3.13). Damit konnte gezeigt werden, dass ein vertikales Zusammensetzen von Körpern in hoher Qualität möglich ist. Die Baurate betrug trotz Roboternachführung und kurzen Scanlängen immer noch 0,15 mm³/min.

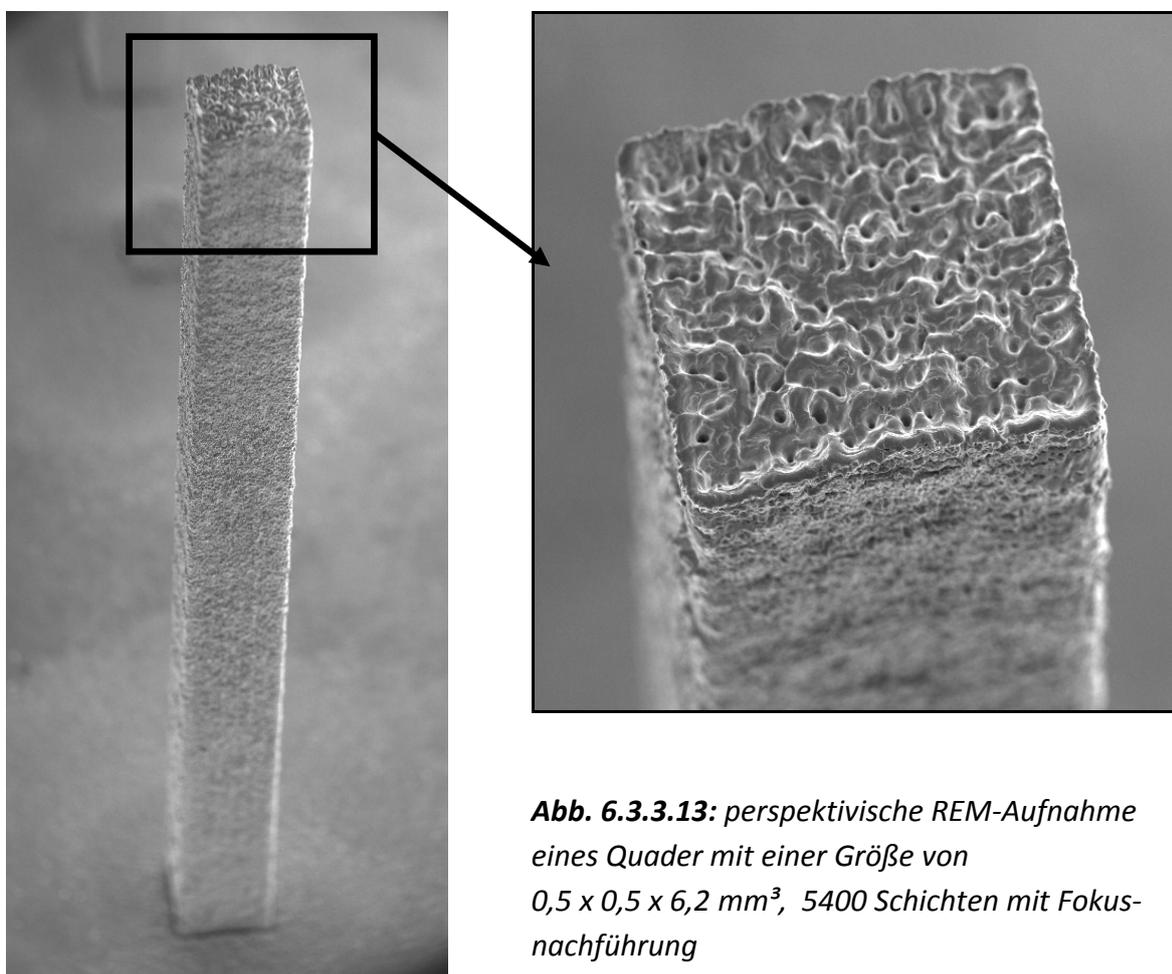


Abb. 6.3.3.13: perspektivische REM-Aufnahme eines Quader mit einer Größe von 0,5 x 0,5 x 6,2 mm³, 5400 Schichten mit Fokussachführung

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden Untersuchungen zum Erzeugen von größeren Körpern durch vertikales und laterales Zusammensetzen einzelner Quader durchgeführt. Als Basis dienten Quader mit einer Kantenlänge von bis zu 1 mm. Diese wurden mit unterschiedlichem Überlapp und in unterschiedlicher Reihenfolge bis auf eine Höhe von 350 µm aufgebaut, danach wurde das Substrat um diese Höhe abgesenkt und die nächste Höhenstufe, zum Teil versetzt, darauf aufgebaut.

Grundsätzlich war festzustellen, dass die bei zunehmendem Überlapp die Gesamtkörper immer unregelmäßiger aufgebaut wurden, was wahrscheinlich auf eine übermäßige thermische Belastung des bereits aufgebauten Material zurückzuführen war (Abb. 6.3.3.14). Auch die Variation der Aufbaureihenfolge und die Verschachtelung der Höhenstufen erbrachten keine besseren Resultate. Schon in der ersten Höhenstufe kam es an den Stoß- oder Überlappstellen der Quader zu Fehlstellen, die in erster Linie auf Pulverreste zurückzuführen waren, welche sich durch Verwirbelung in den Ecken sammelten (Abb. 6.3.3.15). Die darüber liegenden Schichten bauten auf das lose Pulver auf und es kam zu einem Höhendefekt, welcher sich mit jeder Höhenstufe verstärkte. Ein Wegblasen des angelagerten Pulvers mit einer zusätzlichen Düse führte zu einem instabilen Aufbauprozess. Darüber hinaus kam es an den Kanten der bereits aufgebauten Segmente zur Verwirbelung und Abschattung des Pulverstrahles, was zum unregelmäßigen Wachstum der einzelnen Segmente zusätzlich beitrug (Abb. 6.3.3.16).

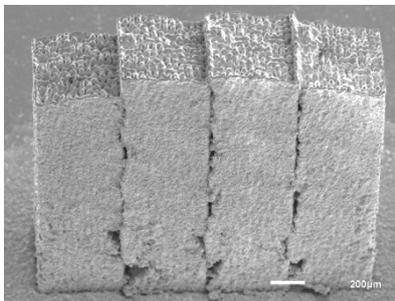


Abb. 6.3.3.14: zusammengesetzter Volumenkörper mit 10 µm Überlapp der Basisquader

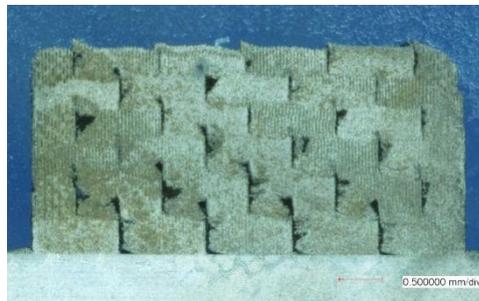


Abb. 6.3.3.15: verschachtelte Segmente, alle 350 µm um ein halbes Segment versetzt



Abb. 6.3.3.16: Körper aus 8 Einzelsegmenten, 0,5 mm Kantenlänge

Durch ein geändertes Regime für die Anordnung der Substrukturen sollte es zukünftig gelingen, auch großvolumige Körper aufzubauen.

Es wurde weiterhin Untersuchungen zur Erzeugung von Gitterstrukturen durchgeführt. Hierbei wurde ebenfalls ein eine zusätzliche laterale Bewegung mit dem Roboter ausgeführt. Wie oben bereits erwähnt, entstanden bei Abständen, die etwas größer als der Laserfokus waren (ab ca. 90µm), keine kompakten Körper mehr, sondern einzelne, deutlich voneinander getrennte Linien. Diesen Effekt ausnutzend, wurden Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Linienabständen und ansonsten gleichen Parametern wie die Quader erzeugt. Deutlich zu erkennen war, dass die Strukturen mit einem geringen Linienabstand eine relativ gerade Oberfläche ausbildeten (Abb. 6.3.3.17), aber Strukturen mit einem größeren Linienabstand an den Schnitt- und Endpunkten der Wände ein unregelmäßiges Höhenwachstum zeigten (Abb. 6.3.3.18). Dies schien hauptsächlich thermischen Effekten geschuldet, da die dünnen Wände die beim Prozess an der Oberseite entstehende Wärme nur eindimensional

in das Substrat leiten können. Dieser Effekt ließ sich besonders gut auf Substraten mit geringer Wärmeleitfähigkeit demonstrieren und ausnutzen.

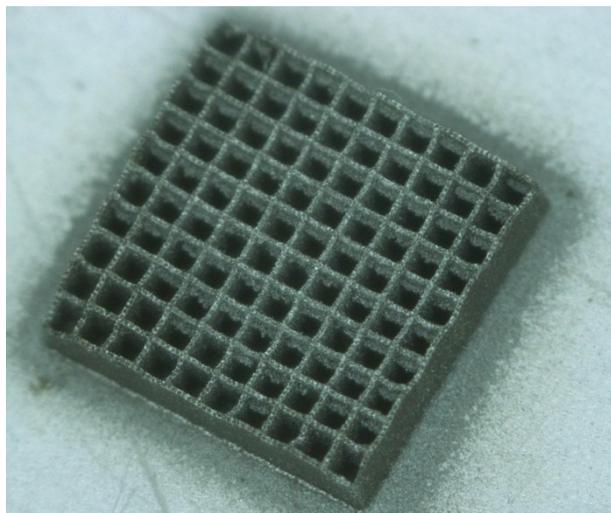


Abb. 6.3.3.17: Gitterstruktur mit Linienabstand 300 µm

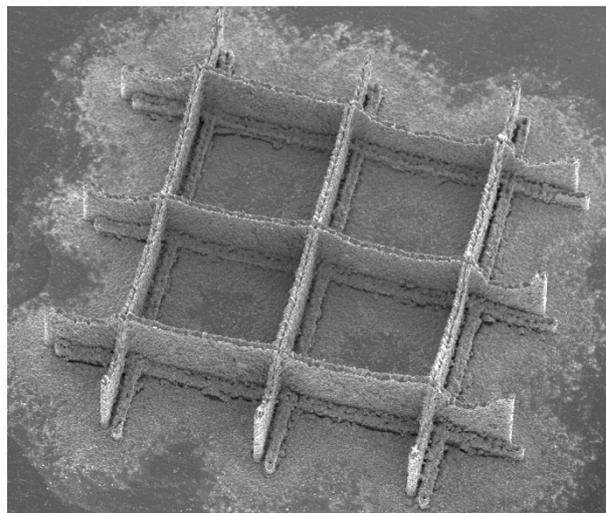


Abb. 6.3.3.18: Gitterstruktur mit Linienabstand 900 µm

So wurden erfolgreich Gitterstrukturen und einzelne Spuren aus Stahl auf Kunststoffen aufgebaut (Abb. 6.3.3.19). Dies war nur möglich, weil der Prozess das Substrat sehr wenig thermisch belastet und das Substrat selbst für die Laserstrahlung relativ transparent war.

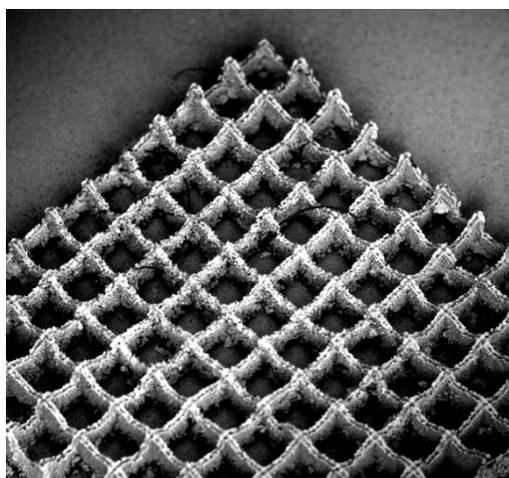
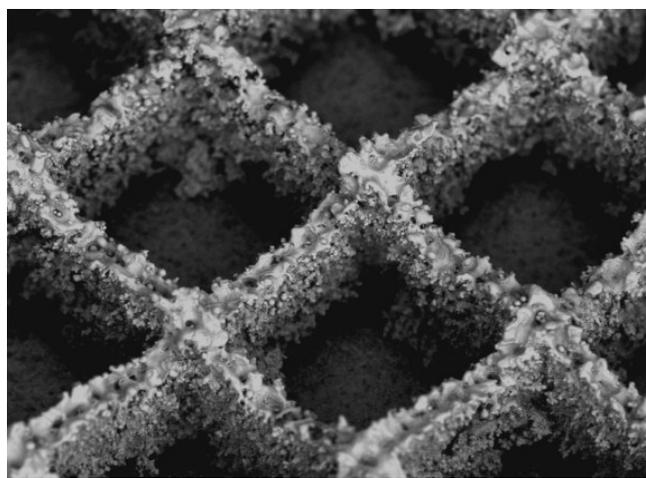


Abb. 6.3.3.19: Gitterstruktur mit Linienabstand 300 µm auf PVC-Substrat



Versuche auf keramischen Al_2O_3 -Substraten waren dagegen nicht erfolgreich, da es zu keiner ausreichenden Verbindung der Schmelze mit dem Substrat kam. Das geschmolzene Pulver perlte regelrecht von der Keramikoberfläche ab.

AP 3.2 Hochleistungslasermikroschweißen

Stahl

Die Schweißversuche an Edelstahl 1.4301 wurden im Geschwindigkeitsbereich von 1–350 m/min mit einem Foksdurchmesser von 21µm durchgeführt. Schon mit einer Laserstrahlleistung von 620W konnte Blech mit einer Dicke von 1 mm bei einer Geschwindigkeit von 30 m/min gut reproduzierbar vollständig durchgeschweißt werden. Wie in Abb. 6.3.3.20 zu sehen ist, zeigte sich bei dem Material eine indirekt exponentielle Abhängigkeit der Ein-

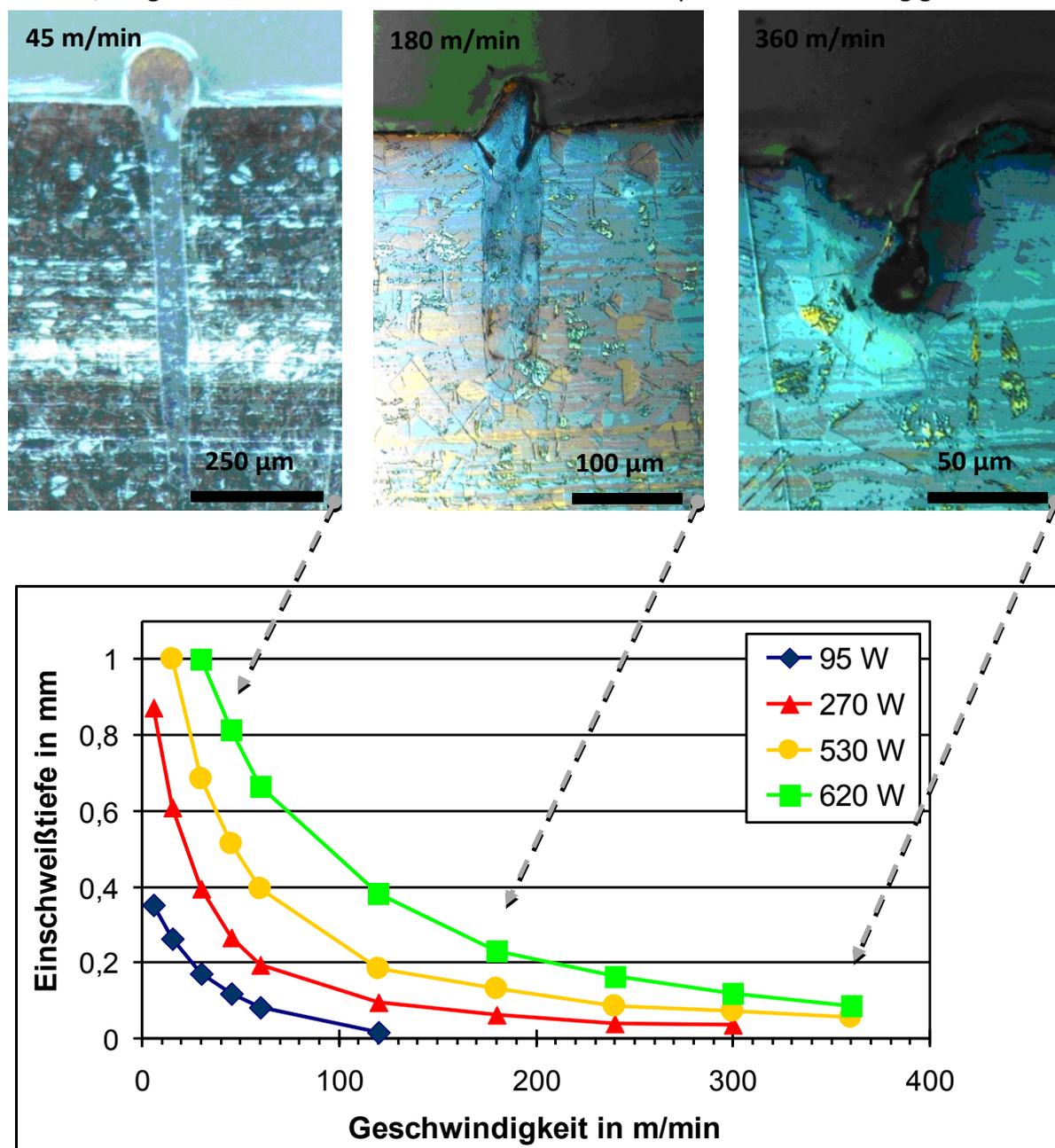


Abb. 6.3.3.20: Einschweißtiefe in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit (Edelstahl 1.4301, Dicke 1 mm, Foksdurchmesser 21 µm; Parameter Laserleistung); darüber Querschliffe einiger ausgewählter Beispiele bei $P = 620\text{ W}$

schweißtiefe von der Schweißgeschwindigkeit.

Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit, ab ca. 100 m/min, war eine Kerbwirkung am Kopf der Schweißnaht zu beobachten, die sich bis zum Schmelzauswurf steigerte. Die Einschweißtiefe und der geschmolzene Anteil nahmen auf Grund der damit einhergehenden geringeren Streckenenergien immer mehr ab, bis ab ca. 300 m/min nur noch ein Abtragprozess zu beobachten war.

Beim Schweißen im unteren Geschwindigkeitsbereich waren sehr schlanke nadelförmige Einschweißungen mit einem Aspektverhältnis von 1:15 zu verzeichnen, wobei sich bei höherer Laserleistung und Geschwindigkeit bei gleicher Einschweißtiefe schlankere Schweißnähte erzeugen ließen (Abb. 6.3.3.21). Bei noch höheren Schweißgeschwindigkeiten von 180 bis 240 m/min war in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung das bekannte Humping zu beobachten (Abb. 6.3.3.20), bei dem in der Schweißspur in regelmäßigen Abständen Auswürfe auftraten.

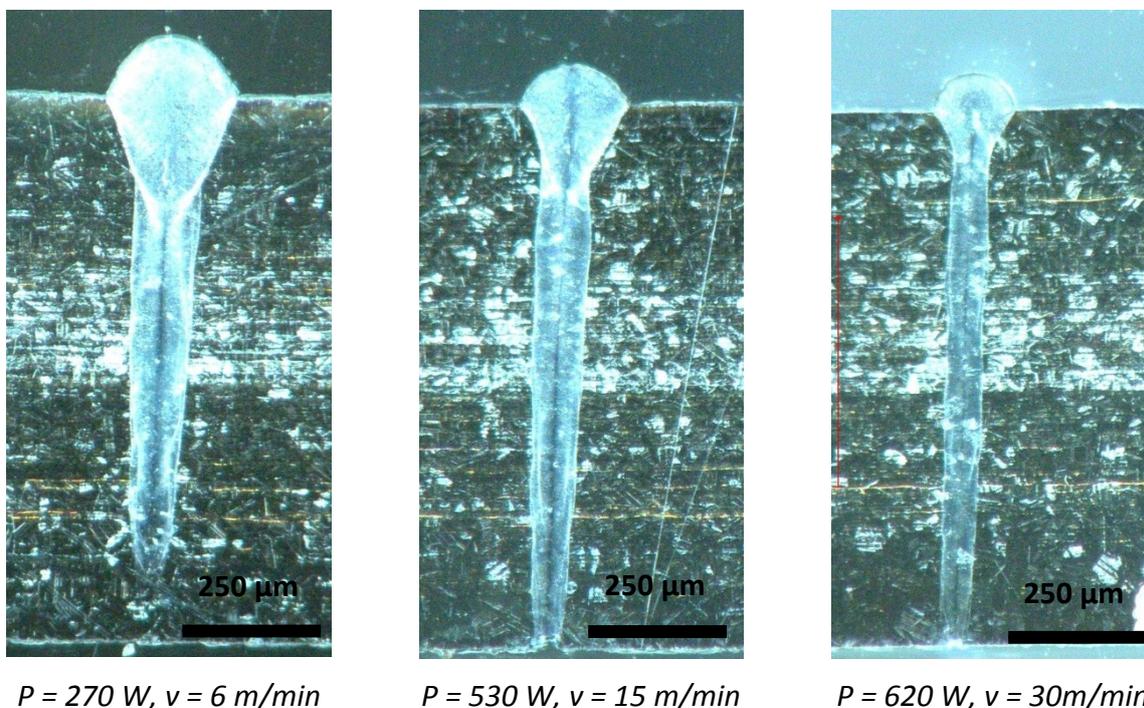


Abb. 6.3.3.21: Querschliffe von Blindschweißungen mit ausgewählte Laserstrahlleistungen und Schweißgeschwindigkeiten (Blechdicke 1mm, Fokussdurchmesser 21µm)

Bis zu einer Höchstgeschwindigkeit, die abhängig vom Material, von der eingebrachten Laserleistung und der Intensität war, lief der bekannte Tiefschweißprozess ab. Bei rein energetischer Betrachtung sollte eigentlich der Prozess bei immer höherer Geschwindigkeit zunächst in das Wärmeleitschweißen und anschließend in eine Oberflächenerwärmung übergehen, da mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit immer weniger Streckenenergie in die Bearbeitungsstelle eingebracht wurde. In der Praxis wurde aber genau das Gegenteil beobachtet, mit Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit setzte der Abtrag scheinbar ab einer Mindestgeschwindigkeit ein.

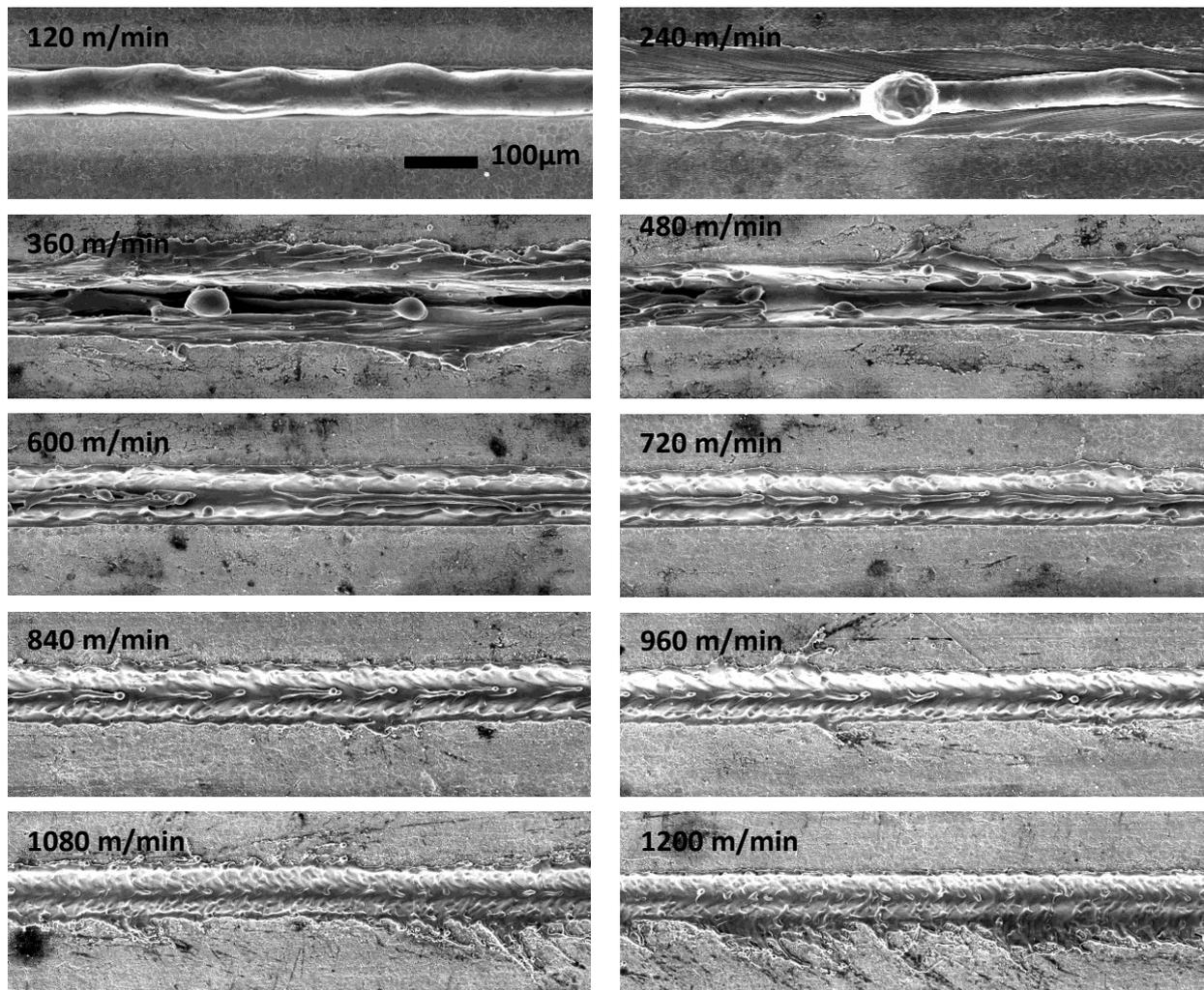


Abb. 6.3.3.22: REM-Aufnahmen der Oberseite von Blindschweißspuren/ Abtragspuren (Laserleistung 880 W, Fokussdurchmesser 21 µm)

Die Laserleistung blieb zwar gleich, aber die mittlere Einwirkzeit wurde mit zunehmender Geschwindigkeit immer kürzer. Durch eine Abschätzung der Geschwindigkeit des sich einstellenden Temperaturfeldes war ersichtlich, dass bei den applizierten Intensitäten schon nach einigen 10 ns die Verdampfungstemperatur auf der Materialoberfläche erreicht ist. Das heißt, bei den vorhandenen kurzen Einwirkzeiten von minimal 1 µs kam es immer zum Abtrag. Bei den relativ niedrigen Verfahrensgeschwindigkeiten, in denen ein Tiefschweißprozess zu beobachten war, wurde so viel zusätzliche Energie eingebracht, dass genug Schmelze entstand, um einen stabilen Schweißprozess durchzuführen. Mit höheren Geschwindigkeiten nahm die eingebrachte Streckenenergie und somit der entstehende Schmelzanteil ab, bis er so klein wurde, dass der Abtragprozess gegenüber dem Schmelzprozess überwog.

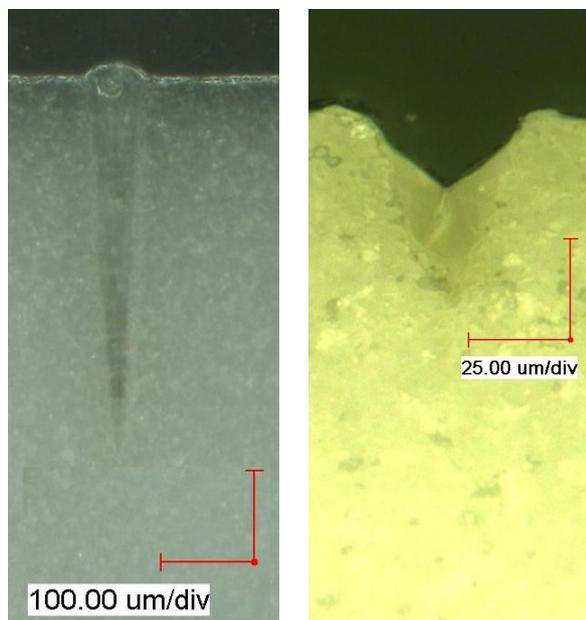
Keramik

Geschwindigkeit > 10 m/min

Im Geschwindigkeitsbereich bis 100 m/min konnten bei Al₂O₃-Keramik wie bei Edelstahl schlanke nadelförmige Schweißnähte realisiert werden. Dies stellt eine hochproduktive Al-

ternative zum bisher praktizierten Zweistrahlverfahren dar. Mit einer Laserleistung von 430 W und einer Scangeschwindigkeit von 50 m/min wurden noch Einschweißstiefen bis 415 μm erreicht (Abb. 6.3.3.23 links). Die Schweißnähte waren bis zu einer Länge von 1mm rissfrei, bei längeren Nähten waren aufgrund der Kontraktion der Schmelze in der Schweißnaht Querrisse zu beobachten. Dieses Verhalten ließ sich umgehen, indem die Naht in einzelne sehr kurze Segmente unterteilt wurde. Hierzu wurden Stumpfstoßschweißungen mit Steppnähten mit einer maximalen Schweißnahtlänge von 1 mm bei einer Laserleistung von 430 W und Scangeschwindigkeit von 50 m/min realisiert. Diese erreichten eine Einschweißtiefe von 400 μm und eine deutlich geringere Rissneigung.

Ab einer Scangeschwindigkeit von 100 m/min konnte kein stabiler Tiefschweißprozess mehr beobachtet werden. Es bildeten sich zunehmend Risse im aufgeschmolzenen Material sowie ein Abtrag am Kopf der Schweißnaht (Abb. 6.3.3.23 rechts).



$v = 50 \text{ m/min}$

$v = 300 \text{ m/min}$

Abb. 6.3.3.23: Querschliffe von Blindschweißungen in Al_2O_3 -Substraten mit $P = 430 \text{ W}$ und $d = 21 \mu\text{m}$

Geschwindigkeit < 10 m/min

In dem Geschwindigkeitsbereich war vor allem eine starke Abhängigkeit der Festigkeit der Schweißverbindung von der Reinheit des Materials zu beobachten. Hochreine Keramik zerbrach oft bereits während der Bearbeitung. Bei der Keramik mit 96% Anteil an Al_2O_3 kam es hingegen nur vereinzelt zu Ausplatzungen und zum Zerschlagen der Substrate. Als problematisch bei den untersuchten Parameterkombinationen mit diesem Material erwies sich der Erstarrungsvorgang der Schmelze, der vom Rand der Schweißnaht zur Mitte hin gerichtet war. Im Schweißnahtzentrum, wo die Erstarrungsfronten aufeinander trafen, kam es oft zu keiner stoffschlüssigen Verbindung der Schmelze. Der so entstandene Spalt im Nahtinneren wirkte festigkeitsmindernd und

bei Belastung als Sollbruchstelle, so dass die Keramik entlang der Schweißnaht zerbrach. Die Blindschweißungen in Keramik mit 93% Anteil an Al_2O_3 erbrachten die beste Nahtqualität, sie wiesen wesentlich weniger Hohlräume und Risse in der Schweißnaht auf. Die erstarrte Schmelze ähnelte in Farbe und Struktur dem Grundmaterial und wies eine gute Anbindung an das Substrat auf. Es konnte bei allen drei Materialarten jedoch keine ideale Parameterkombination ermittelt werden, die ein konventionelles, rissfreies Schweißen der Aluminiumoxidkeramik bei Geschwindigkeiten unter 10 m/min erlaubt hätte (Abb. 6.3.3.24). Der durch den zu hohen Energieeintrag im Material entstandene Temperaturgradient und die damit verbundenen Spannungen im Werkstoff führten stets zur Rissbildung.

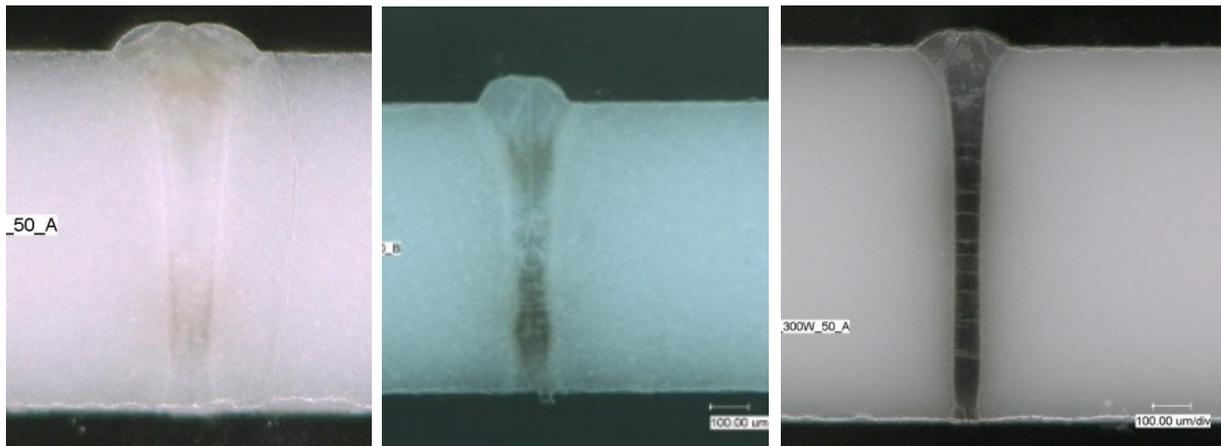


Abb. 6.3.3.24: von links nach rechts Blindschweißung Keramik mit 93% , 96% und 99,6% Anteil an Al_2O_3 (Laserleistung 300W, Scangeschwindigkeit 3 m/min)

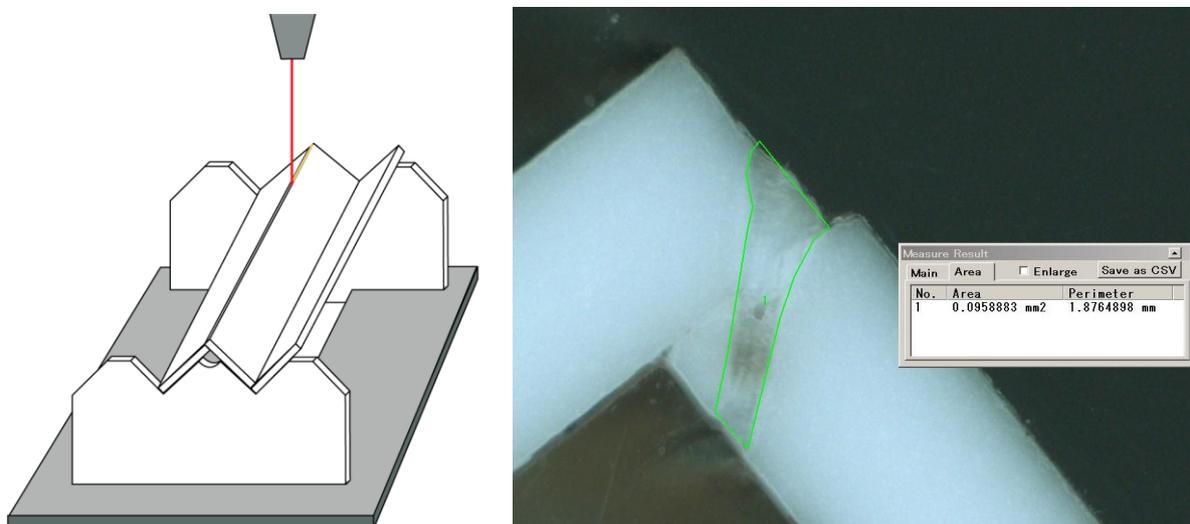


Abb. 6.3.3.25: links: Halterung zur Schweißung einer Winkelgeometrie mit einer Nahtlänge von 30 mm; rechts: Schweißnaht (Laserleistung 1000 W, Scangeschwindigkeit 5 m/min)

Es wurden weiterhin Untersuchungen zum Stumpfstoßschweißen durchgeführt. Dafür wurde Keramik mit 96% Anteil an Al_2O_3 und einer Dicke von 0,63 mm verwendet. Die Halterung musste die erhöhten thermischen Anforderungen erfüllen und war deshalb auch aus Keramik aufgebaut (Abb. 6.3.3.25). Konventionelle Methoden wie Spannbacken oder Klemmhalter führten infolge der Wärmeleitung zu einem Abtransport von Wärme und begünstigten dadurch die Ausbildung von Temperaturgradienten im Material. Dies wiederum führte zur verstärkten Rissbildung. Bei der qualitativen Beurteilung der Schweißnähte auf Risse und Ablätzungen (Fuchstest) wurde festgestellt, dass 59% der erzeugten Teile Risse aufwiesen.

Zusammenfassung

Das Ziel des Teilprojektes wurde erreicht und damit eine neuartige Rapid Tooling Technologie für die Produktion von Mikroteilen, Reparatur von Bauteilen und Werkzeugen im Fein- und Mikrobereich, sowie Strukturierung von Oberflächen im Submillimeterbereich entwickelt. Dabei stellte sich sowohl die erstmalige Verwendung eines gepulsten Faserlasers zum Micro Cladding, als auch die einmalige Kombination von Scanner und Roboter zur Strahl- und Probenbewegung als innovativ heraus. Die erzielten Ergebnisse dienen auch als Basis für die Entwicklung neuer Technologien, die gezielt für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Es sind sowohl eine Steigerung der Baurate als auch die Vergrößerung der mit dem Scanner bearbeitbaren Fläche möglich, um schnell und großflächig Oberflächen modifizieren und strukturieren zu können. Ebenso besteht noch viel Potential zur Steigerung von Auflösung und Komplexität von 3D Strukturen, die die Technologie zum Generieren von elektrischen Leitbahnen oder die Modifizierung von Turbinenbauteilen interessant macht.

In Edelstahl konnten qualitativ hochwertige Mikro-Schweißnähte bis zu einer Geschwindigkeit von 100 m/min erzeugt werden. Bei Keramik war bei einer Schweißgeschwindigkeit unter 10 m/min die eingebrachte Streckenenergie wesentlich zu hoch, so dass es immer zu einzelnen Rissen kam. Bei hohen Schweißgeschwindigkeiten über 10 m/min konnte die Streckenenergie jedoch soweit reduziert werden, dass kurze rissfreie Mikro-Schweißnähte realisierbar waren. Sehr hohe Geschwindigkeiten über 100 m/min führten jedoch zum Abtrag in der Schweißnaht. Das Potential, z.B. für die Mikrosystemtechnik, bei der schlanke, kurze Mikro-Schweißnähte in Keramik benötigt werden, ist als hoch einzuschätzen, auch wegen der sehr geringen thermischen Belastung des Bauteils und der hohen Produktivität des Verfahrens.

Nachtrag

Nach Beendigung der technologischen Entwicklungen im Projekt wurde in einem Eigenprojekt des Kooperationspartners Laserinstitut Mittelsachsen e.V. (Dipl.-Ing. (FH) Martin Erler) nachgewiesen, dass die neuartige Micro Cladding Technologie auch auf dünnen Blechen (Dicke 100 μm) anwendbar ist. Es war kein Verzug des Substrates festzustellen. Weiterhin wurde erstmalig eine innovative Breitstrahldüse zum schnellen Aufbau von langen Mikro-Wänden erprobt. Es konnte damit eine Wand mit einer Länge von 40mm und einer Höhe von 0,7 mm in 20 s aufgebaut werden. Dies entspricht einer Volumenbaurate von ca. 6 mm^3/min . Eine weitere Skalierung ist mit Erhöhung von Scangeschwindigkeit, Pulsfrequenz und Laserleistung möglich. Derzeit wird an einer Umsetzung der Technologie mit industriellen Partnern gearbeitet.

6.4 Arbeitspaket 4 – Lasermikrostrukturieren

6.4.1 Ziel des Arbeitspaketes

AP 4.1 Integration von neuartigen Messprinzipien in das Verfahren

Der Anspruch des Arbeitspaketes bestand darin, die bei der Lasermikrostrukturierung erreichbare Bearbeitungsqualität hinsichtlich Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit deutlich zu verbessern. Der Abtragprozess wird von einer Vielzahl von Laser-, Prozess- aber auch Materialparametern beeinflusst, so dass die Laserstrukturierung nur bedingt genau stattfinden kann. Durch die Integration von geeigneter Messtechnik in den Bearbeitungsablauf sollten direkt nach dem Laserprozess vorgegebene Sollwerte ortsgenau (quasi „*in-situ*“) mit der real erreichten Abtraggeometrie verglichen werden. Die „*in-situ*“-Bestimmung der Höhenwerte durch Integration des Messgerätes in den Versuchsaufbau hätte den Vorteil, dass zur Messwertbestimmung das Werkstück nicht mehr aus der Werkstückhalterung entnommen werden muss und die Ortsinformation der abgetragenen Struktur durch die Messung nicht verloren geht. Es sollte die Möglichkeit geschaffen werden, festgestellte Abweichungen der abgetragenen Struktur vom Sollwert direkt im Anschluss innerhalb eines nachträglichen Feinbearbeitungsschrittes positionsgenau auszugleichen. Mit der neu zu entwickelnden Verfahrenstechnologie sollten sowohl Höhen- als auch Geometriedaten von lasermikrostrukturierten Oberflächen direkt mit in den Abtragprozess einfließen, was zu äußerst maßhaltigen und damit qualitativ hochwertigen Bearbeitungsergebnissen führen sollte. Als einzusetzende Messverfahren wurde eine berührungslos messende Technologie gewählt, da eine taktile Abtastung meist mit einer Beeinflussung der Werkstückoberfläche durch den Tastkörper einhergeht. Es galt die Eignung und Stabilität des gewählten Messprinzips zur Höhen- als auch vertikalen Messung nachzuweisen und die Auflösungsgrenzen des Verfahrens zu bestimmen.

AP 4.2 Abtrag mit hochrepetierender Femtosekundenlaserstrahlung

Es waren Untersuchungen zur Lasermikrostrukturierung unter Einsatz moderner Ultrakurz-puls-Lasertechnik mit dem Ziel geplant, eine geeignete Bearbeitungsstrategie zur hochauflösenden dreidimensionalen Lasermikrobearbeitung zu entwickeln. Aus den gewonnenen Erkenntnissen war eine Verfahrenstechnologie abzuleiten, die unterstützt durch innovative Messtechnik die schnelle und hochpräzise Lasermikrobearbeitung gewährleistet. Am Projektende sollte dem Anwender eine Bearbeitungstechnologie bereit stehen, die das schnelle Herstellen von hochqualitativen, dreidimensionalen Mikrostrukturen oder auch mikrotexturierten Oberflächen ermöglicht. Entsprechend den formulierten Zielvorgaben untergliederte sich das Arbeitspaket in folgende Teilbereiche:

Aufbau des Versuchsstandes

Es sollte eine Lasermikrobearbeitungsanlage mit dem Ziel der Herstellung komplexer dreidimensionaler Mikrostrukturen konzipiert, konstruiert und aufgebaut werden. Die Anlage soll-

te teilprojektübergreifend in den Arbeitspunkten AP 4.1 Lasermikrosintern mit Femtosekunden-Laserstrahlung sowie AP 4.2 3D Schneiden von transparenten Materialien genutzt werden.

Grundlegende Untersuchungen

Bei Anwendung hoher Repetitionsraten waren infolge der sehr kurzen Pulsfolgezeiten neuartige Effekte der Laserstrahl-Materie-Wechselwirkung und folglich auch eine bis dahin unerforschte Beeinflussung des Bearbeitungsprozesses zu erwarten. Am Beispiel Edelstahl sollte in zunächst grundlegenden Untersuchungen der Einfluss der Pulswiederholfrequenz, der beaufschlagten Laserfluenz sowie der geometrischen Bearbeitungsparameter auf den Abtragprozess untersucht werden.

Untersuchungen an verschiedenen Materialien

Aufbauend auf den bei der Bearbeitung von Edelstahl gewonnenen Erkenntnissen sollten die Untersuchungen auf andere Metalle ausgeweitet werden. Zur genaueren Untersuchung und Beschreibung des stattfindenden Wechselwirkungsmechanismus sollten Metalle unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften gewählt werden. Das waren Kupfer mit einem gegenüber Edelstahl deutlich höheren Wärmeleitvermögen sowie hoher Schmelz-/ Siedetemperatur und Aluminium mit einem hohen Wärmeleitvermögen sowie einer geringen Schmelz-/ Siedetemperatur. Weiterhin waren verschiedene Kunststoffe und Keramiken für spezielle Anwendungen im Fokus der Untersuchungen.

Optimierung der Oberflächenqualität

Im Gegensatz zur Ultrakurzpulsbearbeitung im kHz-Bereich kommt es bei Anwendung hoher Repetitionsraten z.B. zur Abschirmung des nächstfolgend eingestrahnten Laserpulses in der durch den vorangehenden Puls induzierten und im Zeitbereich noch existenten Ablationswolke. Andererseits bewirken Wärmeakkumulationseffekte eine stetige Erwärmung bis hin zum Aufschmelzen des bestrahlten Materials, da die eingetragene Wärme vor Eintreffen des nächsten Pulses als Folge der begrenzten Wärmeleitung nicht schnell genug ins Werkstück abfließen kann. Es entstehen Randaufschmelzungen oder auch große wärmebeeinflusste Bereiche, so dass das Bearbeitungsergebnis sich nicht deutlich von dem durch cw-Laserbearbeitung erzielten unterscheidet. Umfangreiche Untersuchungen zum Einsatz eines hochrepetierenden Femtosekundenlaser mit dem Ziel des schmelzfreien Abtrages sowie die anschließende Optimierung der Bearbeitungsparameter zum Erhalt möglichst glatter Oberflächen dreidimensionaler Lasermikrostrukturierung waren die Hauptaufgaben im Teilprojekt.

Erzeugung von 3D Strukturen

Es sollte eine Verfahrensstrategie zur schnellen Herstellung beliebig dreidimensional strukturierter Oberflächen und Körper entwickelt werden. Neben der Auswahl geeigneter Laserbearbeitungsparameter war die besondere Herausforderung die Synchronisation von Laser- und Scannersystem. Weitere Probleme konnten die aufgrund der möglichen hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten auftretenden kurzen Schaltzeiten sowie das Beschleunigungs-

verhalten des Scannerspiegels während der Beschleunigungs- bzw. Abbremsphasen bereiten. Über eine intelligente Prozessführung in Verbindung mit einem zu entwickelnden Pulspicker zum schnellen Schalten des Laserstrahles sollte die Realisierung auch komplexer dreidimensionaler Mikrostrukturen möglich werden.

Ermittlung der grundlegenden Auflösungsgrenze für das Verfahren

Die laterale Auflösungsgrenze des Verfahrens ist insbesondere von den Bestrahlungsparametern abhängig und sollte für verschiedene Bearbeitungsstrategien bestimmt werden.

AP 4.3 Erzeugung von definierten Oberflächeneigenschaften

Im Vordergrund standen Untersuchungen zur Glättung bzw. zum gezielten Aufräumen der Oberfläche. Weiterhin sollte untersucht werden, inwieweit eine werkstofftechnische Modifikation der Oberfläche als Folge der Laserbestrahlung möglich ist. In den Untersuchungen sollte neben dem Femtosekundenlaser auch der Kurzpulslaser eingesetzt werden.

AP 4.4 Hochleistungsvolumenabtrag

In diesem AP sollten zunächst zwei Verfahrensvarianten zur Hochleistungsbearbeitung mit einem Hochleistungs-cw-Faserlaser untersucht werden. Dazu sollte ein Versuchsaufbau mit jeweils einem Galvo- und einem Polygonspiegelscanner erstellt werden. Als Strahlquelle wurde ein Laser mit einer kontinuierlicher Strahlleistung von 3 kW und einer Strahlqualität von mindestens $M^2=1,2$ gewählt. Weitere Anforderungen an die Bearbeitungsanlage waren ein schwingungsfreier Aufbau, ausreichender Laserschutz sowie ein staubgeschützter Optikbereich. Außerdem sollte die Anlage so flexibel gestaltet sein, dass die anderen Arbeitspakete des Projektes zum Thema Hochleistungslaserbearbeitung (Hochleistungslasermikrosintern, 2D Hochleistungsschneiden, Hochleistungsmikropulverauftragschweißen) ebenfalls mit in dem Versuchsaufbau realisiert werden konnten.

2,5 D Mikrostrukturierung

Die Grundlagen für die 2,5D Strukturierung sowie die prozessrelevanten Parameter sollten durch Scannen von Linien ermittelt werden. Anschließend sollten die geeigneten Parameter für die Strukturierung umgesetzt werden. Als Ziel war eine Flächenrate von bis zu $3.000 \text{ cm}^2/\text{min}$ zu erreichen. Das Verfahren sollte an einem breiten Materialspektrum untersucht werden (Metalle, Keramiken, Kohlenstoff, Diamant, c-BN).

3D Mikrostrukturierung

Die 3D Mikrostrukturierung sollte durch die Realisierung einer schnellen Strahlschaltung ermöglicht werden. Der Laserstrahl sollte dazu linienförmig über das zu bearbeitende Material gescannt werden und punktuell (Pixel) zugeschaltet werden. Durch mehrere Bestrahlungen sollte der Abtrag in die Tiefe realisiert werden. Die zu erreichende Volumenrate sollte bei $1,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ liegen. Es soll ebenfalls ein breites Materialspektrum untersucht werden (Metalle, Keramiken, Kohlenstoff, Diamant, c-BN).

AP 4.5 Hochleistungsoberflächenbearbeitung

Bei der Oberflächenbearbeitung sollte ebenfalls eine Flächenrate von $3.000 \text{ cm}^2/\text{min}$ erreicht werden. Weiterhin waren Untersuchungen zur Materialmodifizierung, zur Nanostrukturierung und zur Oberflächenaktivierung geplant. Als weitere Ziele im Arbeitspaket waren die Modifizierung des Versuchstandes zur Erzielung einer hohen Auflösung (neue Steuerung, hohe Schaltfrequenzen, höhere Prozesssicherheit bzw. -stabilität durch Strahlüberwachung, Schutz der Strahlschaltungskomponenten) sowie die Erzielung einer hohen Auflösung besser $30\mu\text{m}$ definiert.

6.4.2 Verwendung der Zuwendung

AP 4.1 - 4.3 Messprinzipien/Abtrag/Oberflächeneigenschaften

Die Untersuchungen zu den Messprinzipien, zum Abtrag mit Ultrakurzpuls-Laserstrahlung und zu den Oberflächeneigenschaften wurden an dem zu Beginn des Projektes aufgebauten und arbeitspunktübergreifend eingesetzten Versuchstand durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen Hartsteinaufbau mit Stahluntergestell, der bereits in Kapitel 6.2.2. AP 2.1 ausführlich vorgestellt wurde.

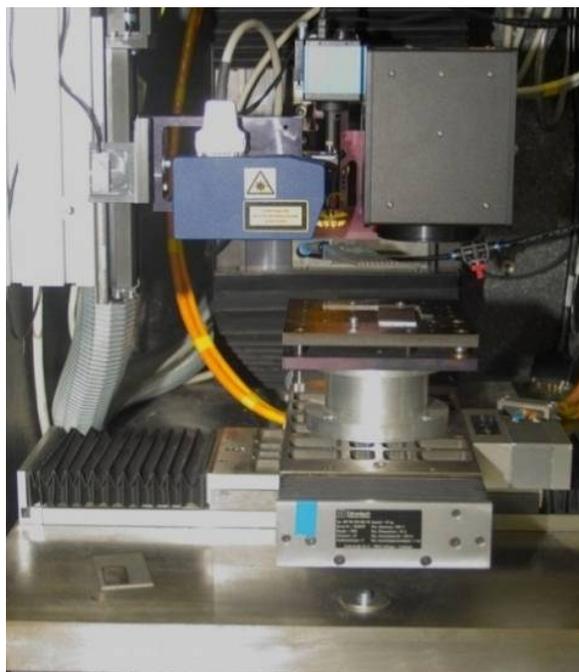


Abb. 6.4.2.1: *Bearbeitungskammer zur Lasermikrostrukturierung mit Galvanometer-scanner, XY-Positioniertisch sowie zusätzlicher Positionierachse zur Höhenausrichtung des konfokalen Präzisionssensors CF 4*

Neben den beschriebenen Kernkomponenten der Mikrobearbeitungsanlage wurden zur präzisen Höhenmessung zwei neuartige, sich in ihren Eigenschaften ergänzende und auf optischen Messprinzipien beruhende Profilometer (konfokaler Abstandssensor CF4 - Fa. nanoFocus, Triangulationssensor LKG-32 - Fa. Keyence) angeschafft. Das zusätzlich in den Versuchstand (Abb. 6.4.2.1) integrierte Achssystem ermöglichte dabei die schnelle und präzise Positionierung der Sensoren relativ zur Werkstückoberfläche, wodurch die Messtechnik flexibel und unabhängig von der Scannerspiegelposition oder der Werkstückhöhe eingesetzt werden konnte. Die zusätzliche Ausstattung der Positionierachse mit einem hochpräzisen Messsystem ermöglicht die Positionierung der Sensoren mit einer Genauigkeit von besser $1 \mu\text{m}$; der Verfahrweg der Achse in Z-Richtung beträgt 10 mm . Die Sensoren wurden über eine Schnellwechselplatte an der

Positionierachse befestigt, so dass sowohl der Triangulationssensor als auch der konfokaler Sensor schnell und ohne zusätzlichen Justageaufwand getauscht werden konnten. Einen weiteren wichtigen Fortschritt hinsichtlich der hochpräzisen und schnellen Auswertung lasergefertigter 3D Strukturen stellte die Anschaffung der umfangreichen Auswertesoftware μ Soft der Fa. nanoFocus dar, mit der neben der Bestimmung von Höhendaten und Rauheitsparametern die Messergebnisse auch in dreidimensionaler Darstellung gezeigt werden können. Durch eine Software-Erweiterung bestand zudem die Möglichkeit, sowohl Daten des CF-4- als auch des LK-G32 - Sensors auszuwerten.

AP 4.4 und 4.5 Hochleistungsvolumenabtrag / -oberflächenbearbeitung

Zur Durchführung der geplanten Untersuchungen wurde eine weitere völlig neue Anlage zur Hochleistungslaserbearbeitung von der Forschungsgruppe aufgebaut (Abb. 6.4.2.2 links). Auch diese besteht aus einem Hartsteinaufbau mit Stahluntergestell. Um flexibel und ohne Umbauten die verschiedenen Laserverfahren umsetzen zu können, wurde der Aufbau in drei Bereiche unterteilt. Im ersten Bereich befand sich eine Vakuumkammer für definierte Atmosphären, die in den Untersuchungen zum Hochleistungslasermikrosintern zum Einsatz kam. Im zweiten Bereich wurde ein Linearachssystem der Firma Aerotech zur Positionierung und bzw. schrittsynchronen Laserbearbeitung mit Achsen eingebracht. Zur schnellen Strahl- ablenkung kamen zusätzlich zwei Scanner zum Einsatz:

Galvanometerscanner

Bei dem Galvoscanner handelte es sich um einen von der Firma Raylase eigens für die Forschergruppe entwickelten Superscan-SC-30-Y (Abb. 6.4.2.2 rechts). Um hohe Ablenkgeschwindigkeiten zu realisieren, wurde der Scanner mit leichten SiC-Spiegeln ausgestattet. Durch eine optimal angepasste Strahlaufweitung und eine Brennweite der verwendeten F-Theta-Optik von 230 mm konnte ein minimaler Fokusdurchmesser von 21 μ m erreicht werden. Das Arbeitsfeld beträgt 50 x 50 mm². Der Laserstrahl kann bei der Brennweite diagonal mit bis zu 1.200 m/min abgelenkt werden.

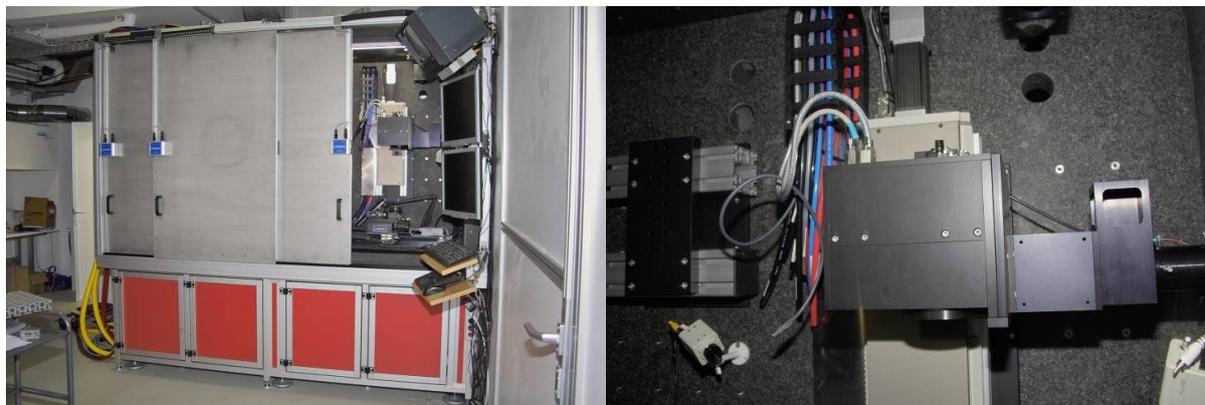


Abb. 6.4.2.2: links: Gesamtansicht Anlage zur Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung, rechts: Galvoscaner Superscan-SC-30-Y

Polygonspiegelscanner

Das zweite Scansystem war eine Eigenentwicklung der Forschergruppe bestehend aus einem Polygonspiegelscanner zur ultraschnellen Ablenkung des Laserstrahles und einem Galvanometerscanner zur Weiterschaltung der Scanlinien, was in Kombination mit der F-Theta-Optik eine flächige Bearbeitung ermöglichte (Abb 6.4.2.3 rechts). Bedingt durch den großen Spiegelabstand zwischen dem Polygon- und dem Galvoscanner konnte nur ein rechteckiges Bearbeitungsfeld der Größe $40 \times 60 \text{ mm}^2$ erreicht werden. Die Positioniergenauigkeit des Scanners konnte durch einen hochgenauen Positionsdetektor auf besser $3 \mu\text{m}$ gebracht werden. Der Polygonspiegelscanneraufbau hat den Vorteil, dass man im Gegensatz zu anderen ultraschnellen Strahlableitungs-Systemen, wie z.B. Resonanzscannern oder einer akustooptischen Strahlableitung, einen sehr großen Geschwindigkeitsbereich nutzen kann. Die Ablenkgeschwindigkeit verhält sich linear zu Drehfrequenz. Die ermittelten Ablenkgeschwindigkeiten mit der vorhandenen F-Theta Optik bewegten sich von 1.110 m/min bei einer Drehfrequenz von $7,5 \text{ Hz}$ bis zu 24.540 m/min bei 166 Hz . In Abbildung 6.4.2.3 links ist der Aufbau des Polygonspiegelscansystems mit einer weiteren F-Theta-Optik mit Brennweite 330 mm , die separat angeschafft wurde, gezeigt. Mit ihr konnte ein Scanfeld von $150 \times 100 \text{ mm}^2$ bei einer maximalen Scangeschwindigkeit von 45.000 m/min bearbeitet werden. Der Fokusdurchmesser betrug dabei $30 \mu\text{m}$.

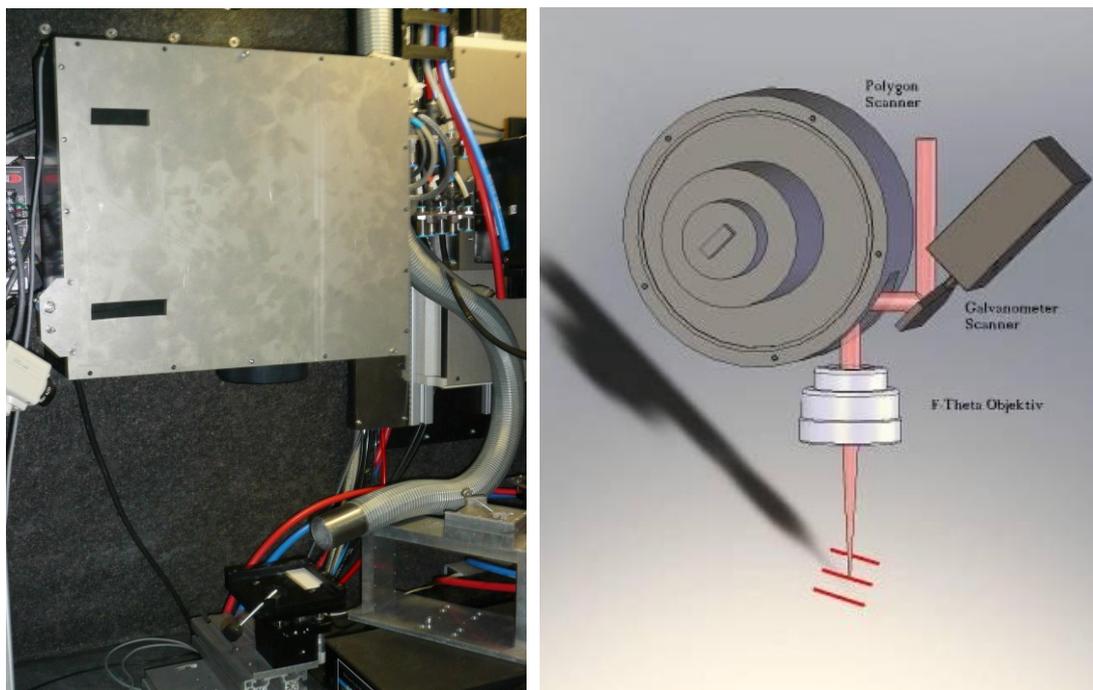


Abb. 6.4.2.3: links: Polygonspiegelscanneraufbau mit F-Theta-Optik Brennweite 330 m , rechts: Prinzipdarstellung Strahlführung

Der dritte Bereich der aufgebauten Versuchsanlage wurde als optische Bank gestaltet und diente der Auskopplung der Laserstrahlung aus der Laserquelle sowie der Strahlführung, der Strahlschaltung und der Leistungsmessung (Abb. 6.4.2.4).

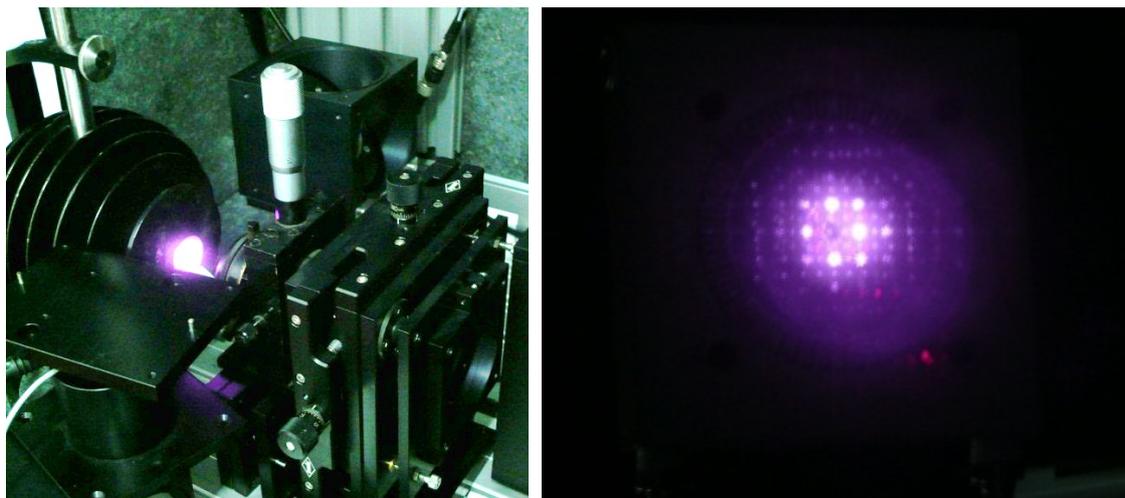


Abb. 6.4.2.4: links: optische Bank mit Strahlaufweitung und Leistungsmesskopf, rechts: Beugungsbild nach Strahlschaltung

Weiterhin wurde ein vorhandener Hartsteinportalaufbau genutzt, um den im Projekt angeschafften Remote Laser Schweißkopf RLSK-Galvoscanner der Firma HIGHYAG Lasertechnologies anzubringen (Abb. 6.4.3.5). Durch seinen speziellen Aufbau mit integrierter z-Achse zur Fokuspachführung im Bereich ± 100 mm, einer Planfeldoptik der Brennweite 500 mm sowie luft- und staubdichten Strahleintritt bzw. -austritt ist dieser Scanner besonders für einen industriellen Einsatz geeignet. Die Arbeitsfläche des Scanners beträgt 200×300 mm² für die Position $z = 0$. In Abstimmung mit dem Hersteller konnte die Sprunggeschwindigkeit von 600 m/min auch für den Normalbetrieb frei geschaltet werden. Der Fokusbereich wurde zu 78 μ m bestimmt, nach einem optischen Redesign beträgt er nunmehr 52 μ m.



Abb. 6.4.2.5: links: zweite Anlage zur Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung, rechts: Galvoscanner RLSK

Als Laserquelle wurde ein Monomodefaserlaser YLR-3000-SM der Firma IPG mit einer Laserleistung von bis zu 3 kW bei einer Strahlqualität von $M^2 = 1,2$ in die beiden Anlagen integriert. Die Umschaltung erfolgt durch Umstecken der Faser. Die beiden Versuchsanlagen wurden mit erheblichem Aufwand (Strahlsensoren) lasersicher gestaltet und umfassend

messtechnisch charakterisiert. Dabei wurden auch äußere Einflüsse auf die Ausbildung des Strahlfokus, z.B. die Verschmutzung des Schutzglases (Abb. 6.4.2.6), intensiv untersucht.

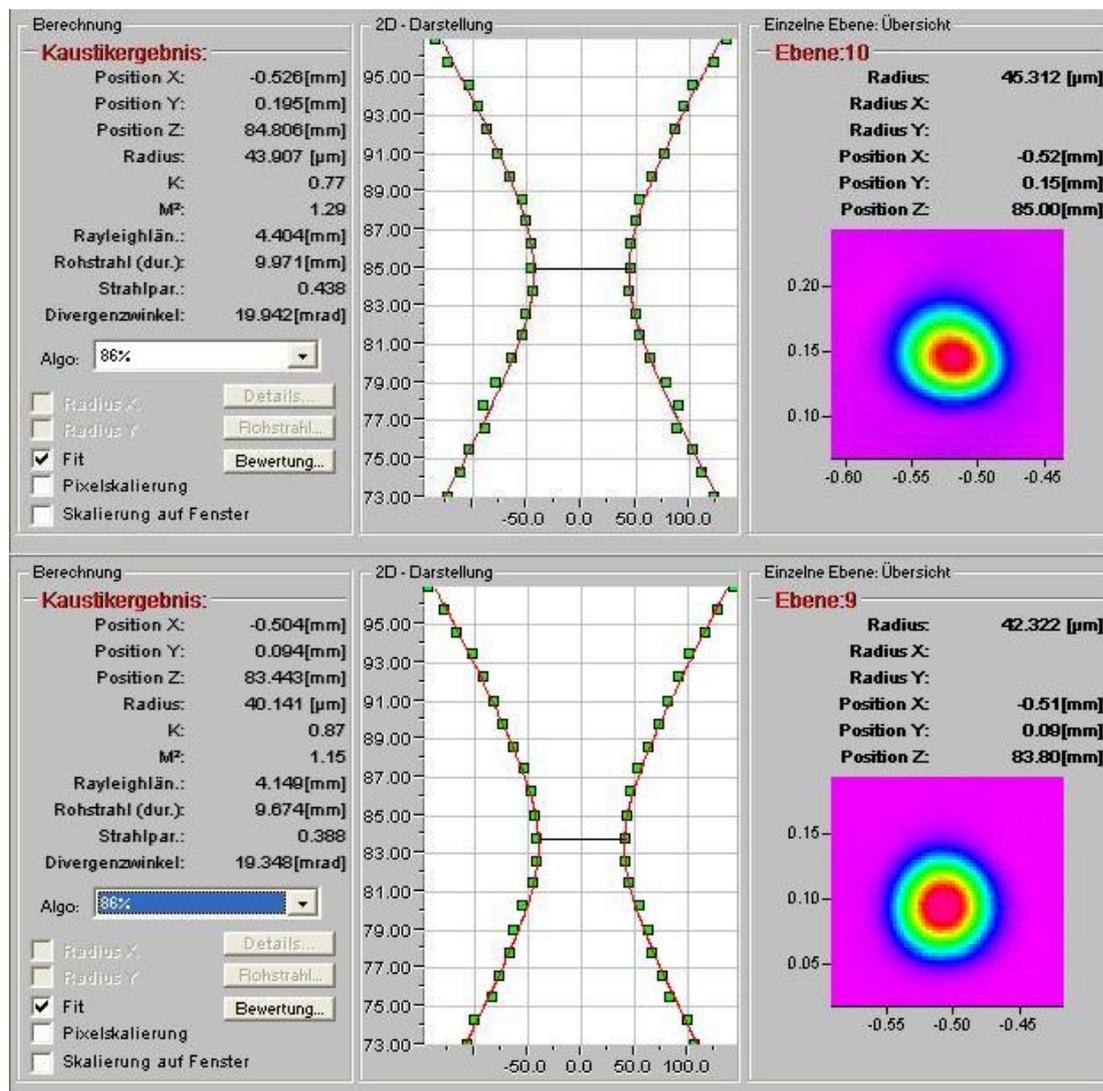


Abb. 6.4.2.6: Messprotokoll Strahlkaustik, Brennweite $f = 500\text{mm}$, Laserleistung 300 W, Schutzglas neu (unten) und alt (oben)

An den Anlagen wurden anschließend umfangreiche Untersuchungen zur 2,5D Lasermikrobearbeitung durchgeführt. Dazu wurden zunächst Abtraguntersuchungen an verschiedenen Materialien mit den beiden Galvoscanern bis zu Geschwindigkeiten von 1.200 m/min durchgeführt. In Auswertung und der Ergebnisse konnte das Abtragschneiden zur schnellen Erzeugung von Teilen aus dünnen Blechen demonstriert werden. Ebenso wurde die schnelle Texturierung von Oberflächen sowie die Erzeugung von Mikro-Kavitäten als Vorstufe zur 3D Laserbearbeitung gezeigt.

Nach Installation des Polygonspiegelscanners wurden umfangreiche Untersuchungen zum Abtragen mit ultraschneller Strahlableitung durchgeführt, ebenfalls an verschiedenen Materialien. Die ultraschnelle Bearbeitung von Oberflächen in Form der Erzeugung eines hochaufgelösten Linienmusters wurde ebenfalls gezeigt.

Der Nachteil des Systems war die limitierte interne Schaltfrequenz von nur 2 kHz. Um höhere Schaltfrequenzen zu erreichen, wurde in der Projektverlängerungszeit eine externe Strahl-schaltung mit AOM aufgebaut. Es konnte eine Laserleistung bis 2 kW mit einer Pulsfrequenz von 750 kHz geschaltet werden. Der An- bzw. Abschaltvorgang erfolgte innerhalb von 500 ns (Abb. 6.4.2.7). Außerdem ermöglichte der Aufbau eine flexible Pulsmodulierung.

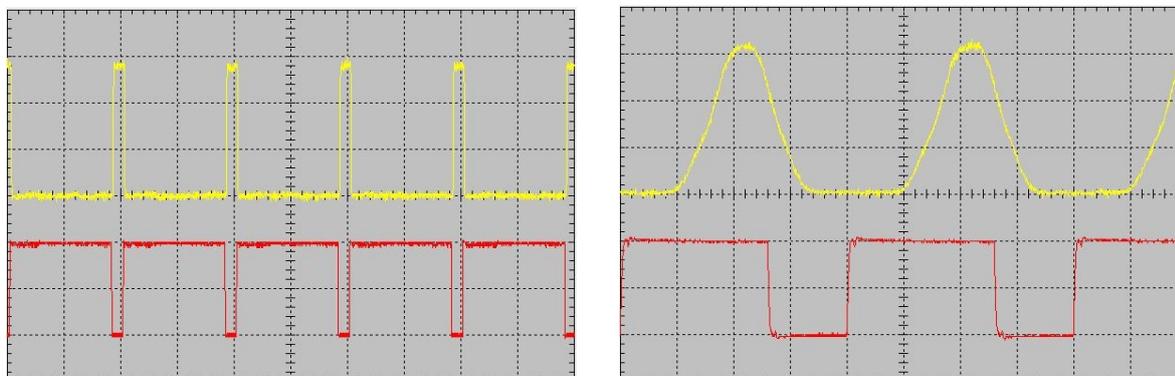


Abb. 6.4.2.7: Messkurve (rot: Steuersignal, gelb: Laserleistung), links: Pulsfrequenz 10 kHz (Pulslänge 10 µs), rechts: Pulsfrequenz 500 kHz (Pulslänge 500ns), Laserleistung 200 W

Die Ansteuerung von Festfrequenzscannern (Polygonspiegel- und Resonanzscanner) stellt auf Grund ihrer sehr hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit und ihrer grundsätzlich anderen Funktionsweise erhöhte Anforderungen an die Ansteuerung der Komponenten, die sich mit herkömmlichen Galvanometer- und CNC-Steuerungen nicht erfüllen lassen. Deshalb wurde ebenfalls in der Zeit der Projektverlängerung eine neuartige Steuerung entwickelt. Der Vorteil der innovativen Steuerung war die völlige Unabhängigkeit des Prozesses von der Anzahl der Spiegelsegmente, der Auflösung des Dreh-Encoders und der Dreh- oder Schwinggeschwindigkeit des Spiegels. Für die Steuerung wurde ein Schutzrecht beantragt.

6.4.3 Ergebnisse

AP 4.1 Integration von neuartigen Messprinzipien in das Verfahren

Auswahl der Sensoren

Zunächst wurden mehrere nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien arbeitende Abstandssensoren verschiedener Hersteller hinsichtlich ihrer Eignung zur Höhenmessung für die Mikrostrukturierung begutachtet. In umfangreichen Untersuchungen wurden sowohl an transparenten als auch an diffus oder stark reflektierenden Oberflächen das vertikale und laterale Auflösungsvermögen, die Messgeschwindigkeit sowie die Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen bestimmt. Weitere Kriterien zur Auswahl der Sensoren waren die Schichterkennung in transparenten Medien, der Arbeitsabstand, der Messbereich sowie hinsichtlich der geplanten industriellen Überführung der entwickelnden Technologie auch die Anschaffungskosten.

Die Auswertung der aufgenommenen Messreihen zum Messverhalten von nach dem Triangulationsprinzip messenden Sensoren ergab, dass sowohl mit einem Sensor der Fa. Keyence (LK-G32) als auch mit einem Vergleichsgerät reflektierende, streuende und auch transparente Medien gemessen werden konnten. Problematisch bei beiden Sensoren war die Messung hochtransparenter Körper, was sich physikalisch im Messprinzip begründet. Der Keyence-Sensor zeigte in seinen Absolutmessdaten gegenüber dem Vergleichsgerät eine höhere Messgenauigkeit. Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wurde für beide Sensoren bei einer Standardabweichung der Einzelmesswerte vom Mittelwert von rund 0,005% vergleichbar gut bestimmt. Der entscheidende Vorteil des Keyence-Sensors war das Erkennen von Schichten in transparenten Medien, was eine Schichtdickenmessung ermöglichte.

Die untersuchten konfokalen Messsysteme zeigten ein unbefriedigendes Messverhalten. Problematisch war vor allem das Messen von rauen, stark streuenden Oberflächen, wie sie bei der Laserbearbeitung zu erwarten sind. Insbesondere bei polychromatisch messenden Sensoren kam es messprinzipbedingt infolge der nach der Laserbearbeitung veränderten Oberfläche zu einem stark abweichenden Reflexionsverhalten, was zu fehlerhaften Messwerten führte.

Für weitergehende Untersuchungen wurden seitens der Firma nanoFocus ein weiterer Triangulationssensor sowie zwei nach dem konfokalen Prinzip arbeitende Sensoren bereitgestellt. Der Triangulationssensor entsprach in seinen Eigenschaften bis auf die fehlende Option der Schichterkennung in transparenten Medien denen des bereits untersuchten Sensors. Der hochauflösende chromatische Sensor zeigte auch die bereits für den chromatischen konfokalen Sensor beschriebenen Probleme der Messwertbestimmung an laserbearbeiteten Oberflächen. Mit dem konfokalen Sensor CF 4 dagegen war das hoch aufgelöste Messen an laserbearbeiteten Oberflächen problemlos möglich.

Auf Grundlage der in den Voruntersuchungen erzielten Ergebnisse wurden letztendlich zwei sich in ihren Messeigenschaften ergänzenden Abstandssensoren angeschafft und in die Anlage eingebaut. Der Triangulationssensor LK-G32 von Keyence ist vorrangig für das Messen an stark streuenden Oberflächen geeignet und wurde dank seines großen Messbereiches von 10 mm bei einer spezifizierten vertikalen Auflösung von 0,05 μm für die präzise Abstandsbestimmung bei größeren Messabständen eingesetzt. Messungen zur Höhenbestimmung an definierten Probekörpern zeigten, dass die Abweichungen der Absolutmesswerte mit 1...4 μm im Bereich der spezifizierten Absolutmessgenauigkeit des Sensors mit < 5 μm lag. Die Reproduzierbarkeit der Höhenmessung wurde durch Mehrfachmessungen an technischen Oberflächen auf eine Schwankung der Einzelmesswerte < 1 μm bestimmt. Die Messgenauigkeit des angeschafften konfokalen Sensors CF 4 der Firma nanoFocus wurde auf besser 0,5 μm bestimmt. Verfahrensbedingt traten für beide Sensoren an steilen Kanten größere Messwertschwankungen auf.

Da für die Messung der Oberflächen Profile benötigt wurden, wurde für einen linienförmigen oder flächigen Oberflächenscan der Probekörper alternierend punktuell abgetastet bzw.

lateral mittels einem hochpräzisen Positioniertisch um wenige μm verfahren. Die einzelnen Messwerte wurden per Software erfasst und zu einem Oberflächenprofil zusammengesetzt.

Auflösungsvermögen und Messwertstreuung

Abb. 6.4.3.1 reflektiert das unterschiedliche Messverhalten der beiden angeschafften Sensoren. Im Vergleich der aufgenommenen Profile wird der Einfluss des Messprinzips auf das Messergebnis deutlich.

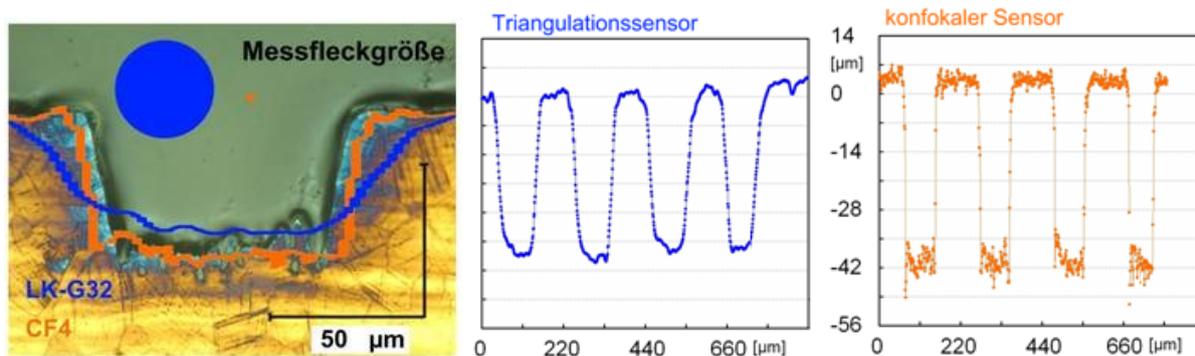


Abb. 6.4.3.1: Höhenmessung an einer lasergefertigten Grabenstruktur; links: Vergleich der Sensormessdaten und Querschliff; blauer Kreis und roter Punkt verdeutlichen die Messpunktgröße der unterschiedlichen Verfahren im Verhältnis zur Grabenstruktur, Mitte: Messwertprofil Triangulationssensor, rechts: Messwertprofil konfokaler Sensor.

Wie der Profilverlauf zeigt, wurden mit dem Triangulationssensor die steilen Kanten verschliffen und entsprechend eine geringere Konturschärfe erreicht. Zudem konnten mit dem Verfahren die im Schliffbild am Grabenboden deutlich sichtbaren Mikroformationen nicht aufgelöst werden. Die Ursache dafür ist das Triangulations-Messprinzip, bei dem zur Gewinnung der Höheninformation die zur Seite diffus rückgestreuten Strahlungsanteile ausgewertet werden. Kam es an unregelmäßigen Oberflächen zu Mehrfachreflexionen und / oder Abschattungen des einfallenden Strahls, so waren, wie im Beispiel gezeigt, abweichende Messwerte zu erwarten. Verfahrensbedingt beeinflusste zudem neben dem im Verhältnis zum Messobjekt mit $30\ \mu\text{m}$ relativ ausgedehnten Messfleck auch die Änderung des Messfleckdurchmessers im Messbereich die Höhenmessung.

Im Gegensatz zum Triangulationsverfahren zeigte die konfokale Messmethode die detailgetreue Wiedergabe der Abtragstruktur. Da das konfokale Messprinzip die in Strahlachse rückreflektierten Strahlungsanteile auswertet, kam es einzig an steilen Kanten oder scharfen Eckpunkten infolge der dort undefiniert gerichtet erfolgenden Rückstreuung des Messstrahles zur fehlerhaften Detektion der Höhenwerte bis hin zum Signalverlust. Mit dem CF4 – Sensor waren Mikrostrukturen im Bereich kleiner $20\ \mu\text{m}$ durch die geringe Messfleckgröße $< 2\ \mu\text{m}$ detailgetreu aufzulösen.

Die Prozessstabilität wurde mit dem Konfokal-Profilometer an einem in Edelstahl laserstrukturiertem 3D Profil bestimmt (Abb. 6.4.3.2). Die statistische Auswertung zeigte eine gemit-

telte Abtragtiefe horizontal über den Profilquerschnitt von 94,0 μm bei einer Streuung der Messwerte (Standardabweichung) von 0,39 μm .

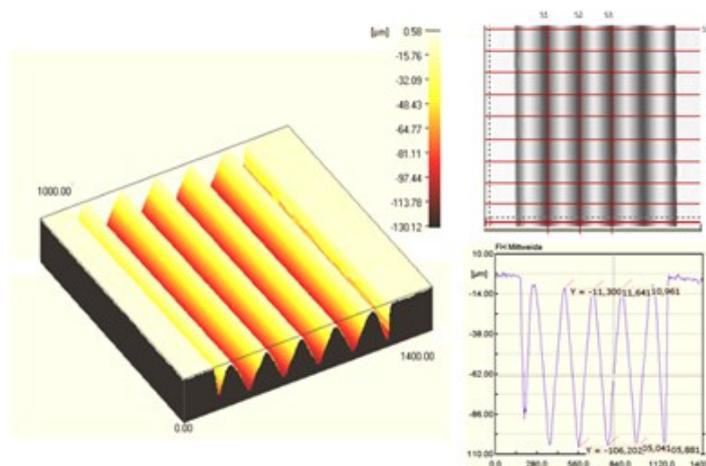


Abb. 6.4.3.2: 3D Struktur zur Bestimmung der Prozessstabilität

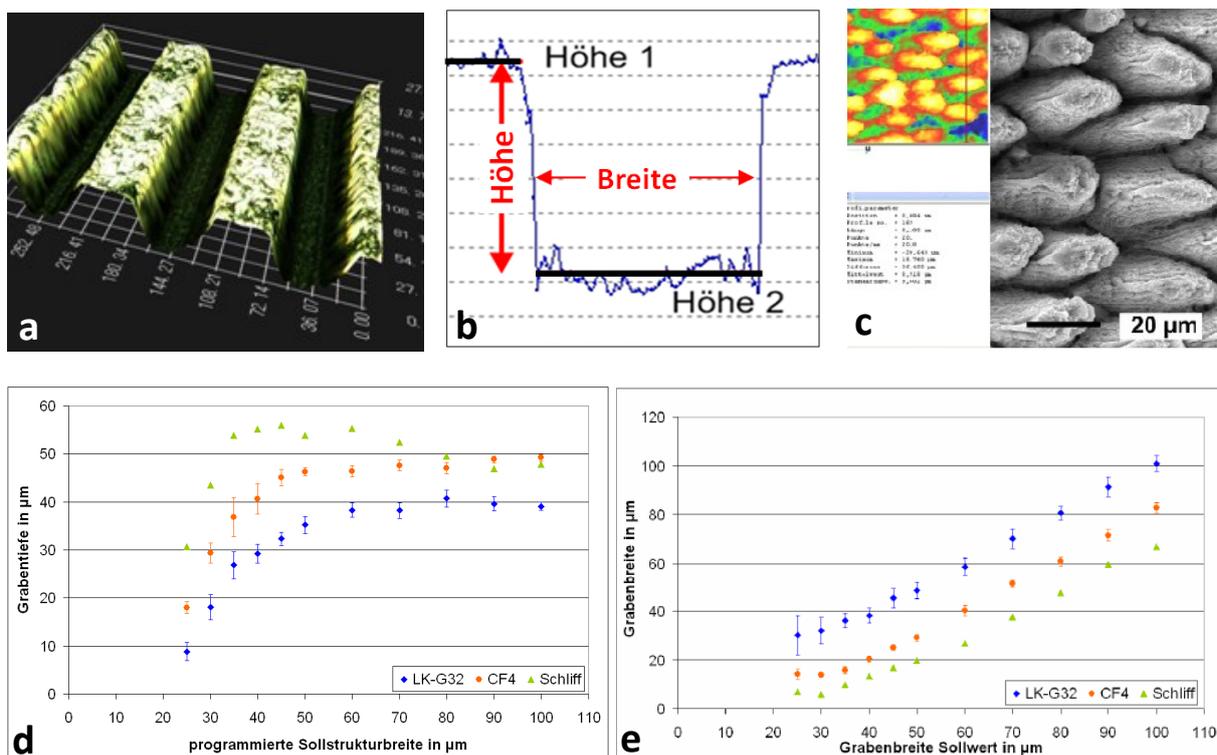


Abb. 6.4.3.3: vertikales und horizontales Auflösungsvermögen von lasergefertigten Grabenstrukturen: a) Digitalmikroskop-Aufnahme einer Steg-Graben-Mikrostruktur, b) Bestimmung der Messdaten aus Profilverlauf mit μsoft -Auswertesoftware, c) Gegenüberstellung eines mit dem konfokalen Sensor (links) und REM (rechts) aufgenommen Höhenprofils, d) vertikales und e) horizontales Auflösungsvermögen der optischen Messverfahren

Senkrecht im Graben verlaufend wurde die Abtragtiefe im Bereich 94 μm bei einer Streuung kleiner 1 μm bestimmt. Die Streuung der Messwerte konnte auf Messfehler, aber auch auf

laser- oder materialeitig bedingt unterschiedlich erreichte Abtragtiefen zurückgeführt werden. Die geringe Streuung der Messwerte kleiner 1% zeigte, dass sowohl das Messverfahren als auch der Abtragprozess hoch reproduzierbar sind. Im Mittel wurde die Rauigkeit der Abtragfläche auf $R_z < 1,1 \mu\text{m}$ bzw. $R_a < 0,5 \mu\text{m}$ bestimmt. Die kleine Standardabweichung lies auch hier auf eine geringe Streuung der Messwerte und damit auf die hohe Reproduzierbarkeit der Messung schließen.

Zur Bestimmung des vertikalen als auch lateralen Auflösungsvermögens der Profilometer anhand lasergefertigter Mikrostrukturen wurden mittels fs-Laserabtrag alternierende Steg-/Graben-strukturen in Edelstahl unterschiedlicher Breite und Tiefe eingebracht und mit dem konfokalen Sensor sowie dem Triangulationssensor gemessen. Zur Validierung der erhaltenen Messwerte wurden von den Mikrogräben Querschliffe angefertigt und mittels Digitalmikroskopie (Keyence VHX-100) ausgewertet (Abb. 6.4.3.3 a, b).

Die Auswertung der Messdaten erbrachte, dass die mit dem konfokalen Sensor bestimmten Grabentiefen und Grabenbreiten eher dem Querschliffprofil der abgetragenen Struktur entsprachen (Abb. 6.4.3.3 d, e). Ab einer Grabenbreite von ca. $50 \mu\text{m}$ zeigten Querschliff und Konfokalmessung vergleichbare Abtragtiefen. Die Triangulationsmessung hingegen lieferte im Vergleich zum Konfokalsensor und dem Querschliff um ca. $10 \mu\text{m}$ geringerer Tiefenmesswerte. Dieser relativ konstante negative Offset entspricht ungefähr der Höhe der am Boden der Laserbearbeitung entstandenen Mikroformationen, woraus geschlussfolgert werden kann, dass Mikrostrukturen kleiner $20 \mu\text{m}$ mit dem verwendeten Triangulationsmesskopf lateral nicht mehr aufgelöst werden können. Die Gegenüberstellung der mit dem konfokalen Sensor gewonnenen Höhenmessdaten mit einer REM-Aufnahme in Abb. 6.4.3.3 c zeigen dagegen, dass Mikrostrukturen einer Größe von $20 \mu\text{m}$ dargestellt werden können.

Für die Grabenbreite lieferten im Vergleich zum Querschliff sowohl der konfokale Sensor als auch der Triangulationssensor höhere Werte, wobei der Messfehler für die Triangulationsmessung deutlich größer ausfiel (Abb. 6.4.3.3 d). Für beide Verfahren sind in Abb. 6.4.3.3 e die geringfügige Zunahme der Grabenbreite mit größerer Strukturbreite zu erkennen.

Tab. 6.4.3.1: Rauheitskennwerte für verschiedene Messpunktabstände

Messpunktabstand in μm	1	5	10	20
R_a in μm				
Glas	6,94	6,82	6,72	6,53
Keramik	1,50	1,44	1,37	1,35
Edelstahl	0,90	0,88	0,88	0,86
R_z in μm				
Glas	45,4	37,8	30,0	24,7
Keramik	11,3	8,3	6,6	5,4
Edelstahl	6,5	5,1	4,4	3,5

Während sich der laterale Messpunktstand auf den gemessenen Konturverlauf nur geringfügig auswirkte, wurden die ermittelten Rauheitskenngrößen direkt beeinflusst. Auf gewalzten Edelstahl, einer Aluminiumoxidkeramik sowie einer mittels 3D Laserschneiden erzeugten Glasprobe wurden die Rauheitskenngrößen R_a und R_z bei einem Messpunktstand von $1\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$ und $20\ \mu\text{m}$ bestimmt. Wie in Tab. 6.4.3.1 gezeigt, beeinflusst der Abstand der Messpunkte den arithmetische Mittenrauwert R_a nur gering. Dagegen zeigte sich für alle untersuchten Materialien mit größerem Messpunktstand eine signifikante Verringerung die gemittelte Rautiefe R_z .

Abbildung 6.4.3.4 zeigt das mit dem Sensor CF-4 aufgenommene Höhenprofil einer mit dem fs-Laser erzeugten 3D Struktur im Vergleich zu einer REM-Aufnahme.

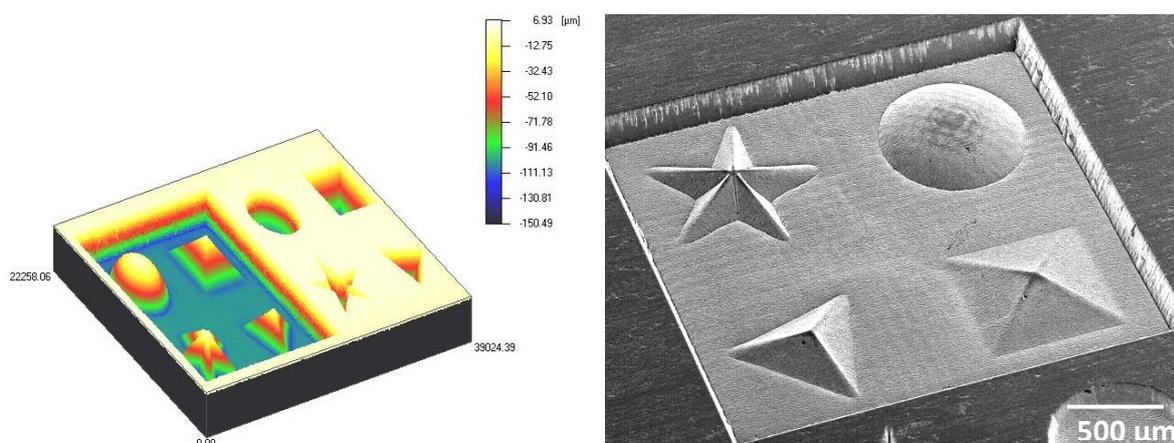


Abb. 6.4.3.4: Höhenprofilmessung (Sensor CF-4, links) und REM-Aufnahme (rechts) einer 3D Abtragstruktur

AP 4.2: Abtrag mit hochrepetierender Femtosekundenlaserstrahlung

Grundlegende Untersuchungen

Ein Großteil der während der Projektlaufzeit durchgeführten Versuche fand unter Verwendung einer F-Theta-Optik mit Brennweite $56\ \text{mm}$ zur Fokussierung des Laserstrahles im sogenannten „low-fluence“-Bestrahlungsregime bei einer Laserfluenz bis maximal $3,8\ \text{J}/\text{cm}^2$ statt. In diesem Bearbeitungsregime wird die Abtragtiefe von der optischen Eindringtiefe der Strahlung ins Material dominiert, die für Metalle im Bereich einiger $10\ \text{Nanometer}$ liegt. Um für die definierte Bearbeitung den Laserstrahl schnell und hochpräzise zu schalten, wurden Laser und Scanner über einen zusätzlich implementierten akusto-optischen Modulator in Kombination mit einem eigens entwickelten Pulspicker miteinander synchronisiert.

Die ersten Versuche zum Abtragen mit hochrepetierender Ultrakurzpuls-Laserstrahlung zeigten im Vergleich zur konventionellen Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung mit Pulswiederhol frequenzen im kHz-Bereich ein eher untypisches Verhalten in der Laserstrahl-Material-Wechselwirkung. Nach dem bisherigen Verständnis stellte die Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung einen sogenannten „kalten“, von wiedererstarteten Aufschmelzungen und abgelagerten Materialrückständen weitgehend freien Bearbeitungsprozess dar. Dagegen waren die ersten mit ultrakurzen Laserpulsen hoher Pulswiederhol frequenz erzielten Bearbeitungs-

ergebnisse qualitativ teilweise denen mit cw-Laserstrahlung erreichbaren Resultaten vergleichbar. Infolge der hohen beaufschlagten mittleren Laserleistungen war so der Bearbeitungsprozess trotz der ultrakurzen Wechselwirkungszeit des Laserpulses mit dem Werkstück stark thermisch geprägt. Die entstandenen ersten Abtragstrukturen zeigten entsprechend an Rändern und Boden eine starke thermische Belastung des Werkstückes verbunden mit massiven Materialablagerungen sowie aufgeschmolzene und wiedererstarre Bereiche. Unter bestimmten Bearbeitungsbedingungen, d.h. bei einem optimalen Verhältnis zwischen der eingetragener Laserleistung, der Pulswiederholfrequenz und der Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahles konnten allerdings auch qualitativ hochwertige Abtragstrukturen gefertigt werden.

Beispielhaft sind dazu in Abb. 6.4.3.5 durch Laserabtrag in Edelstahl 1.4301 entstandene Grabenstrukturen in Abhängigkeit der eingestrahltten mittleren Laserleistung und Pulswiederholfrequenz zusammengestellt. Deutlich sind massive Materialablagerungen rings um die abgetragenen Strukturen zu erkennen, die insbesondere bei der Einstrahlung hoher mittlerer Laserleistungen auftreten. Zudem ist der Boden der laserbearbeiteten Oberfläche neben den für Laserabtrag typischen Ripple-Formationen oftmals auch mit neuartigen Mikrostrukturen bedeckt. Dazu sind im linken Teil der gezeigten REM-Aufnahme sich in der Größenordnung der eingestrahltten Laserwellenlänge ausbildende Ripple zu sehen; die bedingt durch den Bearbeitungsmechanismus entstandenen konischen Mikrostrukturen zeigt dagegen die rechte Seite der Aufnahme.

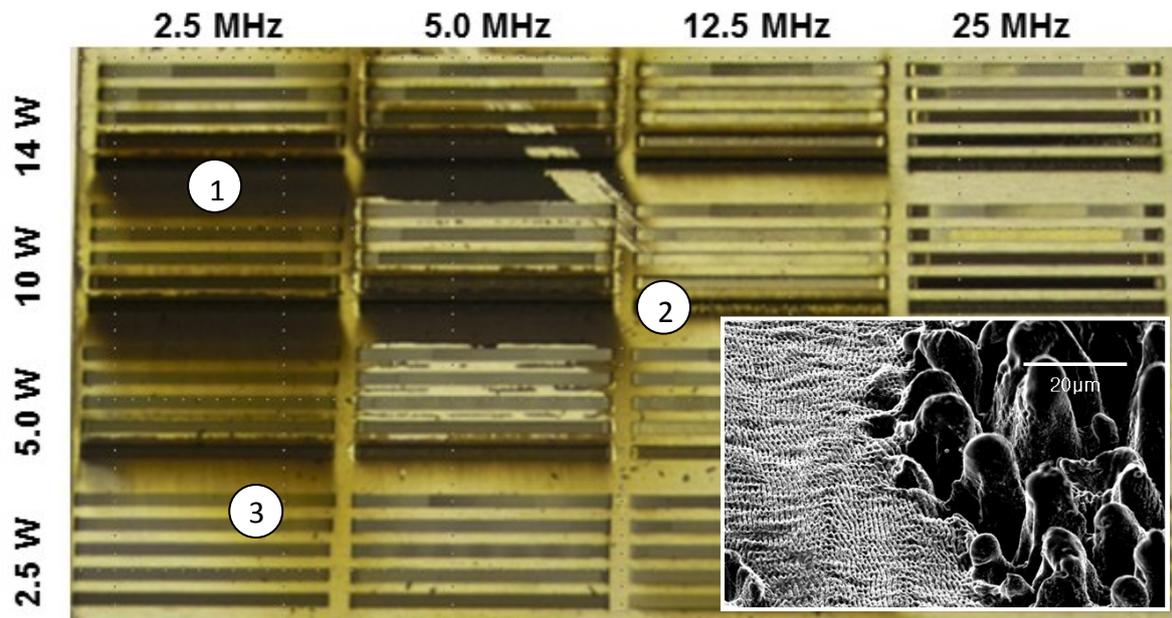


Abb. 6.4.3.5: durch Laserabtrag mit Ultrakurzpuls-Laserstrahlung in Abhängigkeit der eingestrahltten mittleren Laserleistung und Pulswiederholfrequenz entstandene Grabenstrukturen: 1 – Bereich mit massiven Materialablagerungen, 2 – wiedererstarre Schmelzstrukturen, 3 – qualitativ hochwertiges Abtragergebnis. Abbildung rechts unten: REM-Aufnahme von am Boden der laserabgetragenen Struktur entstandenen Ripple-Formationen (links) und konische Mikrostrukturen (rechts)

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten aber auch, dass der Abtragprozess bei Einsatz hochrepetierender Laserstrahlung signifikant von Wechselwirkungsphänomenen der Wärmeakkumulation und Pulsabschirmung geprägt ist, wie sie bis dato bei der Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung nicht bekannt waren. Illustriert am Beispiel Edelstahl 1.4301 sind in Abb. 6.4.3.6 a bei gleich eingestrahelter Laserfluenz und einer Bearbeitungsfrequenz von 500 kHz geringere Abtragtiefen gegenüber den mit 200 kHz erreichten Tiefen zu beobachten. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit wurde jeweils so gewählt, dass der laterale Pulsabstand konstant 7,5 µm betrug. Als Ursache für die unterschiedlich erreichten Tiefen werden Pulsabschirmungseffekte angenommen, die den Abtragprozess bei Puls wiederhol frequenzen im Bereich einiger hundert kHz dominieren. Infolge des kurzen zeitlichen Abstandes zwischen den einzelnen Pulsen kommt es zur Absorption oder Streuung des nächst einfallenden Laserpulses an der noch existenten, durch die vorhergehend eingestrahelten Pulse induzierten Plasma- / Materialdampf wolke. Als Folge dieser Pulsabschwächung trifft eine geringere Energiemenge aufs Material und es werden geringere Abtragtiefen erreicht.

Die Bearbeitung mit einer Puls wiederhol frequenz von 1 MHz bewirkte hingegen bei sonst gleich eingestrahlenen Parametern einen deutlichen Anstieg der Abtrage rate. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei Einsatz hoher Puls folg e frequenzen bis in den MHz-Bereich die auftretenden Abschirmungsverluste durch Effekte der Wärmeakkumulation überkompensiert werden. In diesem Bearbeitungsregime kommt es pro Zeiteinheit infolge der hohen beaufschlagten mittleren Laserleistungen zu einem erhöhten Energieeintrag, was insbesondere bei Materialien mit geringer Wärmeleitung zu einem Anstieg der mittleren Werkstücktemperatur im Bereich der Laserwirkstelle führt. Bei einem geringen zeitlichen Abstand trifft so der Laserpuls auf eine vorgewärmte Bearbeitungsstelle, wodurch die einfallende Laserstrahlung besser absorbiert wird. Einhergehend sinkt die Ablationsschwelle, da bei erwärmten Materialien eine geringere Energiemenge zum Aufschmelzen bzw. Verdampfen erforderlich ist. Die Auswirkung von Pulsabschirmung und Wärmeakkumulation auf die Abtragschwelle verdeutlicht Tab. 6.4.3.2.

Tab. 6.4.3.2: Ablationsschwelle in Abhängigkeit der beaufschlagten Repetitionsrate

Material	H _{th} (20kHz) J/cm ²	H _{th} (100kHz) J/cm ²	H _{th} (333kHz) J/cm ²	H _{th} (1MHz) J/cm ²
Kupfer	0.36	0.44	0.39	0.38
Aluminium	0.44	0.37	0.30	0.21
Edelstahl	0.15	0.15	0.135	0.12
Wolfram	0.51	0.50	0.48	0.45

In den Abbildungen 6.4.3.6 b) bis d) wird neben der Frequenzabhängigkeit auch die signifikante Abhängigkeit des Abtragprozesses von den physikalischen Eigenschaften der bestrahlten Materialien deutlich. Für einen lateralen Pulsabstand von 4 µm zeigt die Bearbeitung von Edelstahl in Beispiel b) zunächst eine geringfügige Abnahme der erreichten Abtragtiefe mit

zunehmender Frequenz bis ca. 200 kHz als Folge der Pulsabschirmung. Mit höheren Frequenzen bis in den MHz-Bereich nehmen infolge der Wärmeakkumulation die erreichten Abtragtiefen wiederum zu. Die Bearbeitung von Kupfer in Beispiel c) zeigt einen von der Pulsfrequenz nahezu unbeeinflussten Abtragprozess. Bedingt durch die hohe Wärmeleitfähigkeit ist bei der Bearbeitung von Kupfer die Erwärmung umliegender Bereiche und damit auch die Wärmeakkumulation vernachlässigbar. Für Aluminium ist in d) ein Anstieg der Abtragtiefe mit der Pulswiederholrate gezeigt. Trotz einer hohen dem Kupfer vergleichbaren Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich der Ablationsprozess deutlich. Aufgrund der geringen Schmelztemperatur von Aluminium wird mit höherer Frequenz die Laserstrahlung vermehrt in eine Schmelze eingekoppelt. Die einfallende Laserstrahlung wird so besser absorbiert, was deutlich höhere Abtragraten und dementsprechend größere Abtragtiefen zur Folge hat.

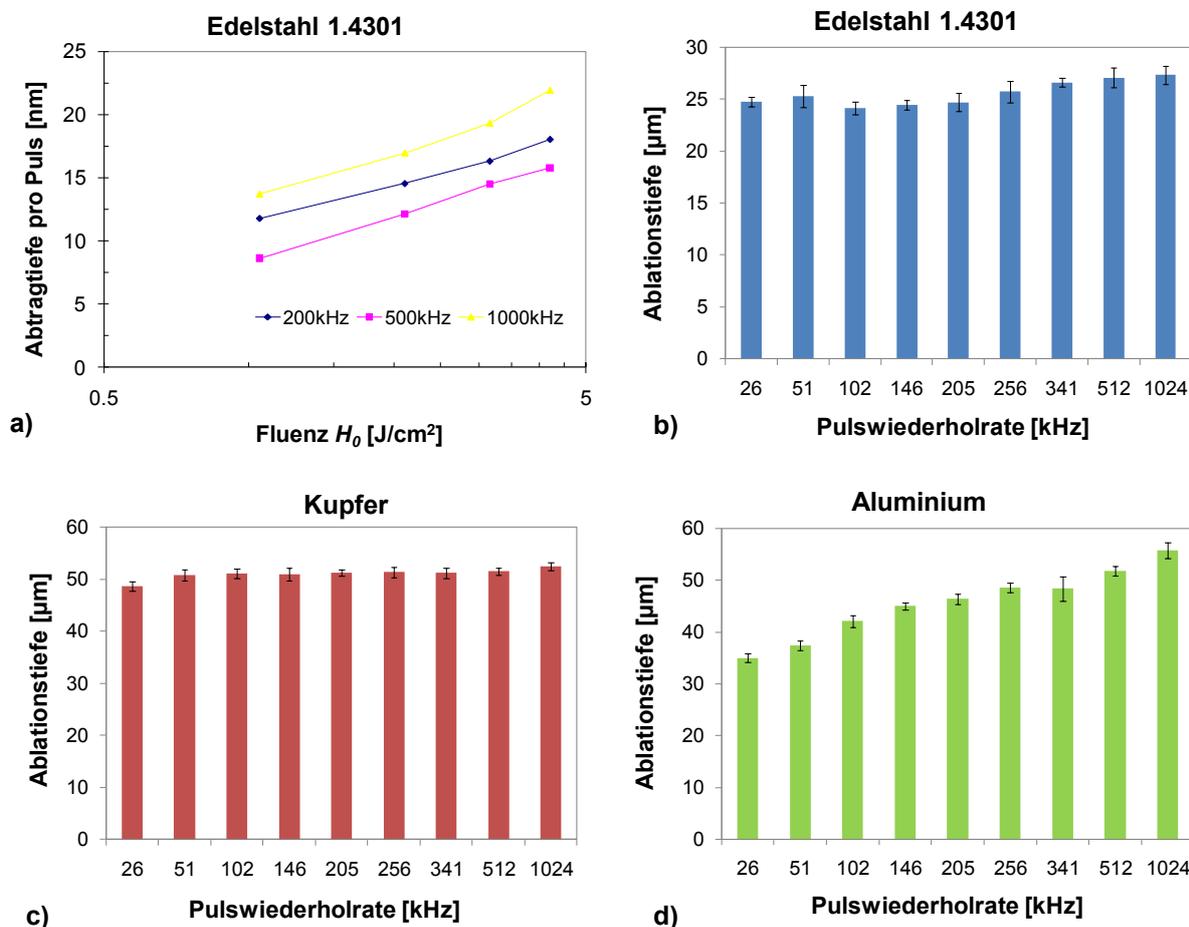


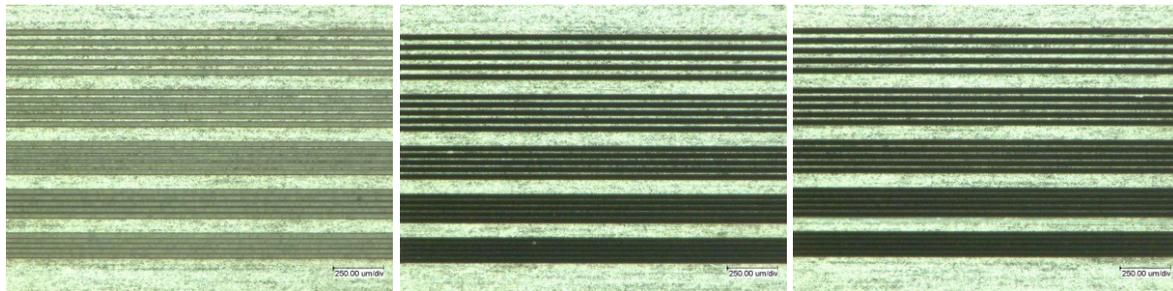
Abb. 6.4.3.6: Abtragtiefe in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter:

a) Abtragtiefe pro Puls in Edelmetall sowie in Abhängigkeit der Pulswiederholrate für b) Edelmetall, c) Kupfer und d) Aluminium

Ermittlung der Auflösungsgrenze für das Verfahren

Die Auflösungsgrenze des Verfahrens wurde an einem Werkstück aus Edelmetall 1.4301 durch Laserabtragen mit Linienscans ermittelt. Im Interesse der Untersuchungen standen der Einfluss der Scananzahl sowie der beaufschlagten Laserfluenz auf die zwischen 2 abgetragenen Linien entstehende Stegbreite. Exemplarisch sind in Abb. 6.4.3.7 mit verschiedenen Scanzahl-

len (100, 500, 1000) und einer Pulsenergie von $3 \mu\text{J}$ erzielten Teststrukturen abgebildet. Die Auflösungsgrenze für das Verfahren bildet der minimale Linienabstand, mit dem zwei Linien-scans ohne Höhendefekt sauber getrennt werden können. Für die verwendete Laser-Scanner-Kombination wurde die Auflösungsgrenze für eine eingestrahlte Pulsenergie von $1 \mu\text{J}$ und 100 gescannte Linien auf $25 \mu\text{m}$ bestimmt. Mit höherer Pulsenergie vergrößerte sich der Mindestabstand zum Auflösen der Einzellinien; die Auswirkung einer höheren Scananzahl auf das Auflösungsvermögen ist allerdings nur marginal.



100 Scans

500 Scans

1000 Scans

Abb. 6.4.3.7: Testfelder zur Ermittlung der Auflösungsgrenze des Verfahrens in Abhängigkeit der beaufschlagten Scananzahl bei einer Pulsenergie von $3 \mu\text{J}$

Bei der Laserfertigung von dreidimensionalen Mikrostrukturen ist die erreichbare Abtragtiefe infolge des sich beim Tiefenabtrag ausbildenden Wandwinkels auch von der Strukturbreite abhängig. Für Aluminium zeigt Abb. 6.4.3.8 (links), dass eine Strukturbreite von $150 \mu\text{m}$ erforderlich ist, um in eine Abtragtiefe von $100 \mu\text{m}$ zu erreichen (6. Struktur von links). Das laterale Auflösungsvermögen wurde anhand einer Graben-Steg-Struktur bei einer Strukturtiefe von $100 \mu\text{m}$ auf kleiner $10 \mu\text{m}$ bestimmt.

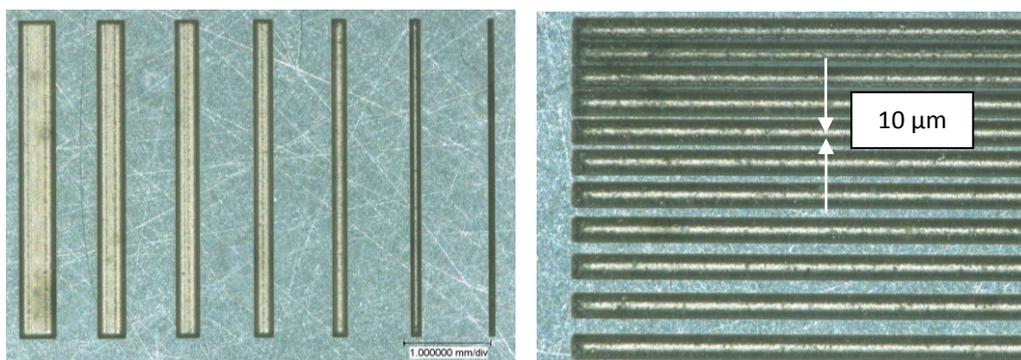


Abb. 6.4.3.8: Testfeld in Aluminium zur Ermittlung der notwendigen Grabenbreite zur Erzielung einer Strukturtiefe von $100 \mu\text{m}$; rechts: lateralen Auflösung von $10 \mu\text{m}$ bei einer Strukturtiefe von $100 \mu\text{m}$

Parameterstudie zur Ermittlung des Einflusses von Laserleistung und Pulsabstand auf Abtrag pro Laserpuls und Oberflächenrauigkeit

Für das flächige Laserabtragen wurde ergänzend zu den im Arbeitsplan definierten Zielen eine umfangreiche Parameterstudie zur Ermittlung des Einflusses von Pulsabstand und ein-

gestrahlter Laserleistung auf den Abtrag pro Laserpuls und die Oberflächenrauigkeit durchgeführt. Zur Bewertung der Abtragtiefe sowie der Mittenrauheit R_a wurden zunächst Parameterfelder erzeugt, aus denen Bearbeitungsparameter vorausgewählt werden konnten, mit denen eine glatte Oberfläche oder ein in akzeptabler Zeit erfolgender Volumenabtrag zu erwarten ist. Ein zur Vorauswahl von zur Bearbeitung geeigneten Parametern in Edelstahl erstelltes Parametertestfeld zeigt Abb. 6.4.3.9. Die Parameterkombinationen, mit denen sehr raue Oberflächen, z.B. bei geringem Pulsabstand, oder geringe Abtragraten infolge einer zu geringen Fluenz und/oder großem Pulsabstand erzielt werden, sind in der Abbildung rot markiert und wurden in weiterführenden Untersuchungen nicht mehr betrachtet.

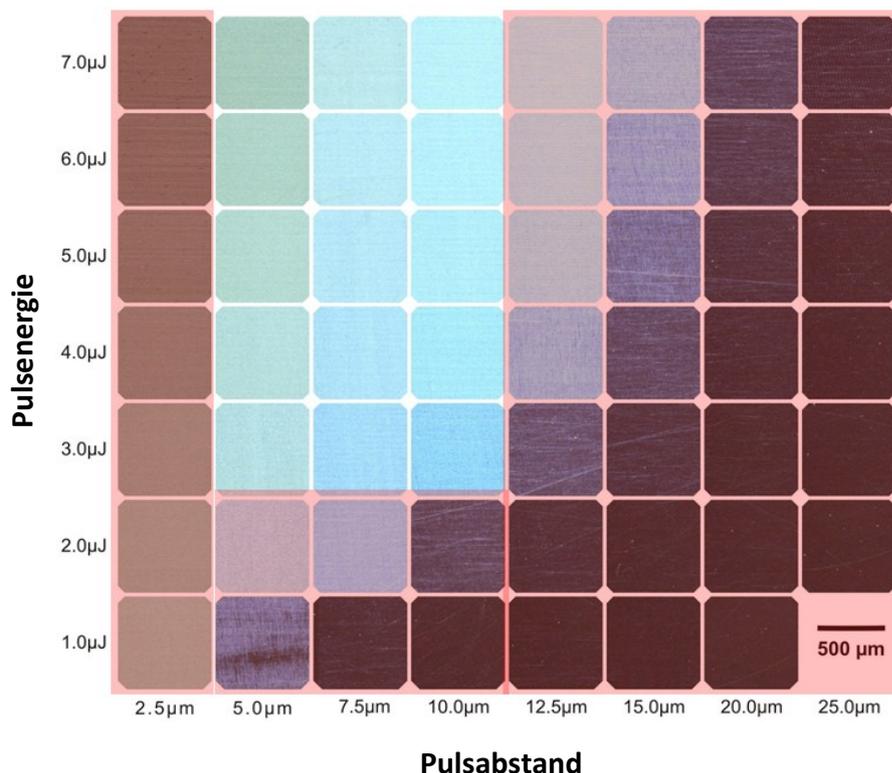


Abb. 6.4.3.9: Testfeld in Edelstahl zur Vorauswahl geeigneter Bearbeitungsparameter; Rot markierte Bereiche kennzeichnen Parameterkombinationen, mit denen qualitativ oder hinsichtlich der Bearbeitungseffizienz unzureichende Bearbeitungsergebnisse zu erwarten sind

Zur Evaluierung der Rauigkeit lasergefertigter Oberflächen stand ein taktiles Rauigkeitsmessgerät (DEKTAK 3030) zur Verfügung. Als Rauigkeitskenngröße wurde der in der Industrie zur Beschreibung technischer Oberflächen weit verbreitete arithmetische Mittenrauwert R_a gewählt. Die Untersuchungen zeigten zunächst, dass sich die Grundrauigkeit der unbearbeiteten Oberfläche signifikant auf die minimal zu erreichenden Rauigkeitswerte auswirkte (Abb. 6.4.3.10).

In Abb. 6.4.3.11 sind die in 30 µm Abtragtiefe an laserbearbeiteten Kupfer-, Aluminium- und Edelstahloberflächen bestimmten Rauheitswerte in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter zusammengefasst. Mit einem R_a -Wert von 100 nm konnte die geringste

Oberflächenrauigkeit in Kupfer erzielt werden; in Edelstahl und Aluminium lagen die geringsten Rauigkeitswerte bei 320 nm bzw. 160 nm. Anhand der Farbkodierung lassen sich aus der Zusammenstellung optimale Bearbeitungsparameter zur Erzielung einer geringen Rauigkeit abschätzen.

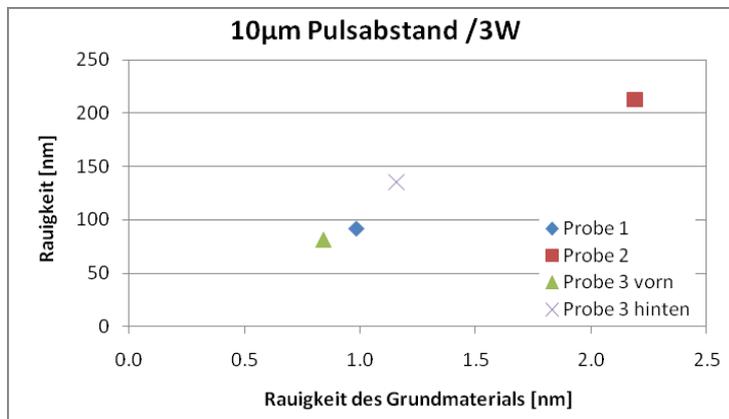


Abb. 6.4.3.10: Einfluss der Grundrauigkeit der unbearbeiteten Edelstahl-Oberfläche auf den entstehenden Mittenrauwert R_a eines Laserabtrages, erzielt mit einelateralen Pulsabstand von 10 μm und einer mittleren Laserleistung von 3 W

		Rauigkeit [μm]						
		Pulsabstand in μm						
		Kupfer	2.5	5	7.5	10	12.5	
Pulsenergie in μJ	Kupfer	3	x	0.14	0.22	0.68	2.58	
		4	x	0.11	0.17	0.31	1.23	
		5	x	0.10	0.13	0.52	0.80	
		6	x	0.11	0.11	0.56	0.97	
		7	x	0.15	0.13	0.63	1.07	
	Aluminium	3	x	0.16	0.20	0.40	0.74	
		4	x	0.21	0.29	0.87	1.34	
		5	x	0.23	0.51	1.26	1.49	
		6	x	0.42	0.87	2.00	1.76	
		7	x	1.13	1.29	2.20	1.97	
	Edelstahl	2		0.37	0.36	0.43	0.53	1.11
		3		0.39	0.39	0.38	0.37	0.55
		4		0.34	0.32	0.35	0.34	0.62
		5		0.49	0.46	0.44	0.49	0.46
		6		0.69	0.51	0.51	0.51	0.51

Abb. 6.4.3.11: Übersicht über die für Kupfer, Aluminium und Edelstahl mit unterschiedlichen Bearbeitungsparametern erreichten Mittenrauwerte R_a

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Charakterisierung des Ablationsverhaltens ist die Prozesseffizienz, die das Abtragsvolumen pro eingestrahlt Pulsenergie beschreibt. In Abb. 6.4.3.12 ist die mit unterschiedlichen Bearbeitungsparametern jeweilig erreichte Prozesseffizienz gezeigt. Unter der Maßgabe einer zeitoptimierten Bearbeitung zur Herstellung möglichst glatter Oberflächen lassen sich aus den ermittelten Abtragsraten und Rauigkeitskennwerten geeignete Bearbeitungsparameter abschätzen. Das sind für Kupfer eine Pulsenergie

von 7 μJ bei einem Pulsabstand von 5 μm ; für Edelstahl 4 μJ sowie für Aluminium 3 μJ beim jeweils gleichen Pulsabstand.

		Prozesseffizienz [$\mu\text{m}^2/\mu\text{J}$]				
		Pulsabstand [μm]				
		2.5	5	7.5	10	12.5
Pulsenergie [μJ]	Edelstahl					
	2	3.71	3.73	3.67	3.65	3.78
	3	4.10	3.77	3.60	3.41	3.39
	4	3.96	3.67	3.42	3.20	3.18
	5	3.41	3.30	3.18	3.10	3.02
	Aluminium					
	3	X	2.83	2.40	X	1.97
	4	X	3.11	3.07	2.65	3.00
	5	X	3.93	3.49	2.95	2.67
	6	X	4.08	3.62	3.60	2.73
7	X	4.43	4.24	X	3.19	
Kupfer						
3	X	0.80	0.95	1.18	1.35	
4	X	1.14	1.16	1.34	1.59	
5	X	1.46	1.39	1.47	1.56	
6	X	1.64	1.59	1.77	1.82	
7	X	1.93	1.81	1.89	2.04	

Abb. 6.4.3.12: Prozesseffizienz in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter

3D Laserbearbeitung

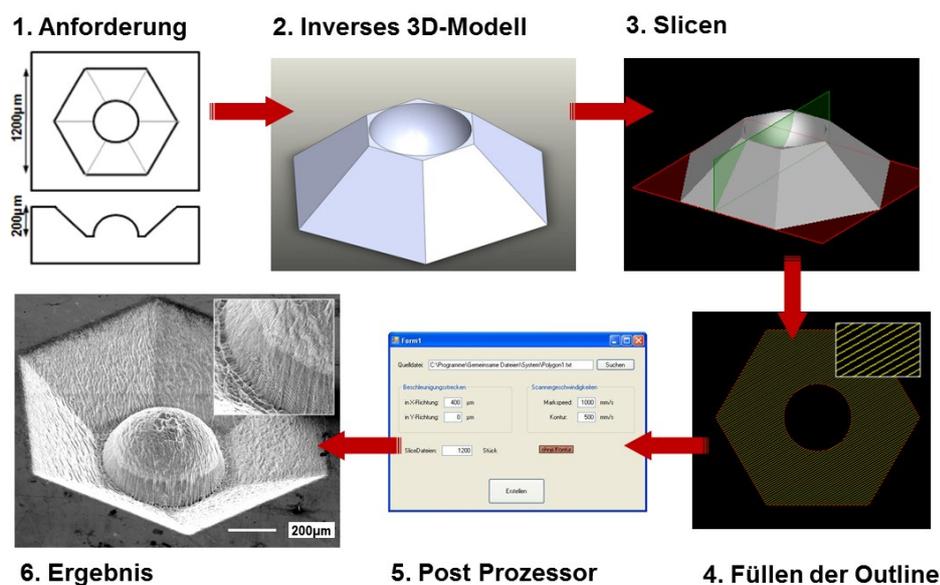


Abb. 6.4.3.13: Prozesskette zur Laserfertigung komplexer 3D Strukturen

Die Laserfertigung komplexer dreidimensionaler Strukturen wurde durch Anwendung eines bereits im Bereich des generativen Rapid Prototyping eingesetzten Bearbeitungsregimes realisiert, dargestellt in der Prozesskette in Abb. 6.4.3.13. Zunächst wird von der zu fertigenden Struktur (1) ein inverses 3D CAD-Modell erstellt (2). Das Zerlegen des Modells (3) in eine Vielzahl von Schichten (Layer) liefert die Outline als äußere Begrenzung des Laserabtrags (4). Diese Kontur wird anschließend mit Linien gefüllt, die die Scanbewegung des Laserstrahles vorgeben. In einem nachträglichen Postprozessor-Schritt werden die zu scannenden Linien

noch um sogenannte Beschleunigungsstrecken verlängert (5), ehe durch sukzessives Abarbeiten der einzelnen Layer die Abtragstruktur entsteht (6).

Da sich zu Beginn und am Ende der Laserscans aufgrund der Massenträgheit des Scanner-spiegels die Scanbewegung verzögert bestand die Notwendigkeit des zusätzlichen Anfügens von Beschleunigungsstrecken. Bei Einstrahlung hochrepetierender Laserstrahlung kommt es während der Beschleunigungsphasen zur Pulshäufung, die einen hohen und unkontrollierten Abtrag bewirkt und als Folge einen tiefen Krater am Start- und Endpunkt der Laserbearbeitung entstehen lässt (Abb. 6.4.3.14 links). Durch das Addieren der Beschleunigungsstrecken zur eigentlichen Lasernutzstrecke (Abb. 6.4.3.14 Mitte) konnten gleichmäßig abgetragene Randbereiche erzielt werden (Abb. 6.4.3.14 rechts). Dabei wurde der Laserstrahl nur bei erreichter Scangeschwindigkeit (gleich Lasernutzstrecke) freigegeben.

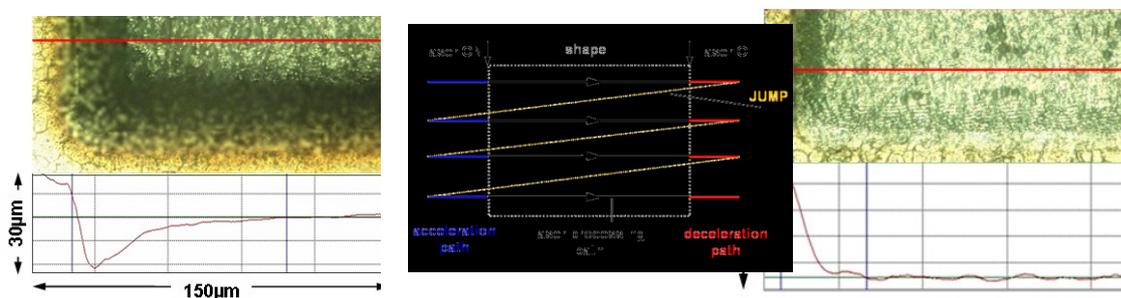


Abb. 6.4.3.14: Bearbeitungsregime zum Erreichen gleichmäßiger Abtragstrukturen unter Einsatz von Beschleunigungsstrecken; links: die Bearbeitung ohne Beschleunigungsstrecken führt zu einem tiefen Ablationskrater infolge der starken Pulshäufung, Mitte: Prozessregime schematisch; rechts: gleichmäßiger Laserabtrag unter Anwendung von Beschleunigungsstrecken

Mit der beschriebenen Bearbeitungsstrategie wurden in Edelstahl und Kupfer Demonstratoren hergestellt, die in Abb. 6.4.3.15 zusammengestellt sind. Im Vergleich zur fs-Laserbearbeitung im kHz-Bereich konnte beispielsweise die in b) gezeigte Struktur in einer mehr als 40-fach kürzeren Bearbeitungszeit erzeugt werden. Weiterhin wird in den Abbildungen e) und f) der Einfluss unterschiedlich gewählter Fluenzen bzw. Scanrichtungen auf das Abtragergebnis deutlich. Die Beaufschlagung mit hoher Fluenz führt einerseits zur Entstehung von Mikrostrukturen auf der Bearbeitungsoberfläche, zu erkennen in Abbildung e) unten. Erfolgt die Bearbeitung dagegen mit einer geringen Fluenz im sogenannten „Low-Fluence“-Regime, sind homogene Bearbeitungsoberflächen geringer Rauigkeit herstellbar (Abbildung e) oben). Die Konturgenauigkeit lasergefertigter Strukturen wird zudem durch das gewählte Scanregime beeinflusst. Wie in Abbildung f) beispielhaft verdeutlicht, ist die erreichbare Konturschärfe bei unidirektionaler Bearbeitung (oben) höher als im bidirektionalen Scanregime (unten).

Die absolute Genauigkeit der Tiefe der Grabenstruktur von $96 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ (Abb. 6.4.3.14 e,f) wurde durch die insitu-Einbindung des Sensors CP-4 erzielt (vgl. AP 4.1 Integration von neuartigen Messprinzipien in das Verfahren).

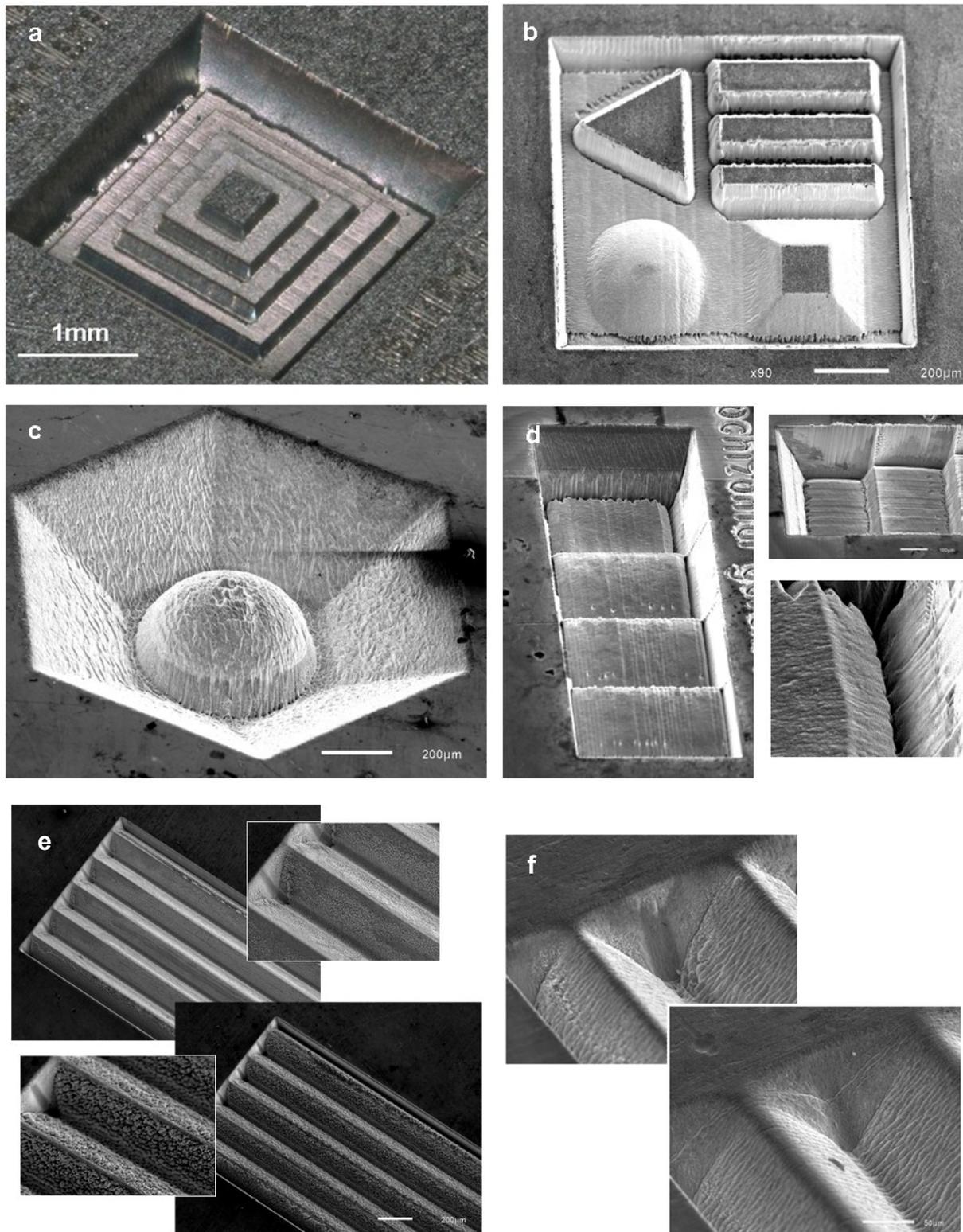


Abb. 6.4.3.15: Applikationsbeispiele: a) Stufenpyramide in Edelstahl mit Stufenhöhe 50 µm, b) komplexe 3D Demonstratorstruktur in Edelstahl 100 µm tief, c) Hexagon mit innen liegender Halbkugel in Kupfer 200 µm tief, d) Treppe in Kupfer mit Stufenhöhe 40 µm, e) Grabenstruktur in Edelstahl 96 µm tief (oben niedrige und unten hohe Fluenz) und f) Grabenstruktur in Edelstahl erzeugt mit unterschiedlichem Scanregime – oben unidirektional, unten bidirektional

Untersuchungen zum Abtrag mit ultraschneller Strahlableitung

Die ultraschnelle Strahlableitung in Bearbeitungsrichtung erfolgte mit einem hochfrequenten Resonanzscanner, der in Kombination mit einem für die eingesetzte Wellenlänge 1030 nm hochreflektierenden Spiegel mit einer konstanten Frequenz von 3,4 kHz sinusförmig oszillierte. Abb. 6.4.3.16 zeigt Skizzen vom den verwendeten Resonanzscanner und vom Aufbau der Scanner-Einheit sowie ein Bild des in den Versuchen verwendeten experimentellen Aufbaues.

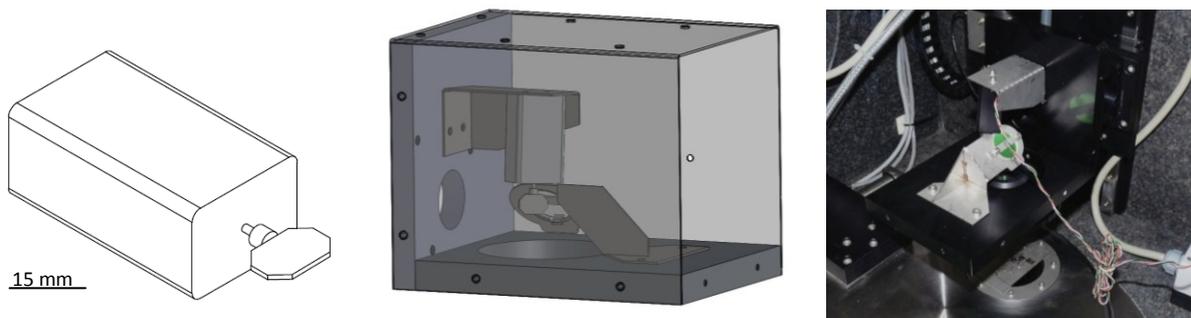


Abb. 6.4.3.16: Resonanzscanner-Aufbau, links: Skizze Resonanzscanner SC-30 mit Ablenkspiegel; Mitte: Skizze Gehäuse mit Resonanzscanner und festem zweiten Umlenkspiegel; rechts: Bild Versuchsaufbau

Durch das sinusförmige Oszillieren des Ablenkspiegels kam es in den Umkehrpunkten zu einer ständigen Beschleunigungs- und Abbremsbewegung sowie einem Geschwindigkeitsmaximum im Nulldurchgang, wodurch sich entsprechend auch ständig die Geschwindigkeit des Laserstrahles auf dem Werkstück änderte. Bei der Ablenkung gepulster Laserstrahlung liefert das Produkt aus Laserpulsfrequenz und erreichtem Pulsabstand die jeweilige Scangeschwindigkeit. Die Höhe der maximalen Scangeschwindigkeit ließ sich zudem über die Auslenkung des Spiegels, und die wiederum über die Amplitude des Anregungssignals regeln.

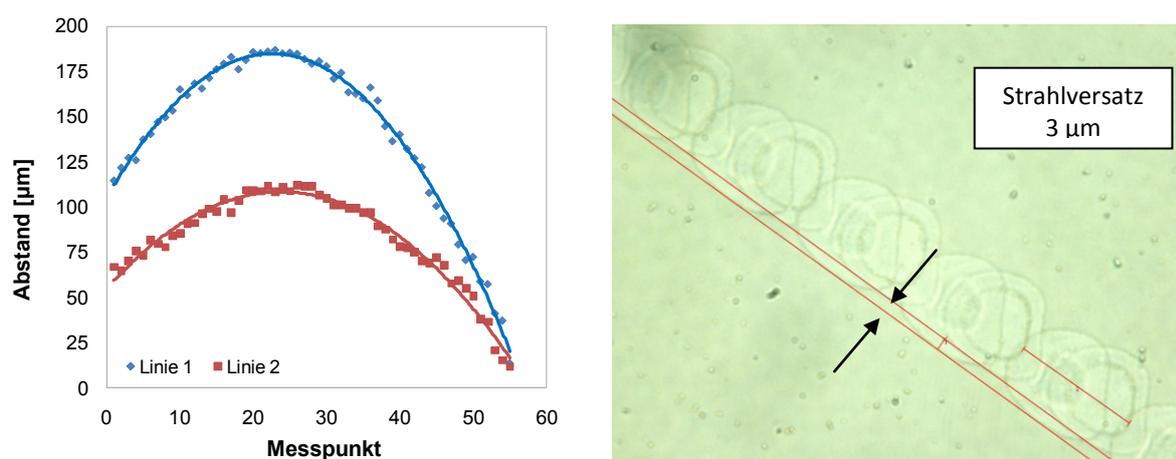


Abb. 6.4.3.17: links: Puls-zu-Puls-Abstand bei unterschiedlicher Anregungsamplitude; rechts: Strahlversatz zwischen hin- und rücklaufender Scanlinie

Beispielhaft zeigt Abb. 6.4.3.17 links die für zwei unterschiedlich hohe Signalamplituden und einer Laserpulsfrequenz von 500 kHz jeweilig entlang eines Linienscans erreichten Puls-zu-

Pulsabstände. Die höchste am System realisierte Scangeschwindigkeit von 7.800 m/min wurde mit einer Laserpulsfrequenz von 4,1 MHz bei einem Puls-zu-Puls-Abstand von rund 32 μm erzielt.

Geschuldet dem nicht optimal abgestimmten Resonanzscanner wurde zwischen der hin- und rücklaufenden Scanlinie ein Versatz von 3 μm festgestellt (rechte Abbildung). Infolge der oszillierenden Bewegung des Ablenkspiegels sowie des Strahlversatzes zwischen hin- und rücklaufender Scanlinie variierte der Energieeintrag ins Werkstück, was entsprechend zu einem ungleichmäßigen Materialabtrag im Bearbeitungsfeld führte. Durch eine Prozessführung, bei der lediglich Bereiche mit annähernd gleichem Pulsabstand für den Laserabtrag durch ein positionsgenaueres Zu- und Abschalten des Laserstrahles während der Scanbewegung genutzt wurden, konnten vergleichbare Abtragbedingungen realisiert werden. Für die Laserbearbeitung wurde demnach nur der hinlaufende Scan, und dort auch nur ein kleiner Bereich mit annähernd gleichem Pulsabstand in der Nähe des Nulldurchgangs des Scannerspiegels eingesetzt. Durch die so erreichten gleichmäßigen Bestrahlungsbedingungen änderte sich allerdings extrem das Verhältnis zwischen Lasernutz- und Lasertotzeit, was eine deutliche Verringerung der effektiven Bearbeitungsgeschwindigkeit zur Folge hatte. Lasernutz- und Lasertotzeit entsprechen dabei der Zeit, in der der Laserbearbeitung stattfindet bzw. in der trotz Scanbewegung keine Laserstrahlung auf das Werkstück einstrahlt, die effektive Bearbeitungsgeschwindigkeit der Länge der laserabgetragenen Strecke pro Zeit.

Bei maximaler Spiegelauslenkung konnte sowohl die höchste Scangeschwindigkeit (7.800 m/min) als auch die längste Lasernutzstrecke (2 mm) erreicht werden. Die effektive Bearbeitungsgeschwindigkeit unter Beachtung der Totzeiten betrug bei der Oszillationsfrequenz von 3,4 kHz lediglich 400 m/min. Die technischen Parameter des entwickelten Resonanzscansystems sind in Tab. 6.4.3.3 zusammengefasst.

Tab. 6.4.3.3: technische Parameter des Resonanzscanners.

Parameter	Resonanzscanner
Frequenz	3,4 kHz
max. Scangeschwindigkeit v_s	7.800 m/min
nutzbare Scanlänge l_s	< 2 mm
Objektivbrennweite f	56 mm
Fokusbrenndurchmesser d_{86}	27 μm
Auflösung (zeitlich / lateral)	400 ns / 50 μm

Mit dem aufgebauten Resonanzscanner wurden Untersuchungen zum Einfluss hoher Laserfrequenzen auf den Laserabtragprozess durchgeführt. In den Versuchen wurde mit einer Laserfrequenz von 4,1 MHz gearbeitet, da bei dieser Frequenz die vom Lasersystem maximal

emittierte Laserpulsenergie von rund $3 \mu\text{J}$ noch ausreichte, um das Werkstück mit einer Fluenz oberhalb der Abtragschwelle zu beaufschlagen. Da technologiebedingt beim eingesetzten Faserlasersystem mit höherer Laserfrequenz die Laserpulsenergie abnahm, erschien für die tiefgreifende Untersuchung des Abtragprozesses eine weitere Erhöhung der Laserfrequenz als nicht zweckmäßig. In Abb. 6.4.3.18 sind durch Linienabtrag und dabei mit zunehmender Scananzahl bzw. größerem Abstand zwischen den einzelnen Linien entstandene Grabenstrukturen in einer Draufsicht zusammengefasst.

Linien- Abstand	20 μm	25 μm	30 μm	40 μm	50 μm
Scananzahl					
100					
250					
500					
750					
1000					

Abb. 6.4.3.18: Abtrag von Edelstahl 1.4301 in Abhängigkeit von Scananzahl und Linienabstand, Bearbeitungsparameter: Laserfrequenz 4,1 MHz, Scangeschwindigkeit 1.080 m/min und Pulsenergie $1 \mu\text{J}$

Pro Parametersatz wurden dabei je 5 Gräben mit einer mittleren Laserleistung von 4,1 W bei einer Scangeschwindigkeit von 1.080 m/min erzeugt. Entsprechend der eingesetzten Puls-wiederholfrequenz von 4,1 MHz ergaben sich pro Laserpuls eine eingestrahelte Energie von $1 \mu\text{J}$ sowie ein lateraler Abstand von $4,5 \mu\text{m}$ zwischen den einzelnen Laserpulsen. In der Abbildung wird deutlich, dass mit zunehmender Scananzahl breitere Gräben entstanden. Waren

die Linienabstände kleiner $30\ \mu\text{m}$, insbesondere dann, wenn der Linienabstand kleiner oder gleich dem Fokaldurchmesser des Laserstrahls ist, so ergab sich für hohe Scanzahlen eine räumliche Überlagerung der nächstfolgenden Linie mit bereits abgetragenen Grabenbereichen. War der Fokaldurchmesser dagegen nur geringfügig größer als der Linienabstand, so kam es lokal zu einer starken Materialüberhitzung, die das Wegbrennen der verbliebenen dünnen Stege zur Folge hatte. Ab einem Linienabstand von $30\ \mu\text{m}$ konnten die Gräben sauber getrennt werden, womit dieser Wert als Auflösungsgrenze des Linienabtrages für die verwendeten Parameter angesehen werden kann.

Den Einfluss der Laserfrequenz auf das Abtragergebnis und die Auflösungsgrenze beim Linienscanabtrag von Edelstahl 1.4301 verdeutlicht Abb. 6.4.3..3.19. Die im Querschliff gezeigten Grabenstrukturen wurden mit einer Laserfrequenz von $4,1\ \text{MHz}$ und einem Linienabstand von $25\ \mu\text{m}$ und $35\ \mu\text{m}$ erzeugt und mit Strukturen, die mit geringeren Frequenzen ($100\ \text{kHz}$, $1\ \text{MHz}$) erzeugt wurden, verglichen. Die Edelstahloberfläche wurde mit der jeweilig maximal verfügbaren Laserpulsenergie beaufschlagt, was einer eingestrahelten mittleren Leistung von $0,68\ \text{W}$ bei $100\ \text{kHz}$, $6,8\ \text{W}$ bei $1,02\ \text{MHz}$ und $11,3\ \text{W}$ bei $4,1\ \text{MHz}$ entsprach. Aus der Abbildung wird deutlich, dass mit einer Laserfrequenz von $100\ \text{kHz}$ eine sauber ausgeprägte Grabenstruktur erreicht werden konnte. Die mit 1000 Scans maximal erreichte Grabentiefe betrug $150\ \mu\text{m}$. Zudem ist erkennbar, dass bei einem Grabenabstand von $25\ \mu\text{m}$ ein Höhendefekt zwischen den schmalen Stegen und der Materialoberfläche entstand. Die Ursache dafür war das Wegbrennen der Stege infolge einer starken Materialüberhitzung, die bedingt durch das geringe verbliebene Materialvolumen sowie der begrenzten Wärmeleitung des Edelstahles entstand.

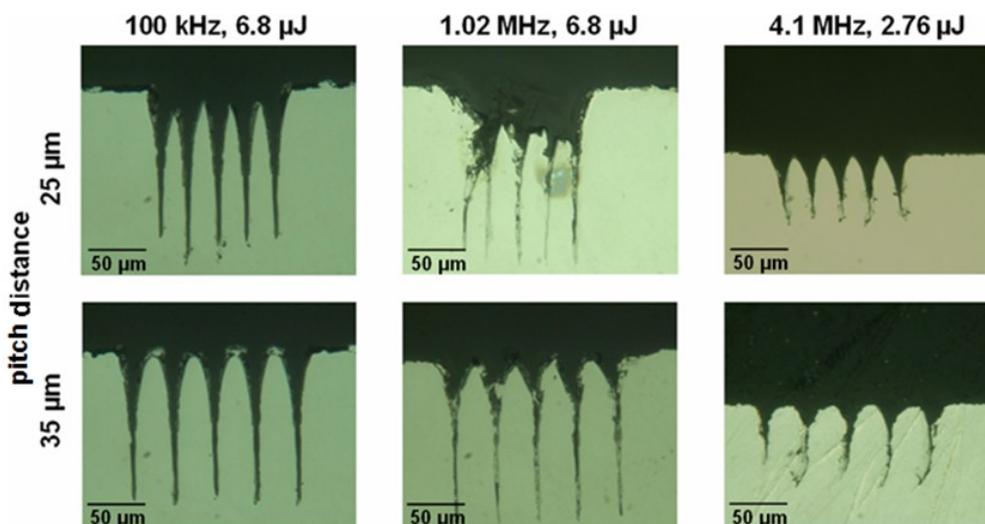


Abb. 6.4.3.19: Querschliff von Grabenstrukturen in Edelstahl 1.4301, die mit unterschiedlicher Laserfrequenz und Grabenabstand bei der jeweilig maximal verfügbaren Laserleistung und 1000 Scans gefertigt wurden

Für den Grabenabstand $35\ \mu\text{m}$ ist eine alternierende Graben-/Steg-Struktur ohne Höhendefekt zu sehen, womit dieser Wert als Auflösungsgrenze anzunehmen ist. Im Querschliff der mit höheren Frequenzen gefertigten Gräben sind dagegen stark zerklüftete sowie mit ge-

schmolzenen und wiedererstarteten Materialresten gefüllte Gräben zu erkennen. Der Grund für das Entstehen der Aufschmelzungen war die hohe auf das Werkstück einwirkende mittlere Laserleistung.

AP 4.3 Erzeugung von definierten Oberflächeneigenschaften

Grundlegende Untersuchungen zur Bestrahlung mit hochrepetierendem fs-Laser

Die Oberflächenqualität einer durch Laserabtragen mit fs-Laserstrahlung entstandenen Oberfläche wird vor allem durch die während des Laserprozesses entstandenen Oberflächenformationen bestimmt, deren Größe vom Nano- bis in den Mikrometer-Bereich reicht. In Abb. 6.4.3.20 sind sich deutlich in ihrer Phänomenologie unterscheidende Mikroformationen erkennbar: (a) Nano-Ripple-Formationen, (b) Mikrogräben, (c) tiefe Mikrolöcher sowie (d) konische Mikroformationen. Die Entstehung dieser Strukturen ist von der applizierten Laserleistung, der Intensität bzw. Fluenz sowie der Anzahl der Bestrahlungen abhängig. Während sich konische Mikrostrukturen bei 4 W eingestrahelter Laserleistung ab ca. 20 Bestrahlungen (rechts oben) ausbildeten, waren mit 1,5 W Laserleistung auch bei 50 Bestrahlungen lediglich Nano-Ripple bzw. Grabenstrukturen zu finden (rechts unten).

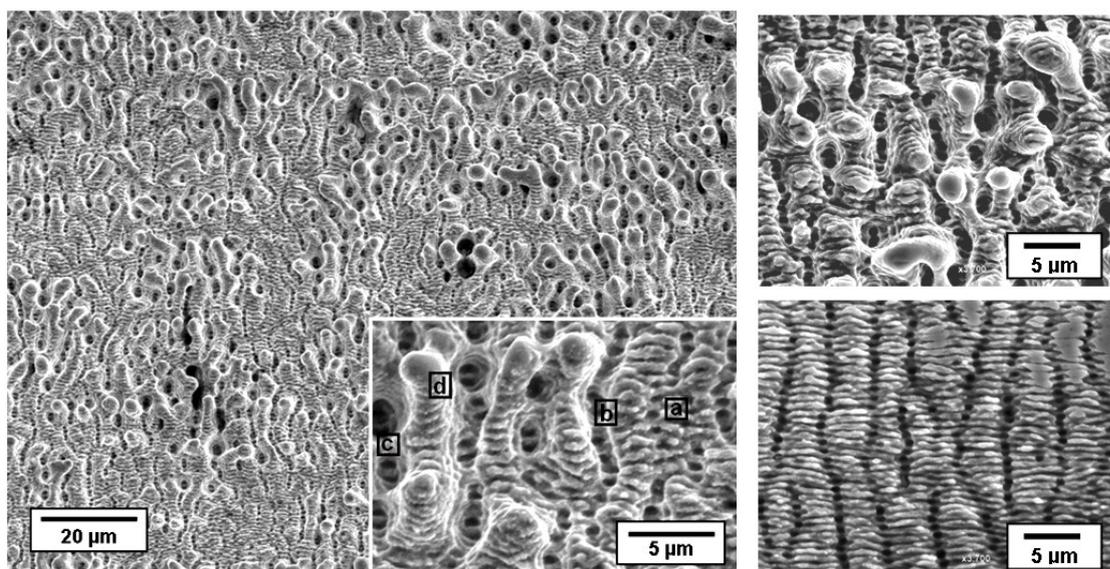


Abb. 6.4.3.20: auf einer laserbearbeiteten Edelstahloberfläche entstandene laserinduzierte Mikrostrukturen

Bei den Nano-Ripple-Strukturen handelt sich um periodische, meist senkrecht zur Polarisationsrichtung der einfallenden Laserstrahlung ausgebildete Formationen in der Größenordnung im Bereich der eingestrahelten Laserwellenlänge.

Abb. 6.4.3.21 zeigt die Ausrichtung der Ripple bei unterschiedlicher Polarisationsrichtung unter sonst gleichen Bearbeitungsbedingungen in Edelstahl. Deutlich ist die senkrechte Ausrichtung der Ripple-Strukturen zur Polarisationsrichtung der einfallenden Laserstrahlung (weißer Pfeil) zu sehen. Zudem ist eine zweite, sich periodisch im Abstand von wenigen μm wiederholende und sich immer senkrecht zu den Ripple-Strukturen ausbildende Mikroformation erkennbar.

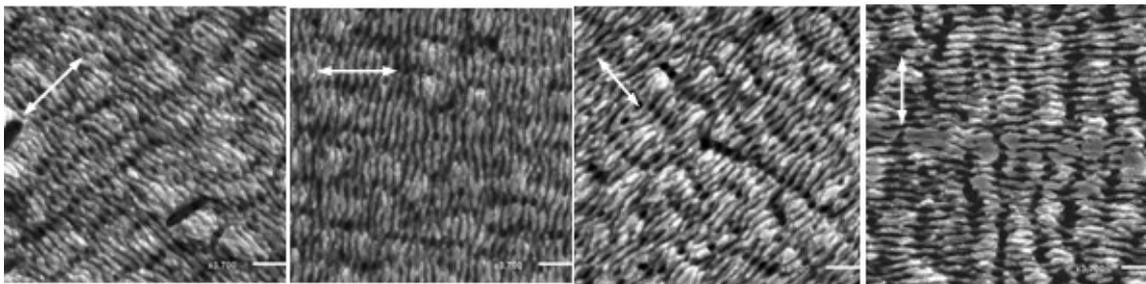


Abb. 6.4.3.21: Ausrichtung der Ripple-Strukturen bei unterschiedlicher Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung (weißer Pfeil)

Ein mit der hochrepetierenden Laserbearbeitung einhergehendes neues Phänomen ist die Entstehung von sogenannten konischen Mikrostrukturen. Gestalt und Größe dieser Formationen sind stark von den Bearbeitungsparametern abhängig. Die Polarisationsabhängigkeit der Ausrichtung der entstandenen konischen Mikrostrukturen ist in Abb. 6.4.3.22 demonstriert. Deutlich ist eine Vorzugsrichtung der Mikrostrukturen senkrecht zur Polarisationsrichtung der einfallenden Laserstrahlung zu erkennen. Die Polarisation der einfallenden Strahlung symbolisiert jeweilig am unteren linken Bildrand ein weißer Pfeil.

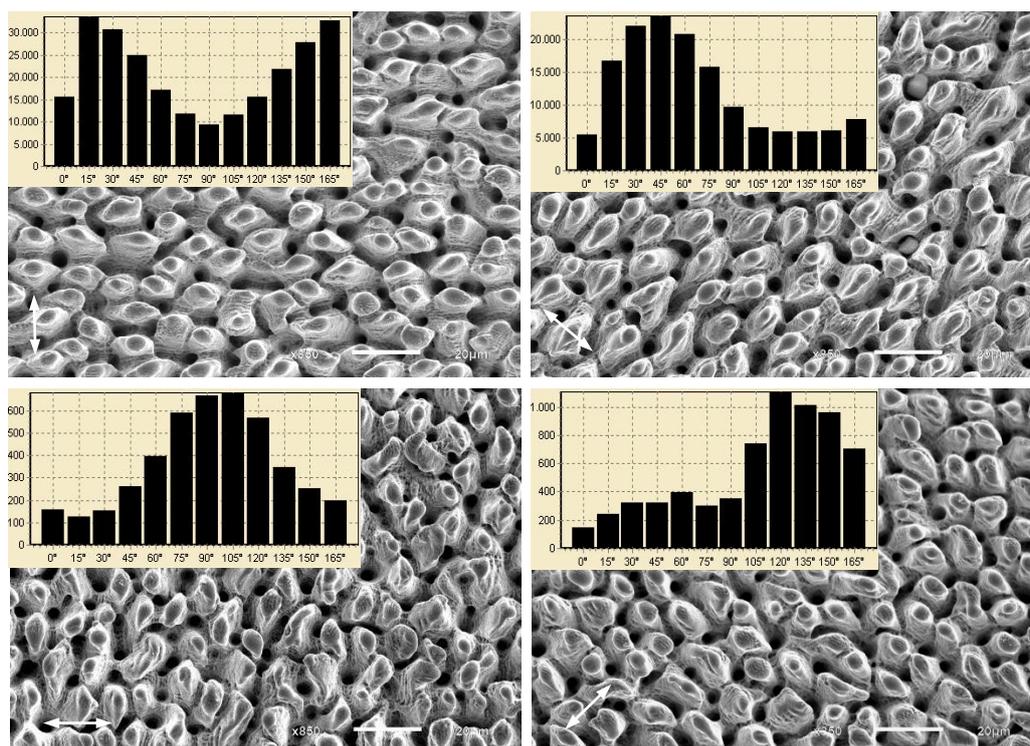
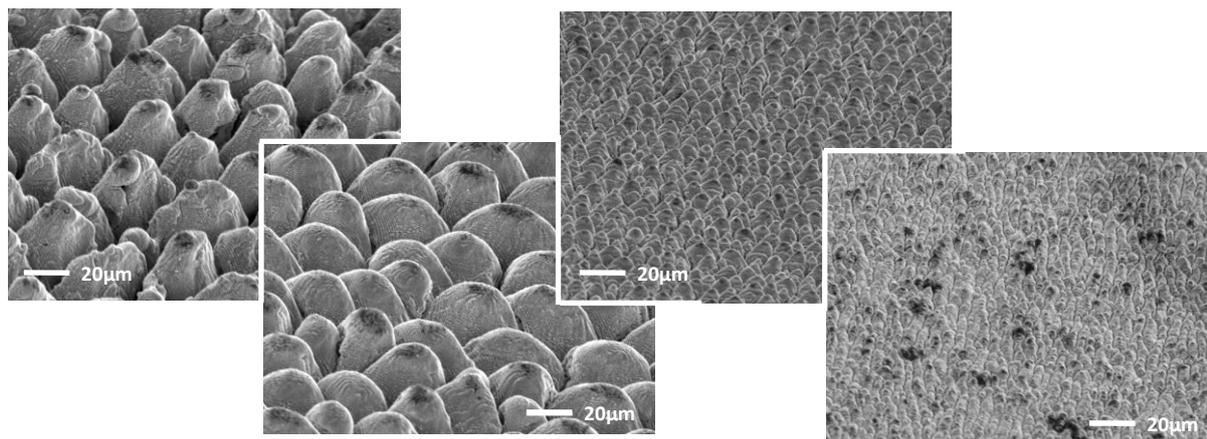
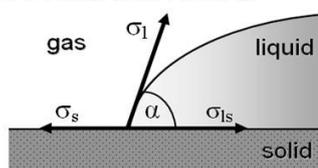


Abb. 6.4.3.22: polarisationsabhängige Ausrichtung der Mikrostrukturen

Durch die Oberflächenmodifikation technischer Oberflächen erschließt sich perspektivisch eine Vielzahl von neuen Anwendungsmöglichkeiten für mikrostrukturierte Oberflächen. Es gelang so z.B. durch Veränderung der Gestalt der Mikrostrukturen die Benetzungseigenschaften einer Edelstahloberfläche zwischen stark hydrophob bis stark hydrophil zu variieren oder das Reflexionsverhalten zu beeinflussen (Abb. 6.4.3.23).

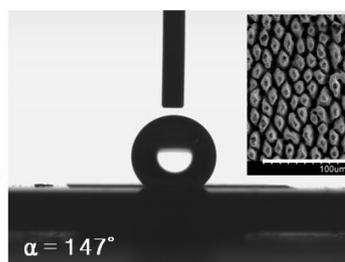


Benetzung nach Young:

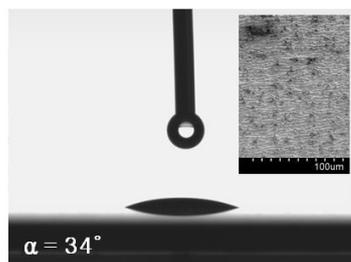


$$\sigma_s = \sigma_{ls} + \sigma_l \cdot \cos \alpha$$

strong machined



soft machined



unmachined

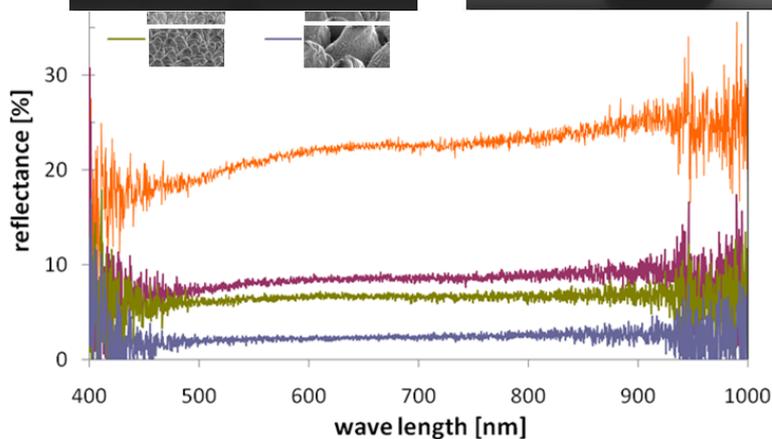
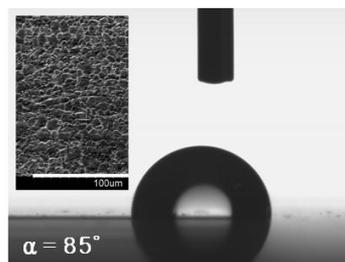


Abb. 6.4.3.23: Änderung von Benetzungs- und Reflexionseigenschaften technischer Edelstahloberflächen: unterschiedlich ausgebildete Mikroformationen (oben), sowie Variation der Benetzungseigenschaften (Mitte) und Reflexionsverhalten (unten)

Untersuchungen zum Aufrauen und Glätten der Oberfläche

Untersuchungen zum Aufrauen von Oberflächen wurden mit verschiedenen ns-Lasersystemen unterschiedlicher Pulslänge (10 ns, 100 ns, 1000 ns) an einem Werkzeugstahl C45 und einem Edelstahl durchgeführt. Für beide Materialien lies sich feststellen, dass die mittlere Rauigkeit mit zunehmender Pulsdauer anstieg (Abb. 6.4.3.24).

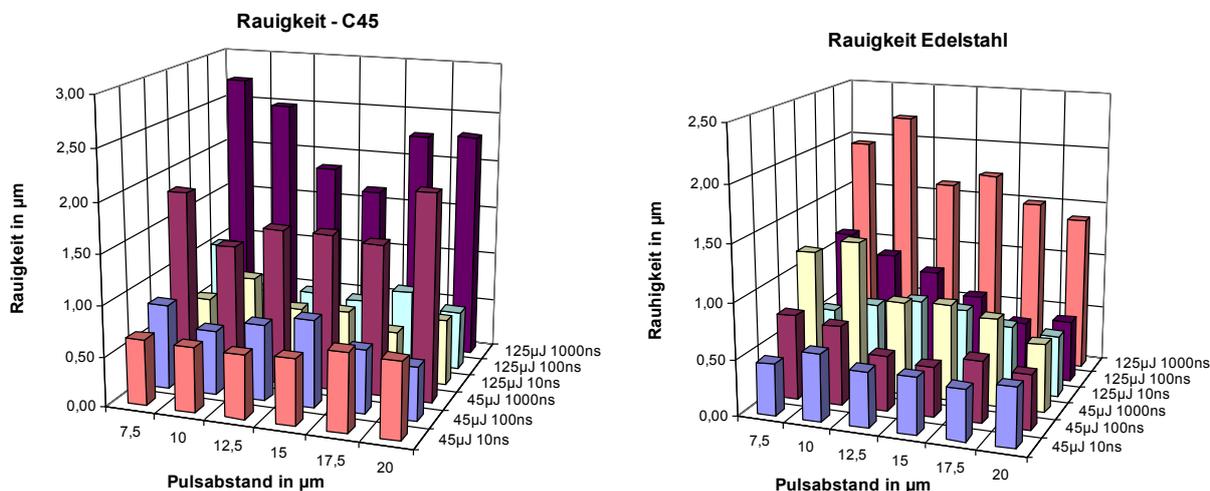
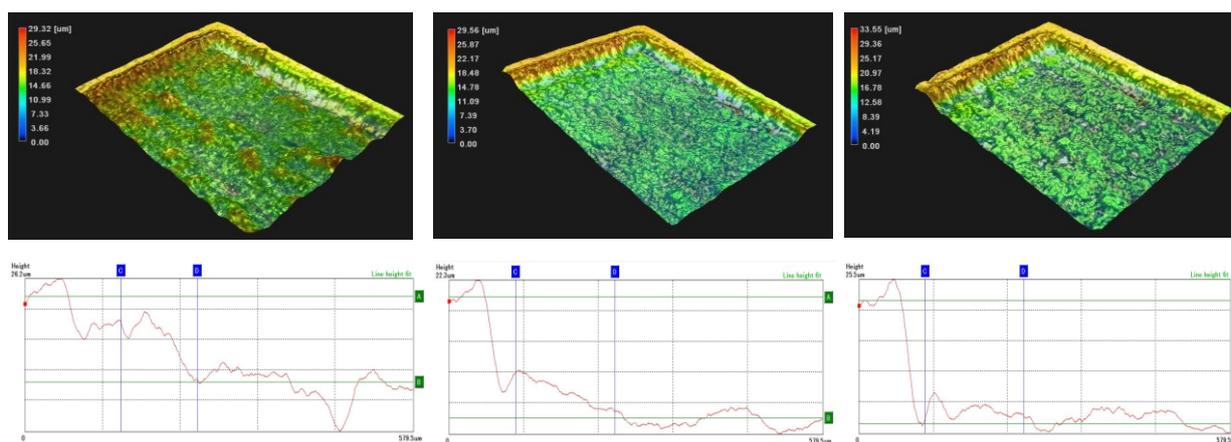


Abb. 6.4.3.24: Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit von Pulslänge, Pulsdistanz und Pulsenergie am Beispiel C45 (links) und Edelstahl (rechts)

Untersuchungen zum Glätten von rauen Metalloberflächen wurden mit einem zusätzlichen ns-Faserlaser durchgeführt. Es bestand die Herausforderung, durch Laserabtrag geschaffene Bereiche definierter Rauigkeit in einem folgenden Bearbeitungsschritt zu glätten. Bei Einstrahlung mit geeigneten Bearbeitungsparametern konnte eine Glättung rauer Oberflächen erreicht werden (Abb. 6.4.3.25). Wurde allerdings die Anzahl der Bestrahlungen zu groß gewählt, so war die Glättung mit einem zusätzlichen Volumenabtrag verbunden.



Grundrauigkeit nach Laserabtrag

Glättung der Oberfläche
5x Bestrahlung

Glättung und Volumenabtrag 10x
Bestrahlung

Abb. 6.4.3.25: Glätten von laserstrukturierten Oberflächen hoher Rauigkeit mittels Laserbestrahlung mit ns-Pulsen

AP 4.4 Hochleistungsvolumenabtrag

2,5 D Mikrostrukturierung

Untersuchungen zur Strahlkaustik

Zunächst wurde die Strahlkaustik des in den Versuchen eingesetzten Monomodefaserlasers in verschiedenen Strahlengängen mit einem HP Mikroskopmonitor der Firma Primes gemessen. Beim 3D Galvoscaner RLSK wies bei einer Brennweite der Planfeldoptik von 500mm der Fokus einen Durchmesser von 78 μm auf, die Rayleighlänge betrug 4 mm, die Beugungsmaßzahl 1,2. Beim Galvoscaner Superscan-SC-30-Y mit einer Brennweite von 230mm wurde ein Fokusdurchmesser von 21 μm gemessen, jeweils unter 86% Leistungseinschluss.

Es zeigte sich, dass schon geringste Verunreinigungen, z.B. durch ein verschmutztes Schutzglas, Einfluss auf das optische System hatten. Bei einer Laserleistung von 300W wurde am Scanner RLSK durch das verschmutzte Schutzglas ein Fokusshift von 1,4 mm gemessen, der Strahlradius vergrößerte sich im Fokus um 3 μm (7%). Außerdem nahm der gestreute Anteil an Laserstrahlung zu. Es kam zu Deformationen in der Intensitätsverteilung aufgrund lokal unterschiedlicher Erwärmung des Schutzglases, was Auswirkungen auf den Laserbearbeitungsprozess hatte.

Weiterhin wurden Messungen zur Zeit- und Leistungsabhängigkeit des Fokussiftes durchgeführt. Beim Scanner Superscan erfolgt bei Beaufschlagung des Strahlführungssystems mit einer Laserstrahlleistung von 1 kW innerhalb von 10 s nach Einschalten des Laserstrahles eine Zunahme des Strahlradius um den Faktor 2. Nach weiteren 50 s war das optische System in einem thermisch stabilen Zustand, wobei zu beachten war, dass sich die Beugungsmaßzahl auf 1,8 verschlechterte. Mit Verdoppelung der Laserleistung auf 2 kW wurde der vierfache Strahlradius nach einer Bestrahlungszeit von 10s gemessen. Ein thermisch stabiler Zustand war innerhalb einer Messzeit von 60s noch nicht erreicht.

Es konnte bis jetzt nicht geklärt werden, welchen zu welchem Anteil die einzelnen optischen Komponenten (Faserende, Kollimator, Umlenkspiegel, Scannerspiegel, Fokussieroptik) den leistungsabhängigen Fokussift beeinflussen. Diese Untersuchungen konnten aufgrund des großen zeitlichen Aufwands nicht in der Projektlaufzeit durchgeführt werden.

Ein definierter Bearbeitungsprozess konnte mit dem vorhandenen Strahlführungssystem somit nur innerhalb der ersten 10 s bei einer Laserleistung von 1 kW und 3 s bei einer Laserleistung von 2 kW stattfinden. In weiteren Untersuchungen wurde deshalb die Auswirkung des Einfügens von Pausenzeiten untersucht. Es wurde festgestellt, dass nur die eingebrachte mittlere Leistung einen Einfluss auf den Fokussift hatte. Die Spitzenleistung hatte bei einem geschalteten oder gepulsten Laser auf das optische System nur einen geringen Einfluss. Das hieß, bei der Bearbeitung mit höheren Spitzenleistungen musste mit zunehmender Leistung eine größere Pause zwischen der Bearbeitung zur Abführung der Wärme in den Komponenten berücksichtigt werden. Die Untersuchungen zum definierten Hochleistungsvolumenabtrag wurden deshalb grundsätzlich mit definierten Pausen durchgeführt, so dass in allen Versuchen der Durchmesser und die Lage des Fokus stabil waren.

Grundlegende Untersuchungen mit schneller Strahlableitung

Es wurde zunächst der Materialabtrag an verschiedenen Materialien mit einem Fokussdurchmesser von $78\mu\text{m}$ untersucht. Dazu wurde die Bearbeitungsgeschwindigkeit im Bereich von 100 bis 600 m/min sowie die Laserleistung von 0,5 kW bis 3 kW variiert. Dabei stellte sich heraus, dass bei Edelstahl 1.4301 ausschließlich bei Geschwindigkeiten über 500 m/min ein zuverlässiger Abtrag erzeugt werden konnte. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten entstanden lediglich Aufwürfe bzw. Schweißspuren. Die Begründung für den Effekt wurde schon unter Kapitel 6.3.3 AP 3.2 angegeben. Durch die hohe applizierte Intensität war zwar auch bei niedrigen Geschwindigkeiten ein Abtrag gegeben, die aber dann vorliegende hohe Streckenenergie führte zur Bildung von übermäßig viel Schmelze infolge zum Tiefschweißeffekt. Im Übergangsbereich vom Schweißen zum Abtragen trat der bekannte Humping-Effekt auf. Bei genügend hoher Geschwindigkeit bzw. genügend kleiner Streckenenergie konnte die Schmelze zum großen Teil ausgetragen werden.

Mit zunehmender Anzahl der Bestrahlungen wurde ein nahezu lineares Ansteigen der Abtragtiefen beobachtet. Die höchsten Abtragraten wurden wie erwartet bei der maximalen Leistung erreicht. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass mit steigender Anzahl der Bestrahlungen aufgrund der in zunehmender Tiefe abnehmenden Intensität immer mehr Schmelze während der Bearbeitung entstand. Die Schmelze führte dazu, dass sich die Spuren verengten und teilweise sogar wieder zu schmolzen sowie wiedererstartete Schmelzspritzer an den Rändern der Abtraggräben auftraten. In Abb. 6.4.3.26 links ist ein nahezu schmelzfreien Abtrag sowie rechts eine durch einen höheren Energieeintrag infolge geringerer Bearbeitungsgeschwindigkeit teilweise wieder zu geschmolzene Abtragformation zu sehen.

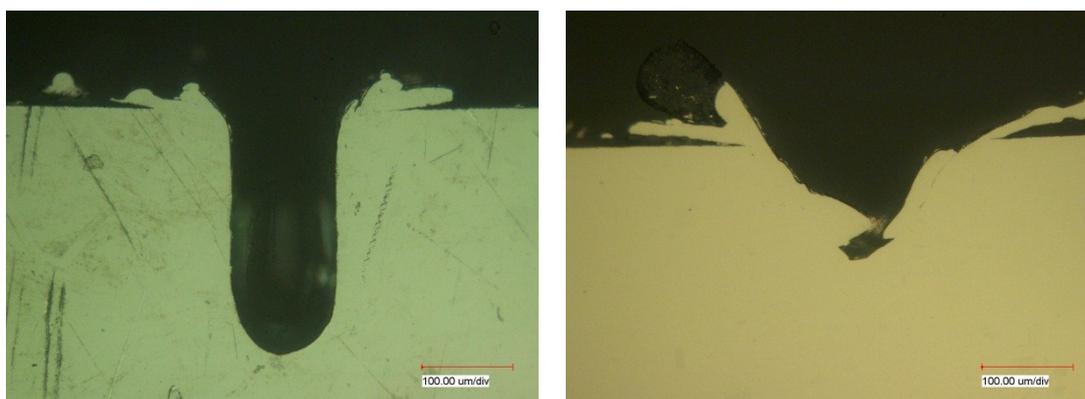


Abb. 6.4.3.26: Querschliff, Edelstahl 1.4301; $d = 78\mu\text{m}$, $P = 2,35\text{ kW}$; links: $v = 600\text{ m/min}$, 10 Bestrahlungen; rechts: $v = 500\text{ m/min}$, 5 Bestrahlungen

Mit optimierten Parametern konnte ein Edelstahlblech mit einer Dicke von 0,3mm in einer gemittelten Geschwindigkeit von 60 m/min getrennt werden (10 Bestrahlungen).

Die eingetragene Streckenenergie folgte einem linearen Trend bis zu einer untersuchten Abtragtiefe von $600\mu\text{m}$ und einer Geschwindigkeit von 500 m/min. So konnte mit einer Streckenenergie von 100 J/m kontinuierlich ein Zuwachs an Abtragtiefe von $14\mu\text{m}$ pro Be-

strahlung erreicht werden. Dies deutet darauf hin, dass der Abtragprozess unabhängig von der eingestrahler Leistung und Anzahl der Bestrahlungen immer etwa gleich abläuft. Bei Erhöhung der Geschwindigkeit auf 600 m/min wurde der Prozess bis zu einer applizierten Streckenenergie von 300 J/m leicht effektiver mit einem Zuwachs von 17µm pro 100 J/m Streckenenergie. Bei niedrigerer oder höherer Leistung stieg der Energiebedarf pro Abtrag, so dass in dem Fall zusätzliche Prozesse wirken mussten.

Es wurden ergänzende Untersuchungen zum Mikroschneiden von Wolframblech (Dicke 1 mm) durchgeführt. Hier lag die Mindestgeschwindigkeit für den Abtrag nur bei 300 m/min. Das lag am höheren Streckenenergiebedarf, um Wolfram überhaupt schmelzen zu können. Der Grund ist die wesentlich erhöhte Schmelz- und Verdampfungstemperatur von Wolfram sowie die etwa doppelt so große Schmelz- und Verdampfungswärme gegenüber Edelstahl.

Für den Abtragprozess stellte sich bis zu fünf Bestrahlungen quasi ein linearer Zusammenhang zwischen der Gesamtabtragtiefe und der Anzahl der Bestrahlungen dar. Bei einer Verdopplung der Bestrahlungen nahm die Gesamtabtragtiefe bei den niedrigen Geschwindigkeiten < 500 m/min jedoch nicht mehr linear zu. Diese Beobachtung sprach dafür, dass der Abtragprozess bei diesen Geschwindigkeiten mit zunehmender Abtragtiefe ineffektiver wurde.

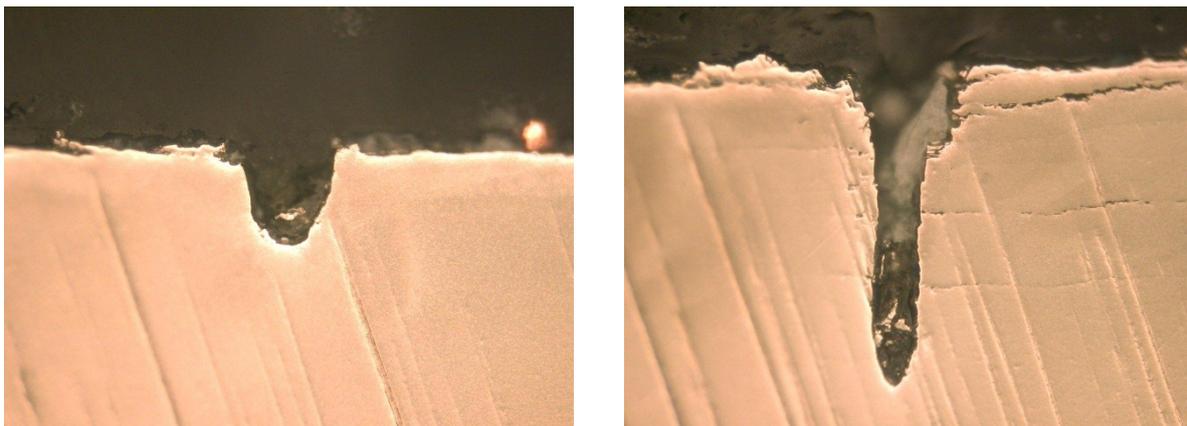


Abb. 6.4.3.27: Querschliff, Wolfram, $d = 78 \mu\text{m}$, $P = 2,82 \text{ kW}$; $v = 300 \text{ m/min}$; links: 2 Bestrahlungen; rechts: 10 Bestrahlungen

Abbildung 6.4.3.27 links zeigt ein Schliffbild einer Abtragspur nach 2 Bestrahlungen. Es ist ein parabelförmiger Austrag zu sehen. Innerhalb der Spur sind nur wenige Ablagerungen oder sonstige Verunreinigungen zu erkennen. Bei den Ablagerungen links des Abtraggrabens handelte es sich wahrscheinlich um wiedererstartete Schmelzspritzer, die während der Bearbeitung durch das starke Prozessplasma aus dem Graben geschleudert wurden.

Abbildung 6.4.3.27 rechts zeigt eine Spur mit 10 Bestrahlungen. Auffällig ist dabei, dass die Breite des Grabens im unteren Bereich deutlich abnimmt. Das liegt daran, dass bei steigender Anzahl der Bestrahlungen in der Tiefe mehr Schmelze entstand und diese Schmelze aufgrund der großen Tiefe des Grabens nicht mehr ausgetrieben werden konnte. Die Schmelze lagert sich an den Wänden des Grabens ab und erstarrt dort. Dadurch verengte die Schmelze den Graben deutlich. Typisch für dieses Phänomen war auch eine leichte Einschnürung. Das bedeutete, dass der Graben ungefähr bei der Hälfte der Gesamttiefe die geringste Breite

aufwies und danach zum Boden hin wieder etwas breiter wurde. Weiterhin konnte eine Verschlechterung der Gesamtqualität des Abtragergebnisses festgestellt werden. Es lagerten sich zunehmend Schmelzspritzer an der Materialoberseite ab.

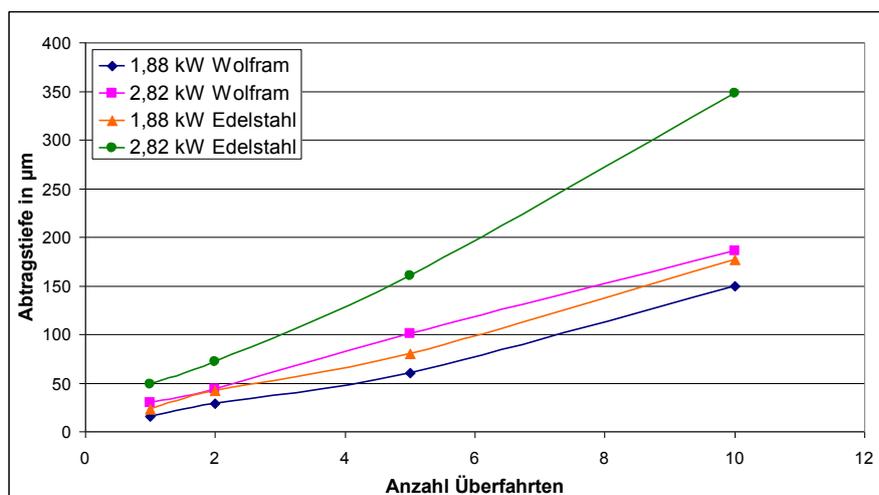


Abb. 6.4.3.28: Vergleich der Abtragtiefen von Wolfram und Edelstahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Bestrahlungen, $d = 78 \mu\text{m}$, $v = 600 \text{ m/min}$, Parameter Laserleistung

In Abbildung 6.4.3.28 ist zu erkennen, dass die Abtragtiefen für Wolfram bei gleicher Laserleistung und gleicher Scangeschwindigkeit wie erwartet deutlich niedriger ausfielen. Für Edelstahl lag die maximale Abtragtiefe mit einer Laserleistung von 2,82 kW nach 10 Bestrahlungen bei ca. 350 μm , wohingegen Wolfram lediglich bis zu einer Tiefe von ca. 190 μm abgetragen werden konnte. Bei Edelstahl nahm der Abtrag pro Bestrahlung mit erhöhter Leistung überproportional zu.

Anschließend wurde der Materialabtrag mit einem Fokussdurchmesser von 21 μm und damit einer um den Faktor 15 erhöhten Intensität untersucht. Es zeigt sich auch hier, dass eine Zunahme der Anzahl der Bestrahlungen ein Ansteigen der Abtragtiefe bewirkte. Weiterhin wurde der Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit deutlich. Mit steigender Geschwindigkeit war wie erwartet eine Abnahme der Abtragtiefe verbunden.

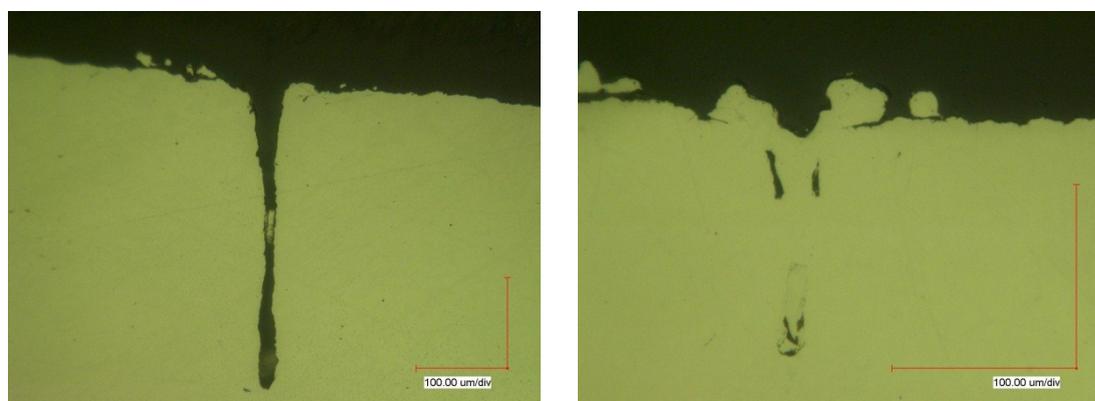


Abb. 6.4.3.29: Mikroschnitte erzielt mit unterschiedlichen Bearbeitungsergebnissen; Edelstahl 1.430, $d = 21 \mu\text{m}$; links: $P = 620 \text{ W}$; $v = 600 \text{ m/min}$; 10 Bestrahlungen; rechts: $P = 430 \text{ W}$; $v = 420 \text{ m/min}$; 5 Bestrahlungen

Abbildung 6.4.3.29 zeigt den Einfluss der Intensität bzw. Bearbeitungsgeschwindigkeit auf das qualitative Schnittergebnis. Bei geringeren Intensitäten bzw. einem höheren Wärmeeintrag infolge längerer mittlerer Einwirkzeit des Laserstrahles bei kleinerer Scangeschwindigkeit war vorrangig ein Aufschmelzen des Materials zu erkennen (rechts). Bedingt durch einen geringen Schnittspalt bei kleinen Fokusdurchmessern gelang es der Schmelze nicht, tiefere Regionen zu verlassen, was zu einem Anlagern innerhalb der Spur und damit zum Verengen bzw. Schließen des Grabens führte. Eine höhere Geschwindigkeit bei höherer Laserleistung führte hingegen zu einem qualitativ guten Schnittspalt (links).

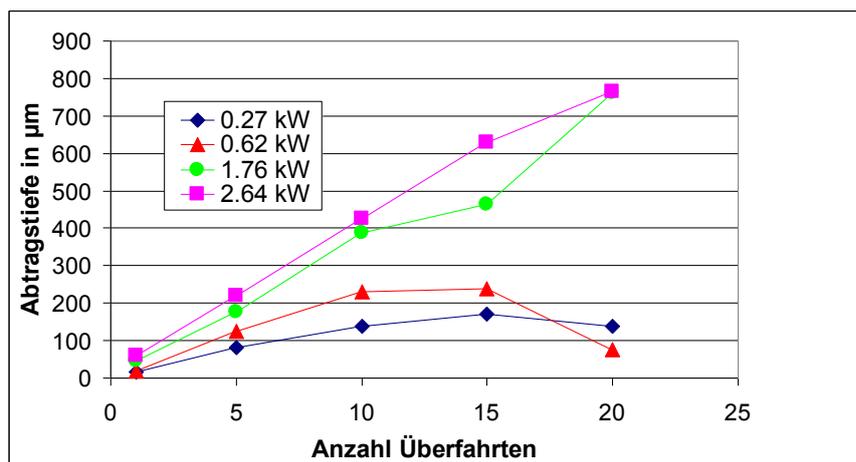


Abb. 6.4.3.30: Trennspalttiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Bestrahlungen; Edelstahl 1.430; Dicke 3 mm; $d = 21 \mu\text{m}$; $v = 900 \text{ m/min}$

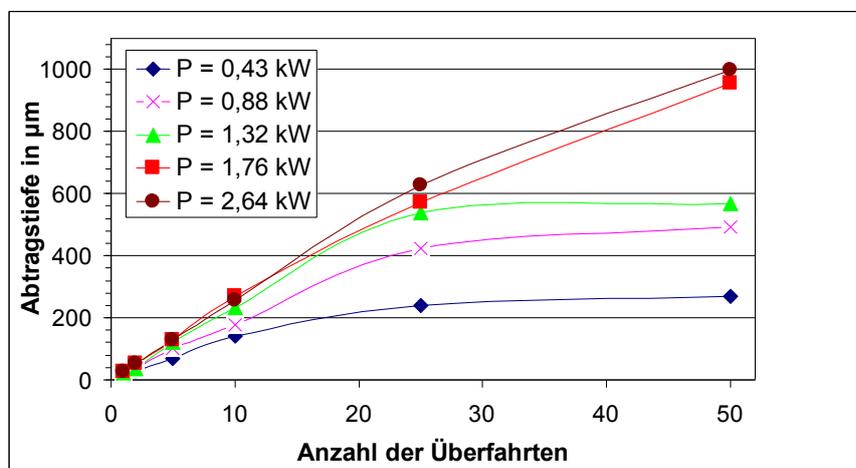


Abb. 6.4.3.31: Trennspalttiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Bestrahlungen; Edelstahl 1.430; Dicke 3 mm; $d = 21 \mu\text{m}$; $v = 1.200 \text{ m/min}$

Ab einer Scangeschwindigkeit von 480 m/min wurde der Prozess bereits erheblich effektiver. Mit einer Streckenenergie von 100 J/m konnte kontinuierlich ein Zuwachs an Abtragtiefe von 75 μm erreicht werden, also ungefähr um den Faktor 5 höher als bei dem größeren Fokusdurchmesser von 78 μm . Dies funktionierte linear bei bis zu 5 Bestrahlungen, danach kam es zu einem zusätzlichen Energieverbrauch oder einer Störung des Abtragprozesses, der Pro-

zess wurde wesentlich uneffektiver. Eine weitere Stabilisierung des Abtragprozesses tat bei noch höheren Scangeschwindigkeiten auf.

Bei einer Geschwindigkeit von 900 m/min war der Abtragprozess bei Anwendung von bis zu 5 Bestrahlungen und einer Leistung von 1,76 kW sehr gut reproduzierbar (Abb. 6.4.3.30). In 5 Versuchsreihen wurden Abweichungen in der Trennspalttiefe von maximal 3% festgestellt. Im Gegensatz zur Geschwindigkeit von 500 m/min mit fast doppelter Streckenenergie zeigte sich aber, dass bei mehr als 10 Bestrahlungen höhere Leistungen eingesetzt werden müssen, um eine weitere Vergrößerung der Trennspalttiefe zu bewirken.

Die kumulierte Schnittgeschwindigkeit von 75 m/min für das Trennen einer Blechdicke von 0,5 mm mit 12 Bestrahlungen bei Anwendung einer Scangeschwindigkeit von 900 m/min lag über der in der Literatur angegebenen Obergrenze von 60 m/min für das Remote-Schneiden. Es müssen somit Sondereffekte im Prozess zum Tragen gekommen sein, welche die Effizienz erhöhten, z.B. das Austragen von Schmelze durch den Plasmadruck. Bei einer Scangeschwindigkeit von 1.200 m/min wären 20 Bestrahlungen zum Durchschneiden notwendig gewesen, so dass hier die kumulierte Geschwindigkeit auf 60 m/min absank (Abb. 6.4.3.31).

Es schien bei beiden Geschwindigkeiten ein Leistungsschwellwert von ca. 1,5 kW zu existieren, der überschritten werden musste, um bei hohen Prozessgeschwindigkeiten auch größere Trennspalttiefen noch prozesssicher erzeugen zu können. Eine weitere Erhöhung der Laserleistung von 1,76 auf 2,65 kW brachte keine adäquate Zunahme der Prozessleistung. Offensichtlich wurde die zusätzliche Streckenenergie vorrangig im Prozessplasma umgesetzt.

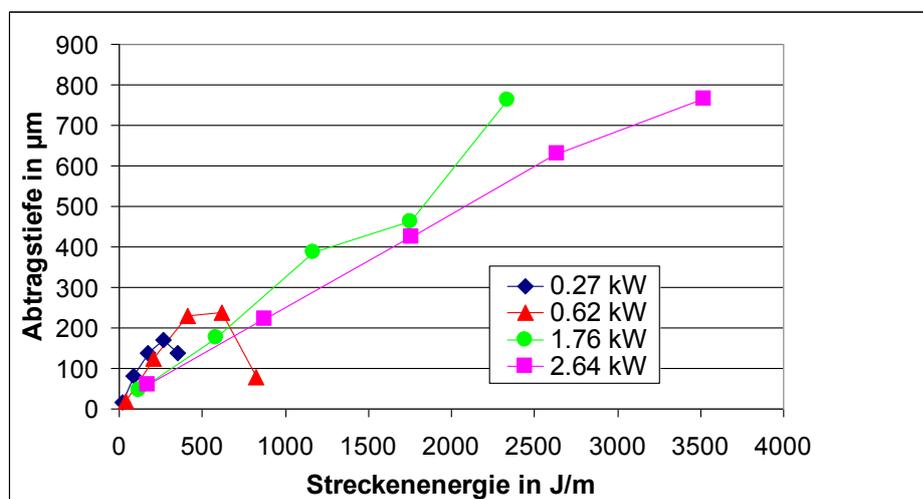


Abb. 6.4.3.32: Trennspalttiefe in Abhängigkeit vom kumulierten Streckenenergiebedarf; Edelstahl 1.4301; Dicke 3 mm; $d = 21 \mu\text{m}$; $v = 900 \text{ m/min}$

Eine Analyse des kumulierten Streckenenergiebedarfes bei einer Scangeschwindigkeit von 900 m/min zeigte die mit steigender Leistung nachlassende Prozesseffizienz deutlich (Abb. 6.4.3.32). Bei der niedrigen Leistung von 270 W lag der Streckenenergiebedarf noch unter dem Wert für eine Scangeschwindigkeit von 500 m/min, er betrug 100 J/m für 100 µm Trennspalttiefe. Bei einer Leistung von 2.64 kW waren es hingegen bereits 425 J/m für 100 µm Trennspalttiefe gegenüber 120 J/m bei der Scangeschwindigkeit 500 m/min. Das zeigt

eine abnehmende Prozesseffizienz, bei allerdings auch einem bis zu 20 Bestrahlungen stabilen Prozess. Wie mit der High-Speed Kamera zu beobachten war, nahm die Bildung des Prozessplasmas mit steigender Geschwindigkeit zu! Die dafür notwendige zusätzliche Energie war im steigenden Streckenenergiebedarf zu erkennen.

Die ermittelte Abtragraten von Edelstahl streute unabhängig von der Intensität und der Scangeschwindigkeit zwischen 0,9 und 2,4 cm³/min. Tendenziell nahm sie mit der Anzahl der Bestrahlungen und einer Verringerung der Laserleistung ab. Die Werte entsprachen im Durchschnitt der Zielvorgabe von 1,5 cm³/min.

Die Anwendung sehr kleiner Fokusburchmesser von 21 µm mit entsprechend hohen Intensitäten führt zu extrem kleinen Trennspalten mit Breiten bis zu < 20 µm bei sehr geringer Wärmeeinflusszone. Die pro Bestrahlung eingebrachten Trennspalte waren mit einem Fokusburchmesser von 21 µm im Durchschnitt bei nahezu gleicher eingebrachter Leistung um den Faktor 3,7 tiefer (Abb. 6.4.3.33) als bei einem Durchmesser von 78 µm. Dies entsprach nicht dem Verhältnis der angewandten Intensitäten, wie man hätte annehmen können, sondern dem Verhältnis der Fokusburchmesser. Das war dadurch erklärbar, dass zwar die Intensität mit dem Quadrat des Fokusburchmessers anstieg, gleichzeitig aber die Einwirkzeit linear mit dem Fokusburchmesser abnahm. Beide Effekte waren also gegenläufig, eine höhere Intensität führt zu einem tieferen Trennspalt, eine geringere Einwirkzeit hingegen zu einem weniger tiefen Trennspalt. Offensichtlich wirkten beide Effekte linear.

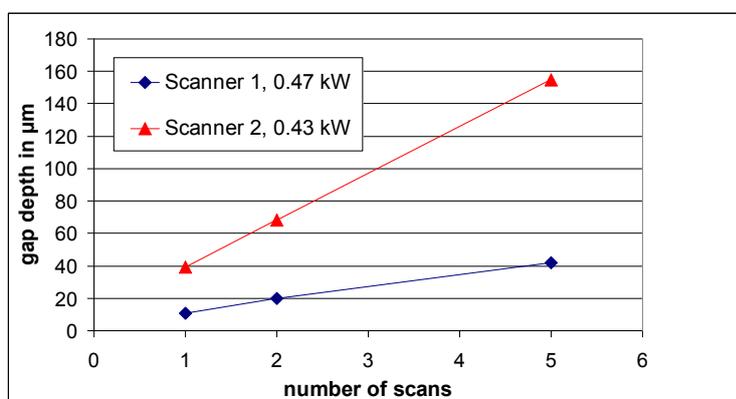


Abb. 6.4.3.33: Trennspalttiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Bestrahlungen; Edelstahl 1.4301; $v = 600$ m/min; Parameter Fokusburchmesser (Scanner 1 = 78µm, Scanner 2 = 21 µm)

Grundlegende Untersuchungen mit ultraschneller Strahlableitung

Bei der Applikation von ultrahohen Scangeschwindigkeiten, wie sie mit dem Polygonspiegelscanner erzeugt werden können ($\gg 1.000$ m/min) in Verbindung mit sehr kleinen Fokusburchmessern kommt es zu sehr kurzen Einwirkzeiten des Laserstrahles auf der Bearbeitungsstelle. Zur Abschätzung der mittleren Einwirkzeit wurde der Strahldurchmesser durch die Scangeschwindigkeit dividiert (Tab. 6.4.3.4).

Die kurzen Einwirkzeiten bei ultrahoher Scangeschwindigkeit können ähnlich wie bei der Materialbearbeitung mit kurz gepulsten Lasern dazu führen, dass trotz einer ausreichend hohen Intensität die Einwirkzeit nicht ausreicht, um genügend Energie zur Verdampfung des

Tab. 6.4.3.4: mittlere Einwirkzeit

Scangeschwindigkeit [m/min]	Einwirkzeit [ns]
1.200	1.050
2.250	560
4.500	280
9.000	140
13.500	93
18.000	70

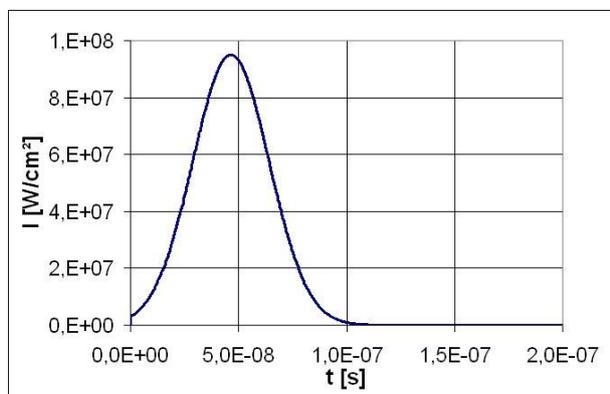


Abb. 6.4.3.34: zeitlicher Verlauf der Intensität für Berechnung

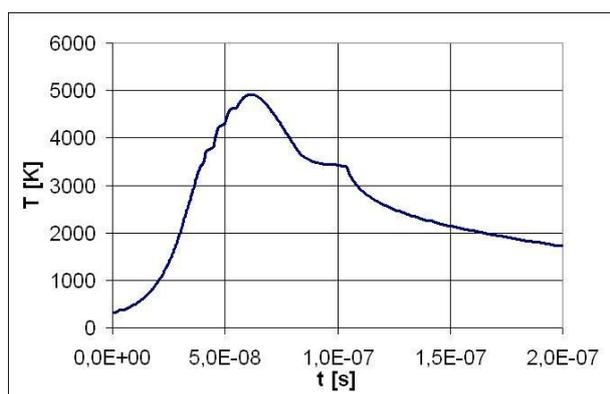


Abb. 6.4.3.35: berechneter Temperaturverlauf auf Oberfläche in Fokusmitte

dass an Stellen erhöhter Absorption durch Störungen in der Oberfläche der Verdampfungsprozess begann.

Materials an der Oberfläche einzubringen. Zur ersten Abschätzung des Einflusses wurde eine einfache Temperaturfeldberechnung für die Bestrahlung von Wolfram durchgeführt. Dazu wurde die zeitabhängige Wärmeleitungsgleichung in zweidimensionalen Zylinderkoordinaten mit der Differenzenmethode gelöst. Zur Näherung der Zeitabhängigkeit der Intensität wurde die Einwirkzeit von 93 ns bei einer Scangeschwindigkeit von 13.500 m/min als gaußförmig verteilt angenommen (Abb. 6.4.3.34).

Trotz einer hohen Intensität von $9,5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ bei Applikation einer Laserleistung von 330 W konnte wegen der kurzen Einwirkzeit die Siedetemperatur von Wolfram in Höhe von 5828 K auf der Oberfläche entsprechend der Berechnung nicht erreicht werden (Abb. 6.4.3.35). Bei Betrachtung der mit den gleichen Parametern erzielten experimentellen Bearbeitungsergebnisse fiel allerdings auf, dass partiell bereits Abträge zu verzeichnen waren (Abb. 6.4.3.36). Es wurde angenommen, dass an den Stellen eine erhöhte Absorption auf der Oberfläche vorlag.

Eine wiederholte Berechnung mit einem verminderten Reflexionsgrad von $R = 0,2$ (geschätzt, anstatt 0,59 beim ungestörtem Material) erbrachte einen Temperaturanstieg auf die Siedetemperatur. Entsprechend Berechnung war dann eine Schmelzbildung bis in eine Tiefe von $0,8 \mu\text{m}$ zu verzeichnen, die verdampfte Schichtdicke betrug ca. 50nm. Dies entsprach dem experimentellen Ergebnis. Es konnte daraus geschlussfolgert werden,

Eine Erhöhung der Laserleistung auf 990 W, was einer Intensität von $2,85 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ entsprach, erbrachte eine durchgehende Abtragspur bei der ultrahohen Scangeschwindigkeit von 13.500 m/min (Abb. 6.4.3.37). Die Breite der Spur war mit 28 μm deutlich größer als der Strahldurchmesser.

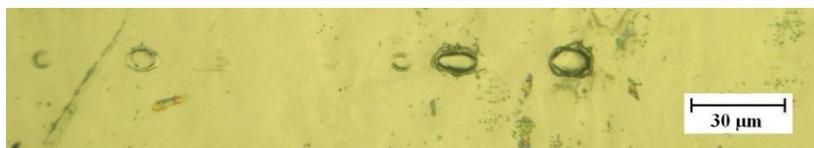


Abb. 6.4.3.36: Digitalaufnahme, Wolfram, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, $P = 330 \text{ W}$, 1 Scan

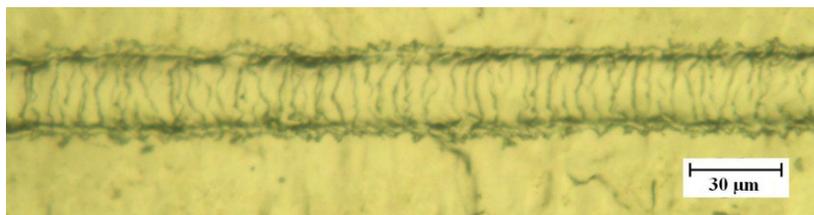


Abb. 6.4.3.37: Digitalaufnahme, Wolfram, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, $P = 990 \text{ W}$, 1 Scan

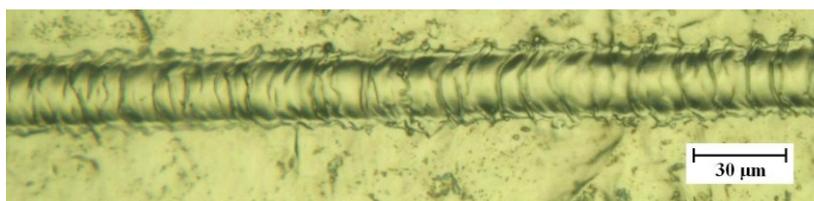


Abb. 6.4.3.38: Digitalaufnahme, Wolfram, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, $P = 330 \text{ W}$, 1 Scan

Die Berechnung ergab hierzu eine Tiefe von 0,65 μm und eine Breite von 25 μm für die Schmelzbildung und eine verdampfte Schichtdicke von ebenfalls 50 nm. Durch die erhöhte Intensität war ein steilerer Temperaturgradient zu verzeichnen.

Alternativ führte die ursprüngliche Laserleistung von 330 W bei einer Reduzierung der Geschwindigkeit auf 4.500 m/min zu einer gleichmäßigen Abtragspur (Abb. 6.4.3.38). Die Einwirkzeit betrug in dem Fall 280 ns.

Entsprechend Berechnung war hier eine größere Schmelztiefe von 1 μm zu verzeichnen. Dies wurde experimentell bestätigt. Durch die geringere Intensität entsprach die Breite der Spur genau dem Strahldurchmesser von 21 μm , was auch die Berechnung ergab.

Die einfachen Temperaturfeldberechnungen mit gepulster Einstrahlung zeigten schon eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

Die erzeugten Spurbreiten konnten beim oberflächennahen Abtrag in Abhängigkeit von der applizierten Laserleistung unabhängig vom Material deutlich größer als der Strahldurchmesser werden (Abb. 6.4.3.37, 6.4.3.39 links). Dies lag zum einen entsprechend der durchgeführten Simulation an der über den Strahldurchmesser hinausgehenden Schmelzso-

ne. Wie parallel durchgeführte Untersuchungen mit einer High-Speed Kamera zeigten, sollte außerdem die verstärkte Ausbildung von Plasma dafür verantwortlich sein.

Die Abtragprodukte waren sowohl gasförmig als auch flüssig. Mit zunehmender Abtragtiefe nahm der Anteil an flüssigem Material zu. Das ausgetragene Material bildete aufgrund der Oberflächenspannung Kugeln, deren Durchmesser im Bereich von 1 bis 5 μm lag. Dieser Prozess nahm mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Das schmelzflüssige Material wurde entgegen der Scanrichtung ausgetragen. Mit zunehmender Abtragtiefe kam es zur seitlichen Anlagerung von Material an die Schnittspaltwand. Es entstand eine schichtweise Ablagerung mit einem ca. 16 μm breiten Spalt (Abb. 6.4.3.39 rechts). Die Spaltbreite lag unterhalb des Fokussdurchmessers.

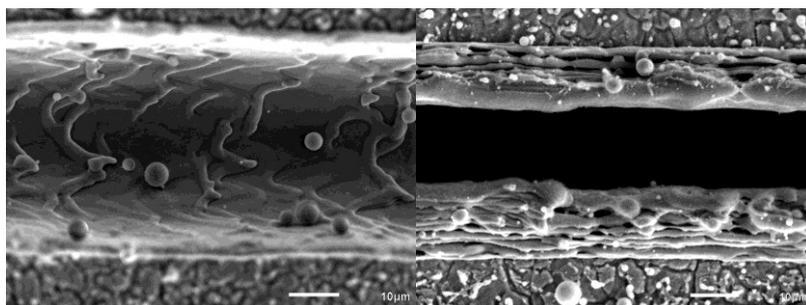


Abb. 6.4.3.39: REM-Aufnahmen, Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 660 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, links: 10 Scans, rechts: 25 Scans

Abb. 6.4.3.40 zeigt die weltweit ersten Untersuchungsergebnisse zum Hochgeschwindigkeits-Abtrag im Mikrobereich, die mit einer ultraschnellen Polygonspiegel-Strahlableitung erzielt wurden. Qualitativ sind die Ergebnisse mit der schnellen Ablenkung mit Galvo-Scanner vergleichbar, obwohl eine extrem kurze Einwirkzeit von nur 93ns vorlag. Die maximal erreichbare Abtragtiefe war aufgrund der auf 100 begrenzten Anzahl der Scans nur für die Laserleistungen 0,33 kW (80 μm) und 0,5 kW (115 μm) zu erkennen.

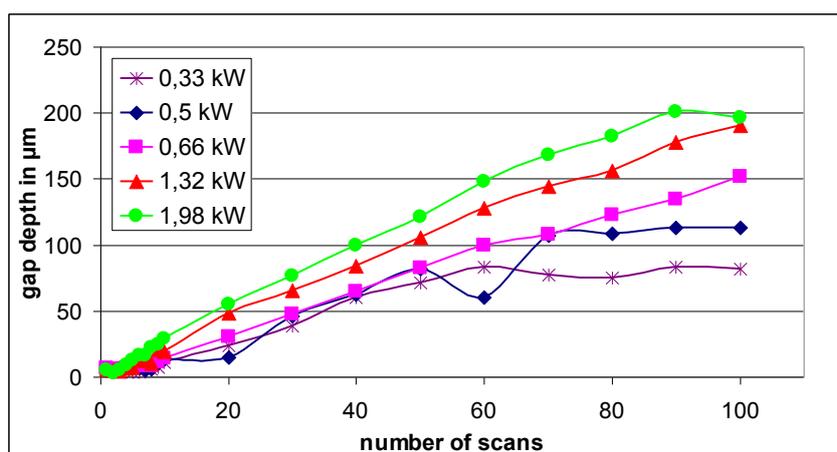


Abb. 6.4.3.40: Abtragtiefe in Abhängigkeit von der Scananzahl, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, Parameter Laserleistung

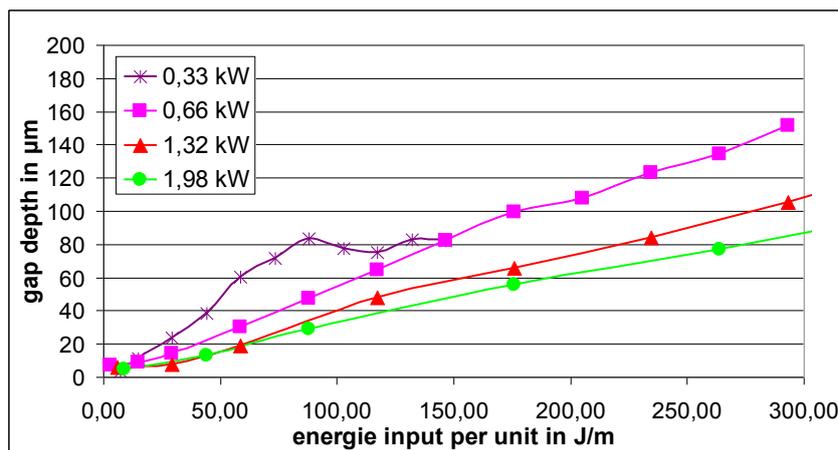


Abb. 6.4.3.41: Abtragtiefe in Abhängigkeit von der kumulierten Streckenenergie, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, Parameter Laserleistung

Eine Analyse der benötigten Streckenenergie (Abb. 6.4.3.41) erbrachte die gleichen qualitativen Erkenntnisse wie bei der Scangeschwindigkeit 1.200 m/min . Auch die quantitativen Ergebnisse waren ähnlich. Für eine Laserleistung von $1,32 \text{ kW}$ war in beiden Fällen ein Streckenenergiebedarf von ca. 280 J/m erforderlich, um eine Abtragtiefe von $100 \mu\text{m}$ zu erzielen.

Der Abtrag pro Bestrahlung nahm mit zunehmender Scangeschwindigkeit immer mehr ab (Abb. 6.4.3.42). Für die eingesetzte Laserleistung von $1,32 \text{ kW}$ ergab sich eine maximal erreichbare Abtragtiefe von $550 \mu\text{m}$. Die reale Bearbeitungsgeschwindigkeit lag über den gesamten Geschwindigkeitsbereich von $1.200\text{--}18.000 \text{ m/min}$ für eine Abtragtiefe von $100 \mu\text{m}$ bei ca. 300 m/min unter Beachtung der Anzahl der Bestrahlungen.

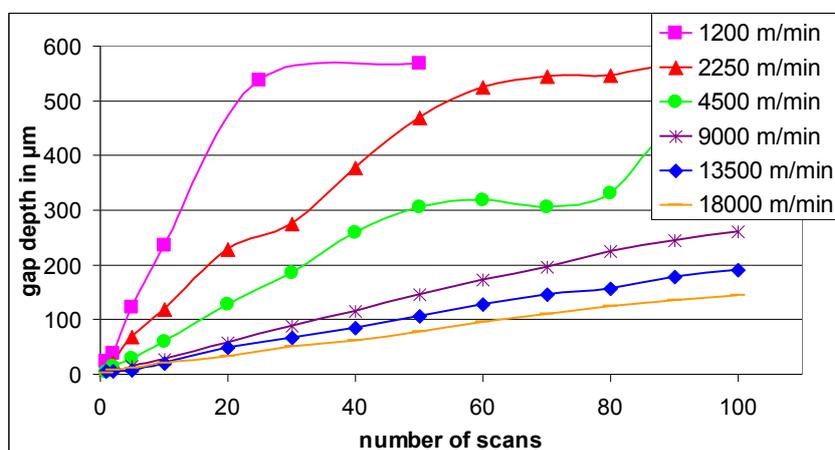


Abb. 6.4.3.42: Abtragtiefe in Abhängigkeit von der Scananzahl, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 1,32 \text{ kW}$, Parameter Scangeschwindigkeit

Die benötigte Streckenenergie bis zur Erzielung einer Abtragtiefe bis $100 \mu\text{m}$ lag ebenfalls im gesamten Geschwindigkeitsbereich von $1.200\text{--}18.000 \text{ m/min}$ bei 280 J/m (Abb. 6.4.3.43). Bei größeren Abtragtiefen war eine leichte Streuung der Werte zu verzeichnen.

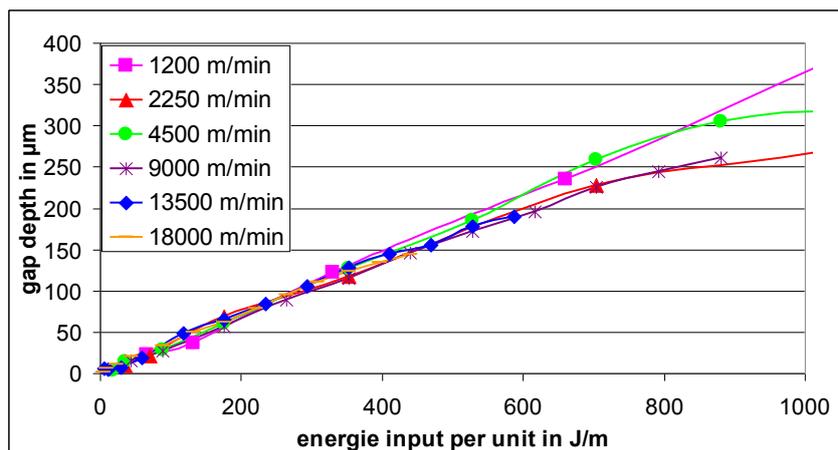


Abb. 6.4.3.43: Abtragtiefe in Abhängigkeit von der kumulierten Streckenenergie, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 1,32 \text{ kW}$, Parameter Scangeschwindigkeit

Die Volumenabtragsrate war abhängig von der Abtragtiefe, der eingebrachten Laserleistung und der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Mit zunehmender Tiefe und Geschwindigkeit nahm sie ab, mit steigender Laserleistung zu. Die Abtragsrate schwankte zwischen $0,9 - 2,4 \text{ cm}^3/\text{min}$ bei einer Geschwindigkeit von 900 m/min , bei einer Geschwindigkeit von 2.250 m/min lag sie zwischen $0,3$ und $1,8 \text{ cm}^3/\text{m}$. Bei der ultrahohen Geschwindigkeit von 18.000 m/min konnten immer noch $0,06 - 1,2 \text{ cm}^3/\text{min}$ abgetragen werden.

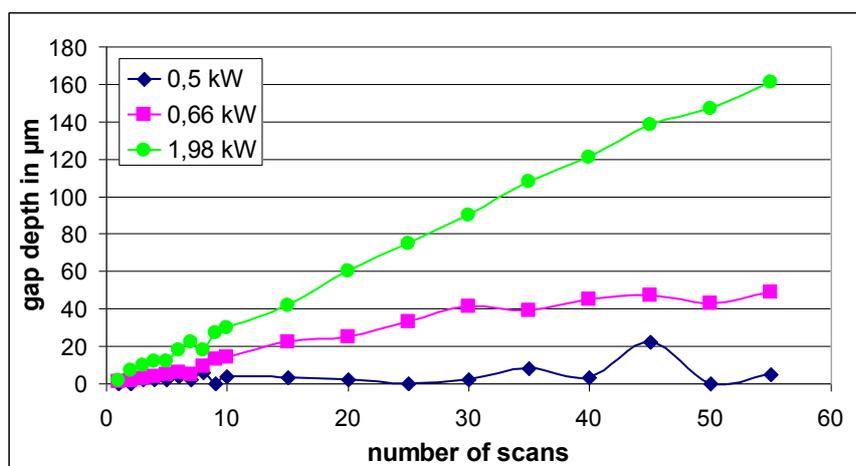


Abb. 6.4.3.44: Abtragtiefe in Abhängigkeit von der Scananzahl, Kupfer, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, Parameter Laserleistung

Weitere Abtraguntersuchungen wurden an Kupfer- und Wolframblech durchgeführt (Abb. 6.4.3.44 und 6.4.3.45). Die beiden Materialien zeichnen sich durch extreme Eigenschaften aus, Kupfer hinsichtlich hohem Reflexionsgrad und hoher Wärmeleitfähigkeit und Wolfram hinsichtlich hoher Schmelz- und Siedetemperatur.

Die Abtragschwellen bei Kupfer und Wolfram lagen infolge dessen höher als bei Edelstahl. Mit einer Laserleistung von $0,33 \text{ kW}$ und einer Scangeschwindigkeit von 13.500 m/min konnte ein kontinuierlicher Abtrag in Edelstahl bis in eine Tiefe von maximal $80 \mu\text{m}$ realisiert werden (Abb. 6.4.3.40).

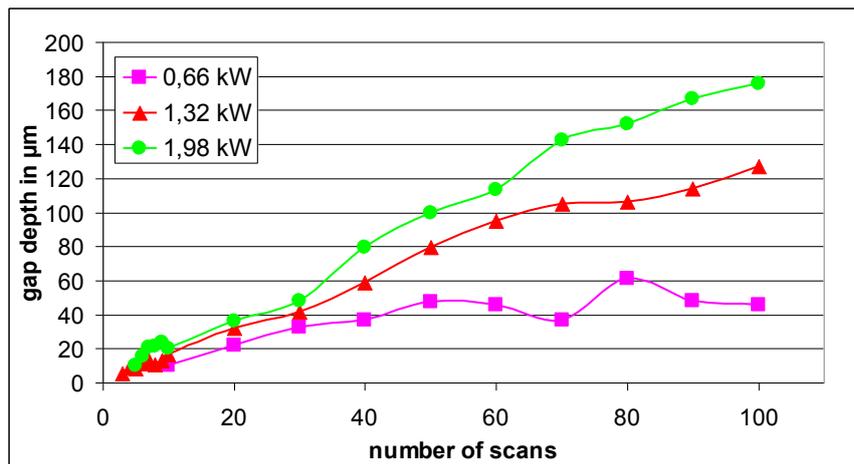


Abb. 6.4.3.45: Abtragtiefe in Abhängigkeit von der Scananzahl, Wolfram, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, Parameter Laserleistung

Bei gleichen Parametern konnte bei Kupfer und Wolfram noch kein reproduzierbarer Abtrag beobachtet werden. Erst eine Verdoppelung der Laserleistung auf 0,66 kW erbrachte einen Abtrag, aber nur bis zu einer max. Tiefe von 40-50 μm bei Kupfer (Abb. 6.4.3.44) bzw. 45 – 60 μm bei Wolfram (Abb. 6.4.3.45). Die Abtragrate war für Edelstahl bei dieser Leistung und bei 50 Bestrahlungen um den Faktor 5 größer als bei Kupfer und Wolfram, die erzielte Abtragtiefe fast doppelt so groß (Tab. 6.4.3.5).

Tab. 6.4.3.5: Abtragtiefen und -raten für Edelstahl, Kupfer und Wolfram

$d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, $P = 0,66 \text{ kW}$, 50 Bestrahlungen

	Edelstahl	Kupfer	Wolfram
Abtragtiefe in μm	82	43	47
Abtragrate in cm^3/min	0,318	0,060	0,054

$d = 21 \mu\text{m}$, $v = 13.500 \text{ m/min}$, $P = 1,98 \text{ kW}$, 50 Bestrahlungen

	Edelstahl	Kupfer	Wolfram
Abtragtiefe in μm	121	149	99,7
Abtragrate in cm^3/min	0,99	0,318	0,234

Mit zunehmender Laserleistung näherte sich der Einzelabtrag pro Bestrahlung bei allen Materialien an. Bei einer Laserleistung von 1,98 kW und 50 Bestrahlungen lag der Abtrag bei ca. 2 bis 3 μm pro Bestrahlung (Tab. 6.4.3.5). Bei Edelstahl wurde trotz der ultrahohen Ablenkgeschwindigkeit immer noch eine Abtragrate von ca. 1 cm^3/min erzielt.

Bei Kupfer konnte sogar die größte Abtragtiefe verzeichnet werden. Die Abtragraten für Edelstahl war gegenüber Kupfer nur noch um den Faktor 3 und gegenüber Wolfram um den Faktor 4 größer.

Der scheinbarere Widerspruch einer hohen Abtragraten bei einer ähnlichen Abtragtiefe für Edelstahl ließ sich unter Beachtung der Breite des Abtrages klären. Diese war bei Edelstahl wesentlich größer. Bei der applizierten hohen Leistung war die Schmelzablagerung in der Abtragspur bei Edelstahl wesentlich geringer als bei Kupfer und Wolfram.

Es konnte erstmals ein Lasermikroabtrag mit einer ultrahohen Scangeschwindigkeit von bis zu 18.000 m/min unter Nutzung eines hochbrillanten cw- Hochleistungsfaserlasers realisiert werden. Im Bereich sehr dünner Bleche < 100 µm liegt ein enormes Potential für die ultraschnelle Bearbeitung. Ein Edelstahl- oder Kupferblech mit Dicken von 50 µm ließe sich mit einer Laserleistung von 2 kW mit einer effektiven Geschwindigkeit von 700 m/min trennen, bei Wolfram wären es noch 540 m/min.

Grundlegende Untersuchungen zum 2D Schneiden mit schneller Strahlableitung

Es wurden weiterhin Untersuchungen zur Umsetzung der Erkenntnisse beim Abtragschneiden von 2D Blechteilen und zur Verbesserung der Schnittqualität durchgeführt. Bei Richtungsänderungen kam es durch starkes Abbremsen der Scannerachsen zu einem höheren Energieeintrag und somit zur verstärkten Bildung von Schmelze. Diese lagerte sich an den Kanten an, die Ecken wurden durch Abschmelzen verrundet (Abb. 6.4.3.46/47 links). Durch das gerade Überfahren des Eckpunktes und zusätzlicher außerhalb liegender Abbrems- bzw. Beschleunigungsstrecken konnte der Energieeintrag jedoch minimiert werden. Die Verrundung der Ecken und die Schmelzanlagerungen an der Materialunterseite konnten dadurch stark gemindert werden (Abb. 6.4.3.46/47 rechts). Zur Schmelzablagerung an der Materialoberseite kam es bedingt durch den Prozess allerdings immer.

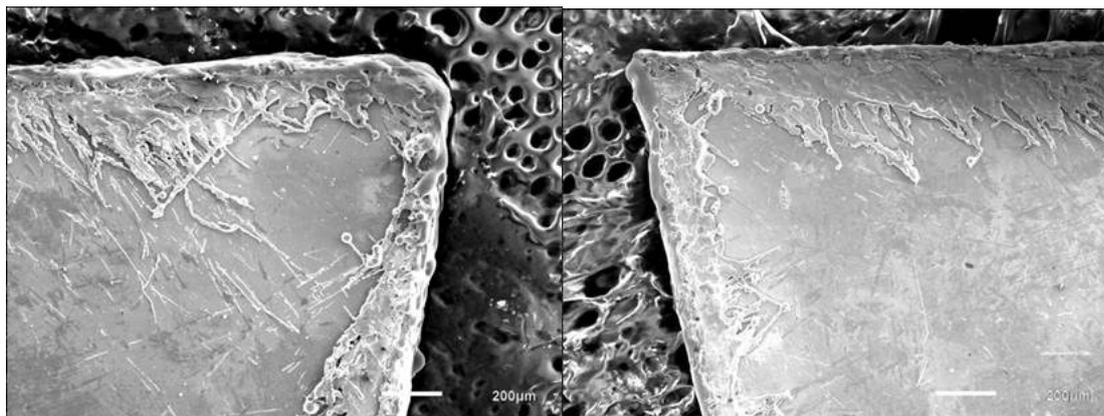


Abb. 6.4.3.46: REM-Aufnahme Oberseite einer 80°-Ecke; $d = 21 \mu\text{m}$; links: ohne Beschleunigungsstrecke; rechts: mit Beschleunigungsstrecke

Eine weitere Möglichkeit, um eine hohe Abtragsqualität zu erreichen, war eine leistungsabhängige Modulation des Lasers bei Geschwindigkeitsänderungen. Mittels eines zusätzlichen Modulators im Strahlengang war das technisch in der benötigten Ansteuerzeit

möglich. Die softwaremäßige Einbindung in die Steuerung konnte allerdings in der Projektlaufzeit nicht realisiert werden.

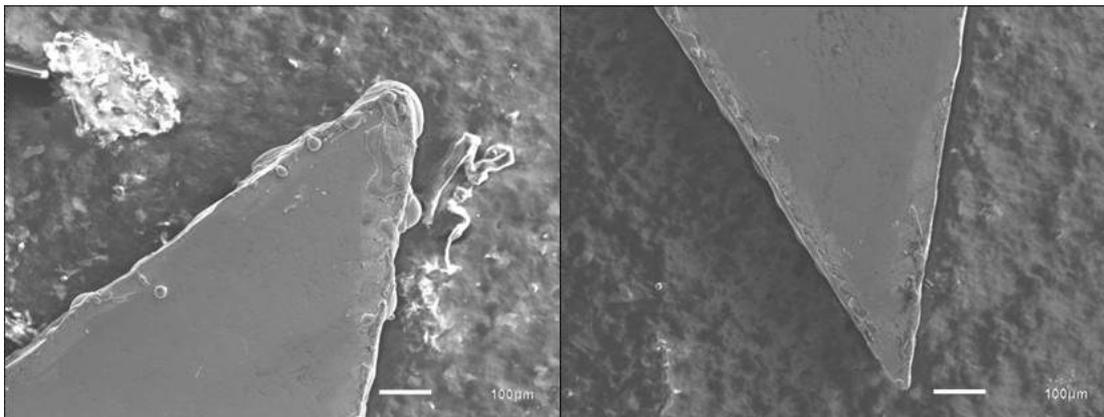


Abb. 6.4.3.47: REM-Aufnahme Unterseite einer 40°-Ecke; $d = 21 \mu\text{m}$; links: ohne Beschleunigungsstrecke; rechts: mit Beschleunigungsstrecke

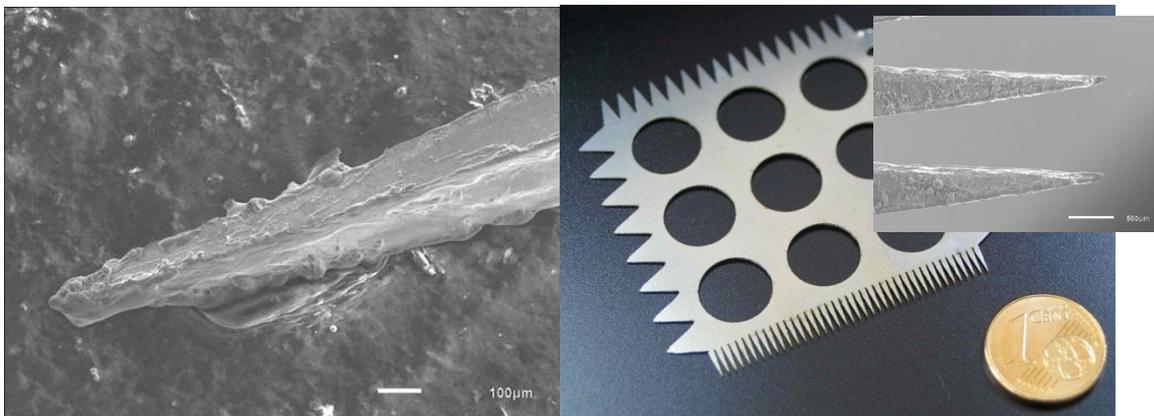


Abb. 6.4.3.48: REM-Aufnahmen; Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 600 \text{ m/min}$; $P = 1,76 \text{ kW}$; 2 Bestrahlungen; links: 5°-Mikro-Spitze; rechts - Musterteil; Materialdicke 0,3 mm, 10 Bestrahlungen

Durch die Optimierung der Beschleunigungsstrecken war das Abtragschneiden von Blechen mit hochaufgelösten Konturen möglich wie in Abb. 6.4.3.48 links dargestellt. Die Spitze aus Edelstahl wies einen Kantenradius von ca. $15 \mu\text{m}$ auf! Rechts zu sehen ist ein Musterteil, das aufgrund der vielen Spitzen eine Konturlänge von mehr als 560 mm besaß. Es wurde ohne Beschleunigungsstrecken in einer Bearbeitungszeit von 3 s ausgeschnitten. Dies entsprach einer durchschnittlichen Schnittgeschwindigkeit von $11,2 \text{ m/min}$. Das war ungefähr um eine Größenordnung schneller als mit konventionellen hochdynamischen 2D Schneidanlagen bei der Kontur möglich gewesen wäre.

Bei einem Vergleich der Schnittqualität mit dem konventionellen 2D Laserschneiden mit CO_2 -Laser und Düse zeigte sich, dass hier eine von Schmelzeinflüssen nahezu freie Schnittkante entstand (Abb. 6.4.3.49 a). Auch beim Abtragschneiden mit schnellem Scanner und Fokusdurchmesser $21 \mu\text{m}$ wurde eine qualitativ hochwertige Schnittkante erzeugt (Abb. 6.4.3.49 b), die Schmelze wurde zum großen Teil verdampft und der Rest durch den Plasma-

druck ausgetragen. Bei Anwendung des ultraschnellen Polygonspiegelscanners mit einer Scangeschwindigkeit von 9.000 m/min und einer daraus resultierenden extrem kurzen mittleren Einwirkzeiten von 140 ns entstand nur noch ein geringer Schmelzanteil, der sich schuppenförmig an der Schnittkante anlagerte (Abb. 6.4.3.49 c, d).

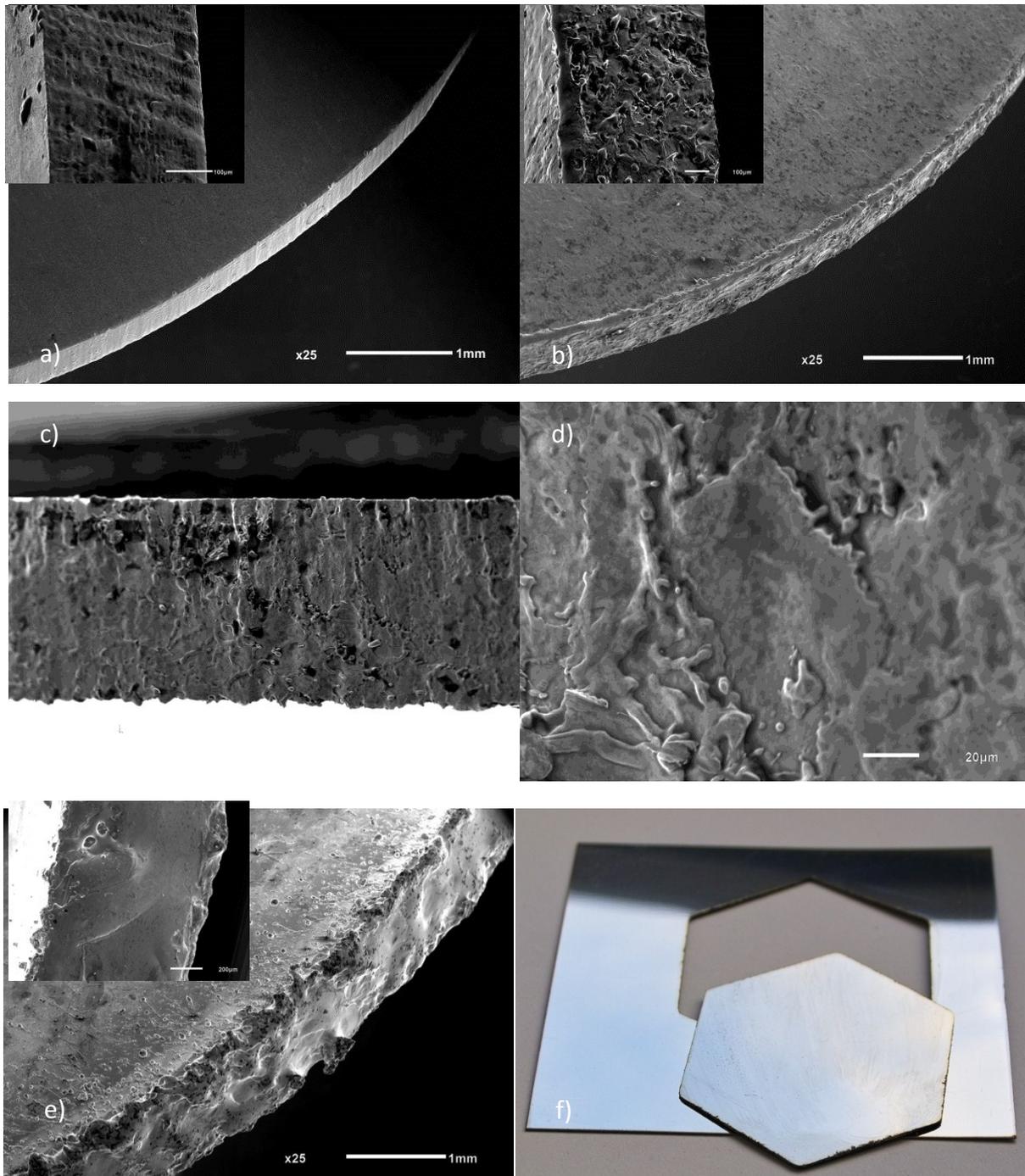


Abb. 6.4.3.49: REM-Aufnahmen von Schnittkanten; a) konventionelles Laserschneiden mit CO₂-Laser und Schneiddüse; b) - f) Abtragschneiden; b) - d), f) $d = 21 \mu\text{m}$; e) $d = 78 \mu\text{m}$; b) $v = 1.200 \text{ m/min}$ c) und d) $v = 9.000 \text{ m/min}$; e) Demonstrator

Infolge relativ geringer Intensitäten sowie langer Einwirkzeiten des Laserstrahles war beim Schneiden mit schnellem Scanner und Fokusdurchmesser $78 \mu\text{m}$ ein hoher Schmelzanteil an

der Schnittkante sowie eine Oxidation der Materialoberfläche zu beobachten (Abb. 6.4.3.49 e).

Ein Demonstrator mit einfacher Kontur konnte mit dem schnellen Scanner und Fokusdurchmesser 21 μm in einer effektiven Geschwindigkeit von 90 m/min geschnitten werden (Abb. 6.4.3.49 f). Die Blechdicke betrug dabei 0,3 mm, die Scangeschwindigkeit 900 m/min. Die notwendigen 10 Bestrahlungen konnten in der ultrakurzen Bearbeitungszeit von ca. 0,1s nicht wahrgenommen werden. Es war lediglich ein Plasmaring und das Herausfallen des Teiles zu sehen. Angesichts der extrem kurzen Bearbeitungszeit bei einfachen Konturen wurde bereits der Begriff "Laserstanzen" für das Verfahren eingeführt. Das bezieht sich aber lediglich auf die Geschwindigkeit, nicht auf den eigentlichen Prozess, da der Laserstrahl keine harte Schnittkante darstellt.

Untersuchungen zur Erzeugung von 2,5D Mikrostrukturen mit schneller Strahlableitung

Mit dem schnellen Galvoscaner und einem Fokusdurchmesser von 21 μm wurden Flächenabtragversuche in Edelstahlblechen durchgeführt. Dabei wurden zehn Linien nebeneinander gelegt. Der Abstand zwischen diesen Linien wurde ebenso variiert wie die Anzahl der Bestrahlungen, die Laserleistung und die Geschwindigkeit. Zunächst wurde eine niedrige Leistung von 270 W appliziert.

Vergleich der Linienabstände bei P = 0,27 kW

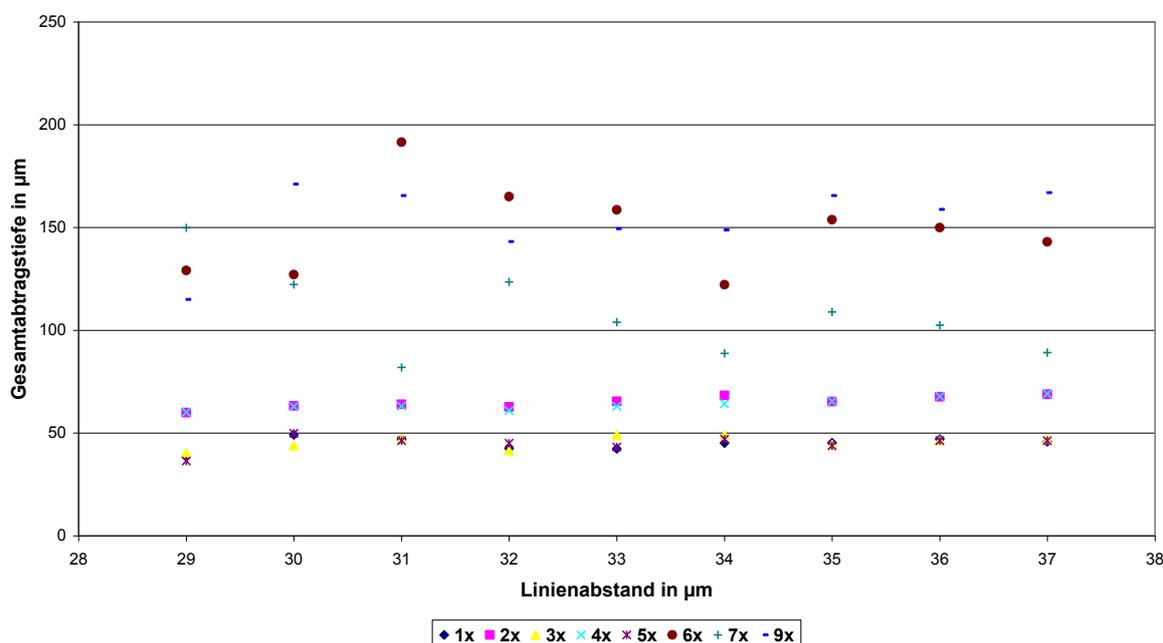


Abb. 6.4.3.50: Gesamtabtragtiefe in Abhängigkeit des Linienabstandes; Edelstahl 1.4301; $d = 21 \mu\text{m}$; $P = 270 \text{ W}$; $v = 900 \text{ m/min}$; Parameter: Anzahl der Bestrahlungen

Für wenige Bestrahlungen (1...5) hatte im untersuchten Parameterbereich der Linienabstand auf die erreichte Abtragtiefe keinen entscheidenden Einfluss (Abb. 6.4.3.50). Wie weiter sehen war, wurden bei den verschiedenen Abständen nahezu identische Abtragwerte erreicht.

Bei mehr Bestrahlungen (>6) wurden dagegen stark streuende Abtragwerte ermittelt, ein Einfluss des Linienabstandes wurde aus dem Kurvenverlauf aber auch hier nicht deutlich.

Große Bedeutung hatte dagegen der Linienabstand auf die Oberflächenqualität der abgetragenen Fläche. Es konnte für jede Kombination aus Laserleistung und Scangeschwindigkeit ein Linienabstand gefunden werden, mit dem optimale Oberflächenqualitäten erreichbar waren.

In Abb. 6.4.3.51 sind Querschliffe der Bearbeitungsergebnisse, die mit unterschiedlichen Linienabständen erzeugt wurde, dargestellt. Eine weitere Verringerung des Linienabstandes sollte eine Minimierung der Oberflächenrauheit bewirken.

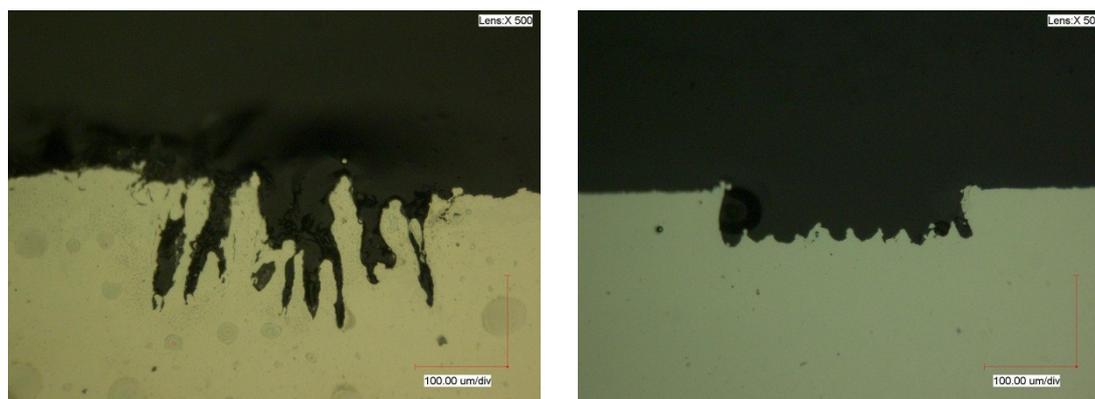


Abb. 6.4.3.51: Querschliffe von mit unterschiedlichen Bearbeitungsparametern erzeugten Kavitäten; Edelstahl 1.4301; $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 270 \text{ W}$; $v = 900 \text{ m/min}$; links: 6 Bestrahlungen, Linienabstand $33 \mu\text{m}$; rechts: 2 Bestrahlungen; Linienabstand $29 \mu\text{m}$

Vergleich der Laserleistungen bei $v = 15 \text{ m/s}$ und $33 \mu\text{m}$ Linienabstand

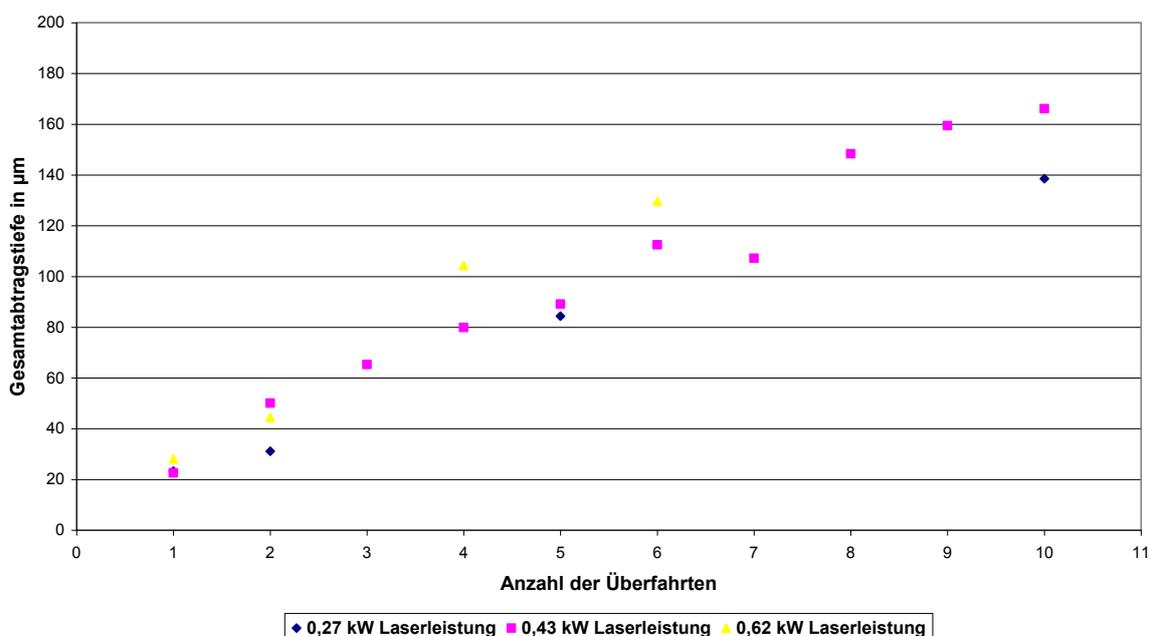


Abb. 6.4.3.52: Gesamtabtragtiefe in Abhängigkeit der Anzahl der Bestrahlungen, Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $v = 900 \text{ m/min}$, Linienabstand $33 \mu\text{m}$, Parameter: Laserleistung

Abb. 6.4.3.52 zeigt eine annähernd lineare Abhängigkeit der Gesamtabtragtiefe von der Anzahl der Bestrahlungen. Die applizierte Laserleistung hatte eher einen geringen Einfluss auf die erzielte Gesamtabtragtiefe.

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Qualität der Mikrokavitäten bei Variation der Laserleistung durchgeführt. Dazu wurden 10 Abtragspuren nebeneinander gelegt und 1-10x bei verschiedenen Leistungen und Linienabständen überfahren. Die Qualität des Abtrages war stark von der eingebrachten Laserleistung abhängig wie in Abb. 6.4.3.53/54 erkennbar ist.

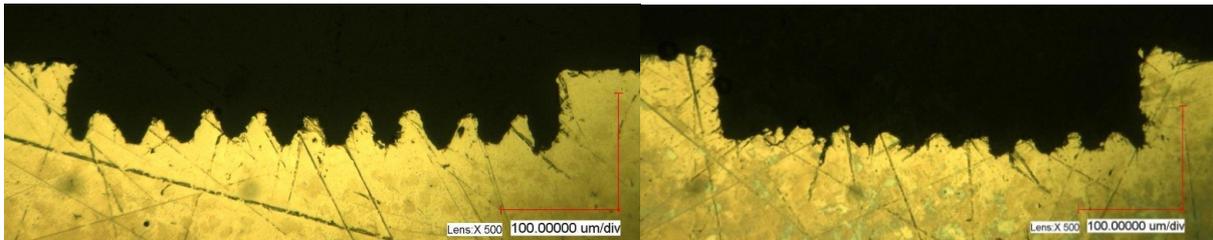


Abb. 6.4.3.53 / 54: Schliffbild Mikrokavität; Edelstahl 1.4301; $d = 21 \mu\text{m}$; $v = 1.200 \text{ m/min}$; Spurabstand $43 \mu\text{m}$; 5 Bestrahlungen; links: $P = 430 \text{ W}$; rechts $P = 880 \text{ W}$

Mit der relativ hohen Leistung von 880 W konnte bei einem Spurabstand von $43 \mu\text{m}$ eine Kavität in guter Qualität erzeugt werden (rechts). Die Breite der Kavität betrug $410 \mu\text{m}$, die mittlere Tiefe $87 \mu\text{m}$. Durch die Schmelzablagerung an den Rändern entstanden steile Flanken. Bei Applizierung der größeren Laserstrahlleistung war wie erwartet ein größerer Spurabstand zur Erzeugung eines relativ ebenen Kavitätenbodens notwendig.

Zum Nachweis der beschränkaren Wärmeeinflusszone auch bei höherer Laserleistung wurde eine regelmäßige Abtragstruktur generiert (Abb. 6.4.3.55 und 56). Dazu wurden die Parameter zur Erzeugung der Kavität genommen und der Spurabstand auf $72 \mu\text{m}$ erhöht. Anhand der Schliff- und REM-Bilder ist die gute Qualität der Mikro-Stege mit Breiten von kleiner $35 \mu\text{m}$ zu erkennen. Das Aspektverhältnis der Stege betrug bis 1:3. Im Dauerbetrieb konnten bereits mit dem schnellen Galvoscaner bei 5 Bestrahlungen Flächenraten von $1 \text{ m}^2/\text{h}$ erzielt werden. Bei geringerer Tiefe der Strukturen und entsprechend weniger Bestrahlungen ließe sich die Rate noch erhöhen.

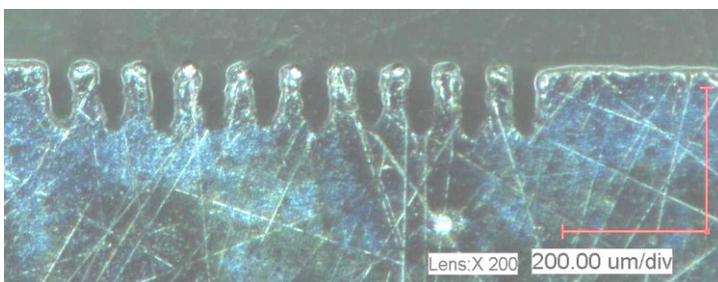


Abb. 6.4.3.55: Schliff-Bild Mikroabtrag; Edelstahl 1.4301; $d = 21 \mu\text{m}$; $P = 880 \text{ W}$; $v = 1.200 \text{ m/min}$; Spurabstand $72 \mu\text{m}$; 5 Bestrahlungen

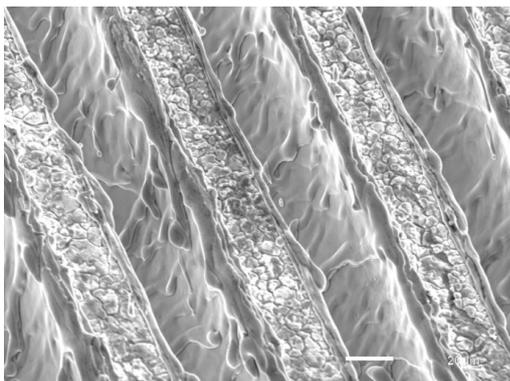


Abb. 6.4.3.56: REM Bild Mikroabtrag; Edelmetall 1.4301; $d = 21 \mu\text{m}$; $P = 880 \text{ W}$; $v = 1.200 \text{ m/min}$; Spurabstand $72 \mu\text{m}$; 5 Bestrahlungen

Abschließend wurde mit optimierten Parametern eine Kavität mit einem relativ glatten Boden erzeugt. Laserscanning-Mikroskop-Aufnahmen zeigten die relativ gute Qualität (Abb. 6.4.3.57). Es wurde parallel zu den Scanlinien ein Rauigkeitswert von $= 5,5 \mu\text{m}$ und quer zu den Scannlinien ein Rauigkeitswert von $= 7,4 \mu\text{m}$ ermittelt.

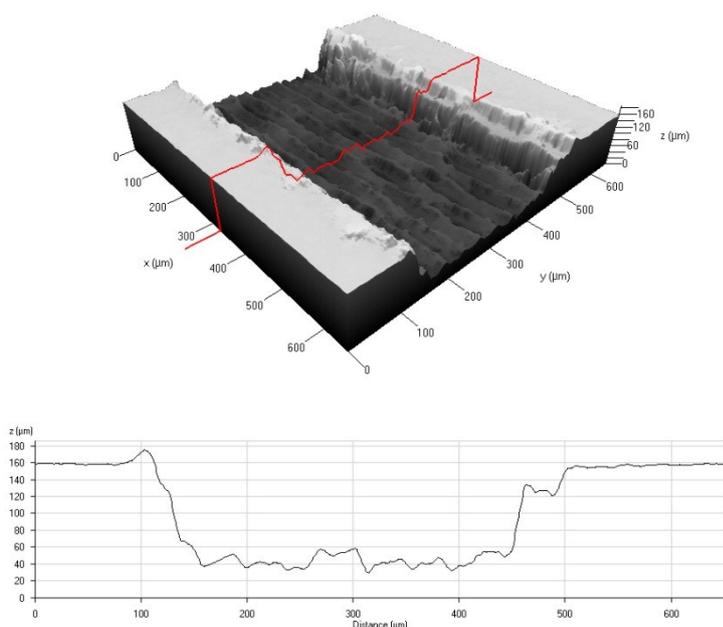


Abb. 6.4.3.57: 3D Bild und Schnittbild (Laserscanning-Mikroskop Zeiss-Axiovert mit Scanmodul LSM5 Pascal) einer Kavität; Edelmetall 1.4301; $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 430 \text{ W}$; $v = 900 \text{ m/min}$; Linienabstand $37 \mu\text{m}$; 7 Bestrahlungen

Untersuchungen zur Erzeugung von Mikrostrukturen mit ultraschneller Strahlableitung

Zur weiteren Reduzierung von Schmelze wurde auch Untersuchungen mit ultraschneller Strahlableitung an Edelmetall 1.4301 durchgeführt. Durch Ausnutzung der Abtragschwelle sollten qualitativ hochwertige Strukturen erzeugt werden können.

Bei der Bearbeitung wirkte sich die niedrige Laserleistung aber negativ aus, auf den Zwischenstegen lagerte sich die abgetragene Schmelze wieder ab. Durch eine geringere Plasmapbildung konnte sie offensichtlich nicht so gut ausgetragen werden. Der Linienabstand betrug $25\ \mu\text{m}$. Die Grabenbreite in Höhe der Oberfläche betrug ca. $13\ \mu\text{m}$ (Abb. 6.4.3.58), war also wesentlich kleiner als der Strahldurchmesser.

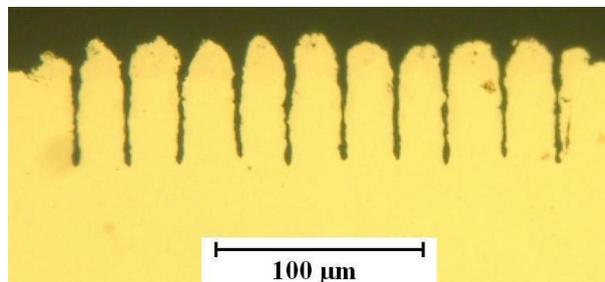
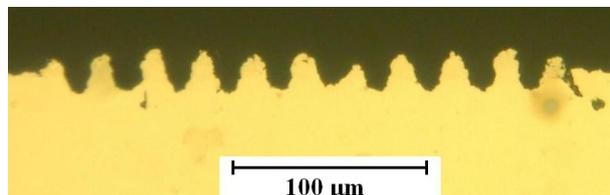


Abb. 6.4.3.58: Schliff-Bild Mikroabtrag; Edelstahl 1.4301; $d = 21\ \mu\text{m}$; $P = 330\ \text{W}$; $v = 12.000\ \text{m/min}$; Spurabstand $25\ \mu\text{m}$; 15 Bestrahlungen

Abb. 6.4.3.59: Schliff-Bild Mikroabtrag; Edelstahl 1.4301; $d = 21\ \mu\text{m}$; $P = 330\ \text{W}$; $v = 12.000\ \text{m/min}$; Spurabstand $25\ \mu\text{m}$; 60 Bestrahlungen

Bei der Applikation weiterer Bestrahlungen konnte eine Grabentiefe von $50\ \mu\text{m}$ erzeugt werden (Abb. 6.4.3.59). Die Grabenbreite verringerte sich aber dabei durch kontinuierliche Schmelzanlagerung auf durchschnittlich $3\ \mu\text{m}$! Wie die Einbringung der entsprechenden Laserleistung bei einem Fokussdurchmesser von $21\ \mu\text{m}$ in die extrem schmalen Gräben erfolgte, ist derzeit noch ungeklärt. Eine Modellvorstellung besteht darin, dass bei jeder Bestrahlung die Spur in der Breite des Fokus aufgeschmolzen wird und dann wieder mit dem verbleibenden Mikropalt erstarrt. Das Freihalten des Spaltes sollte in einem Zusammenspiel aus Oberflächenspannung der Schmelze und Plasmapdruck im Inneren des Spaltes geschehen.

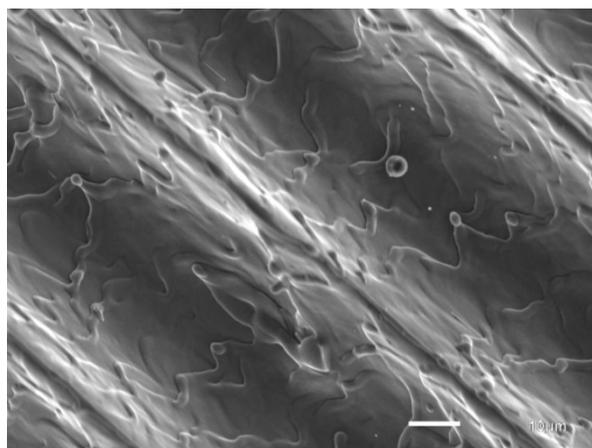
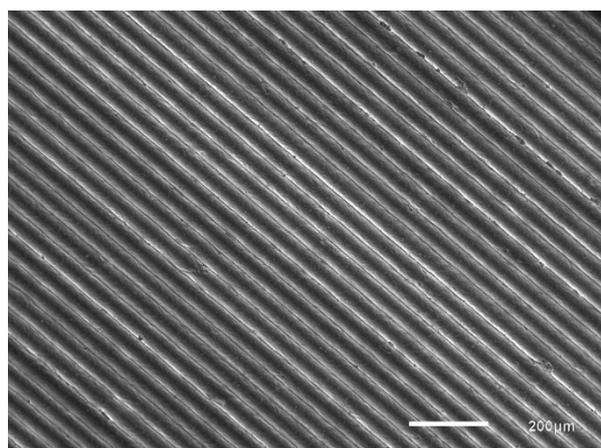


Abb. 6.4.3.60: REM-Aufnahmen Mikroabtrag; Edelstahl 1.4301; $d = 21\ \mu\text{m}$; $P = 1,99\ \text{kW}$; $v = 13.500\ \text{m/min}$; 5 Bestrahlungen

Bei Nutzung einer Scangeschwindigkeit von $13.500\ \text{m/min}$ und einer Laserleistung von $1,99\ \text{kW}$ wurde der Abtragprozess durch starke Plasmaeinwirkung beeinflusst. Die Abtragbreite lag dadurch bei $50\ \mu\text{m}$ obwohl der Fokussdurchmesser nur $21\ \mu\text{m}$ betrug. Es konnten eine

regelmäßiges Linienmuster erzeugt werden (Abb. 6.4.3.60). Interessanterweise entstanden zwischen den Abtragspuren regelmäßige Substrukturen mit einer Breite von nur 5 μm .

Die erzielte Flächenbearbeitungsrate lag bei 36 cm^2/min .

3D Mikrostrukturierung

Technisch bedingt waren bei dem Hochleistungsfaserlaser nur Schaltfrequenzen bis 2 kHz verfügbar. Das heißt, schon bei einer Scangeschwindigkeit von nur 1.200 m/min betrug die minimale mögliche Scanlänge 5 mm. Zur Erzeugung von allseits begrenzten Mikro-Kavitäten war eine schnelle Strahlschaltung erforderlich. Diese wurde im Rahmen des Projektes erstmals in Form einer speziellen AOM-Schaltung realisiert.

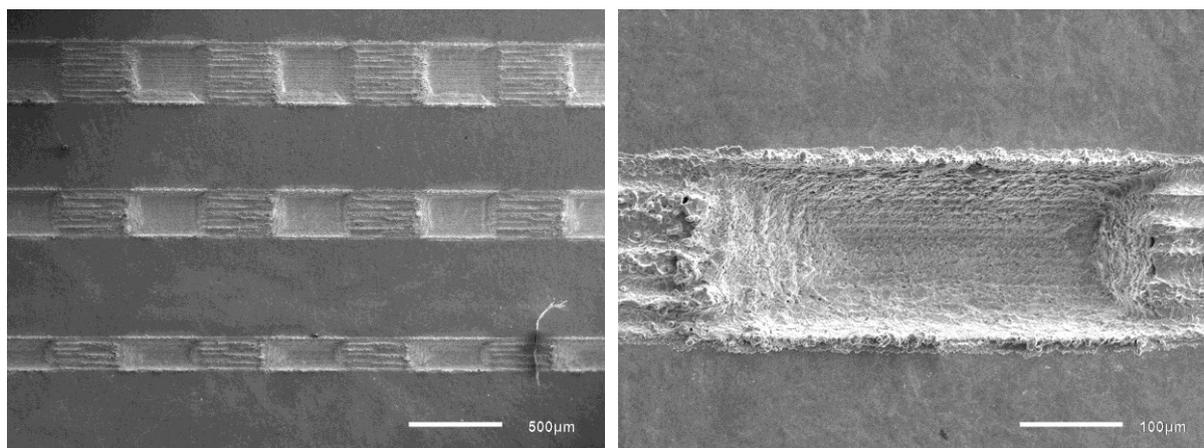


Abb. 6.4.3.61: REM-Aufnahmen, Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 600 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, 50 Bestrahlungen, Tastfrequenz 100 kHz, Puls/Pause Verhältnis 50%; links Linienabstand 10, 15 und 20 μm ; rechts Linienabstand 10 μm

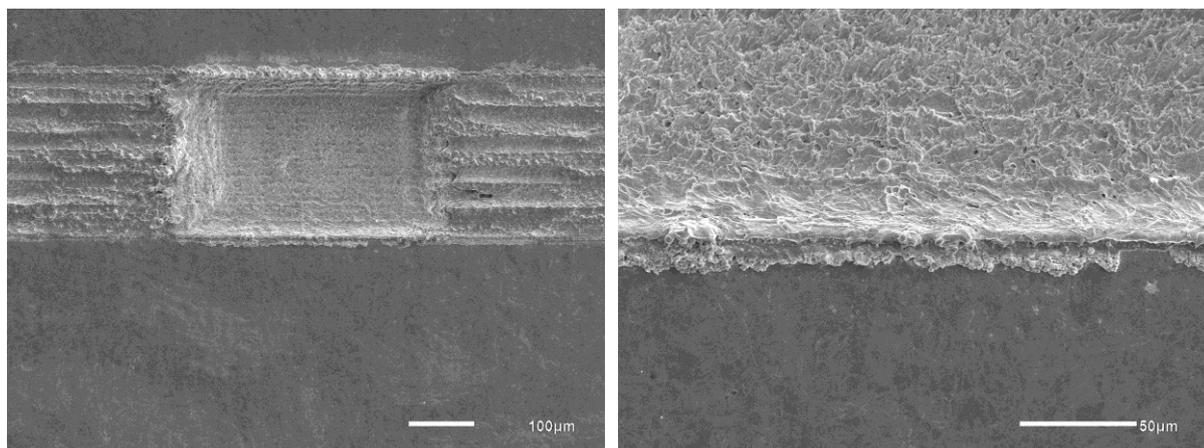


Abb. 6.4.3.62: REM-Aufnahmen, Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 600 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, 50 Bestrahlungen, Tastfrequenz 100 kHz, Puls/Pause Verhältnis 50%, Linienabstand 15 μm , rechts Vergrößerung

Es konnte die grundsätzliche Erzeugbarkeit von auch in Scanrichtung begrenzten Mikro-Kavitäten mit cw-Laserstrahlung in Edelstahl gezeigt werden (Abb. 6.4.3.61 und 62). Da der Laserstrahl in der Pause aufgrund von Unzulänglichkeiten der Steuerung nicht immer vollstän-

dig abgeschaltet werden konnte, war auch in den Zwischenbereichen eine Beeinflussung des Materials gegeben. Die Schmelzrückstände an den Randbereichen waren aber minimal (Abb. 6.4.3.62 rechts).

Wie erwartet war die Tiefe der Kavitäten sowohl von der Anzahl der Bestrahlungen als auch vom Linienabstand abhängig (Abb. 6.4.3.63). Der Abtrag pro Bestrahlung betrug 0,8–1,8 μm . Damit war die Tiefe im Mikrometerbereich genau einstellbar.

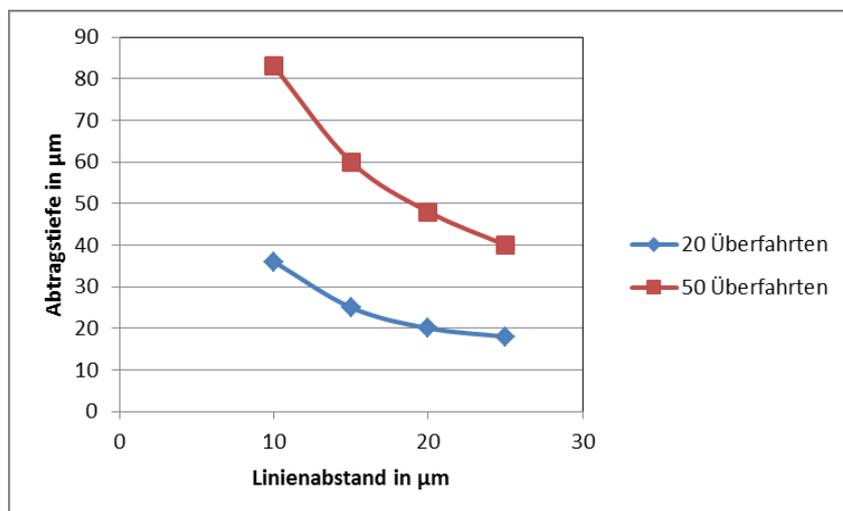


Abb. 6.4.3.63: Abtragtiefe in Abhängigkeit vom Linienabstand und der Scananzahl, Scangeschwindigkeit 4.500 m/min, Laserleistung 600 W

Das linienförmige Abtrag-Raster war bei einem Linienabstand von 25 μm deutlich zu erkennen (Abb. 6.4.3.64). Durch Verringerung des Linienabstandes auf 15 μm , der einer Überlappung des Strahldurchmessers von 30% entsprach, konnte eine gleichmäßige geringe Rauheit am Boden der Kavität erzeugt werden (Abb. 6.4.3.65). Bei ns-Lasern wird zur Erzeugung einer geringen Rauheit ein vergleichbarer Pulsüberlapp genutzt.

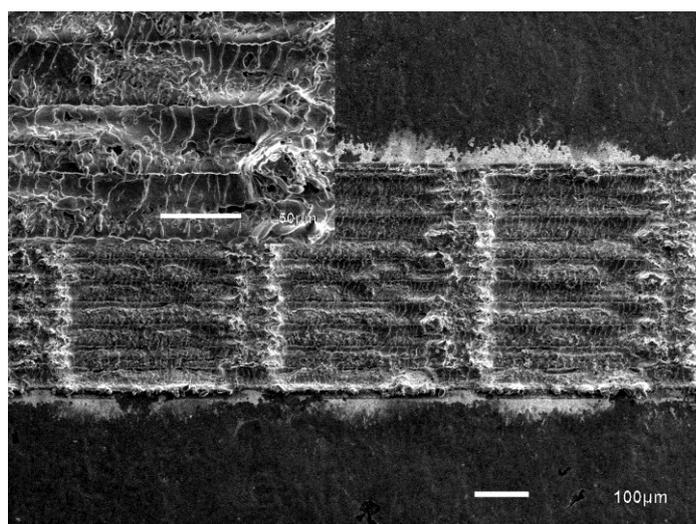


Abb. 6.4.3.64: REM-Detailaufnahmen, Abtrag von Mikrokavität in Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 600 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$ m/s, Tastfrequenz 100 kHz, Puls/Pause Verhältnis 80%, Linienabstand 25 μm , 20 Bestrahlungen

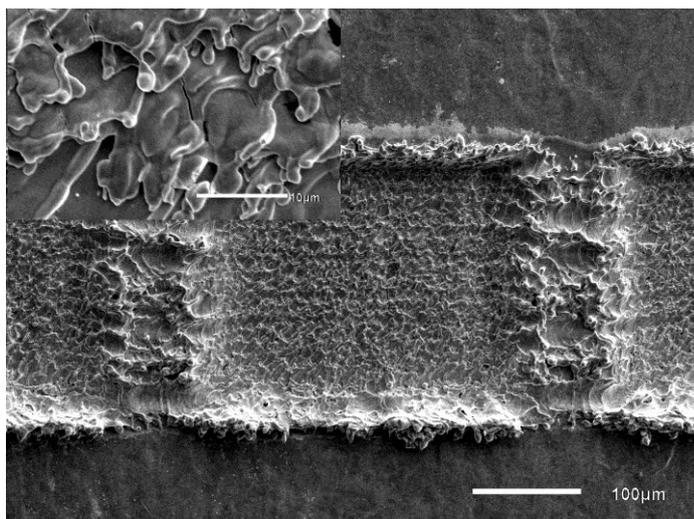


Abb. 6.4.3.65: REM-Detaillaufnahmen, Abtrag von Mikro-kavität in Edelstahl 1.4301, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 600 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$ m/s , Tastfrequenz 100 kHz, Puls/Pause Verhältnis 80%, Linienabstand $15 \mu\text{m}$, 20 Bestrahlungen

Mit einer Weiterentwicklung der Laserstrahlansteuerung sollten die Ergebnisse qualitativ noch wesentlich verbessert werden können. Dass es grundsätzlich möglich ist, unter Anwendung einer hohen Laserleistung und einer ultraschnellen Ablenkung Mikrostrukturen in sehr hoher Rate zu erzeugen, konnte erstmals gezeigt werden.

Es erfolgten ergänzend Versuche zum Mikro-Abtrag von Silizium und Wolfram.

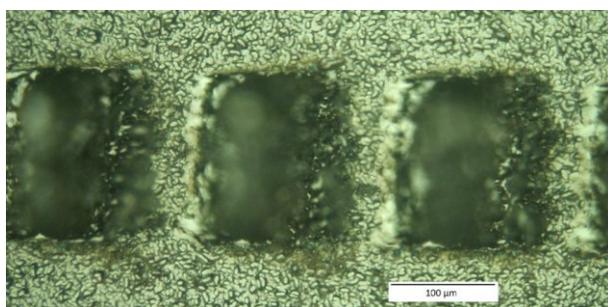


Abb. 6.4.3.66: Digitalaufnahmen, Abtrag von Mikro-Kavitäten in Silizium, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 300 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, Tastfrequenz 400 kHz, Puls/Pause - Verhältnis 50%, 20 Bestrahlungen

Wie in Abb. 6.4.3.66 zu sehen ist, konnte mit einem Puls/Pause Verhältnis von 50% eine hoch aufgelöste Mikro-Napfstruktur in Silizium erzeugt werden. Die Abtragtiefe betrug $70 \mu\text{m}$. Die Stege hatten eine Breite von nur $50 \mu\text{m}$. Die Napfbreite lag aufgrund der durch die sukzessive Erwärmung des Siliziums abgesenkten Ablationsschwelle bei $100 \mu\text{m}$. Aufgrund der zeitlichen Unschärfe und der Anstiegsflanke des AOM hatten die Kanten der abgetragenen Strukturen in Scanrichtung eine höhere Rauheit.

Abb. 6.4.3.67 zeigt eine Mikro-kavität in Wolfram. Bis auf den Schmelzrand entstand ein sehr sauberer Abtrag unter Nutzung der Abtragschwelle.

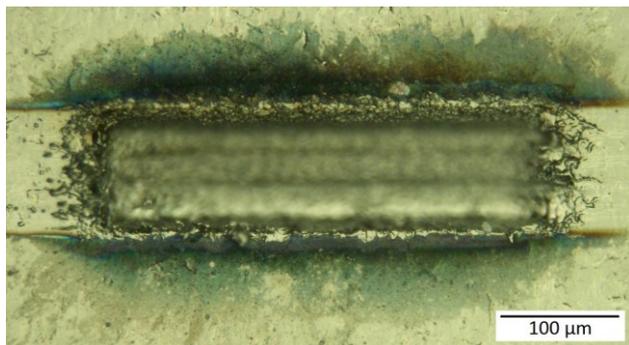


Abb. 6.4.3.67: Digitalaufnahmen, Mikro-Kavität in Wolfram, $d = 21 \mu\text{m}$, $P = 300 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, Linienabstand $10 \mu\text{m}$, 20 Bestrahlungen

Es konnte gezeigt werden, dass mit der ultrahohen Geschwindigkeit von 4.500 m/min mit einem cw - Hochleistungslaser ein hochaufgelöster Mikroabtrag möglich ist. Die vorhandenen Steuerung und Strahlschaltung müssen für eine Stabilisierung des Abtragprozesses weiterentwickelt werden. Dies stellt die Voraussetzung für eine industrielle Nutzung des Prozesses dar.

AP 4.5 Hochleistungsoberflächenbearbeitung

Flächenabtrag von dünnen NiCr-Schichten

Es wurden Versuche zum Abtrag von NiCr-Schichten einer Dicke von $2 \mu\text{m}$ mit der ultraschnellen Strahlablenkung mittels Polygonspiegelscanner durchgeführt (Abb. 6.3.4.68).

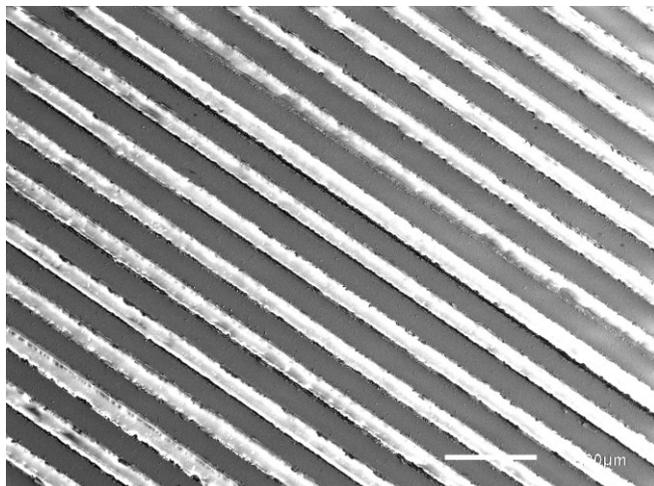


Abb. 6.4.3.68: REM-Detaillaufnahme; Abtrag NiCr-Schicht auf Glassubstrat; $d = 21 \mu\text{m}$; $P = 880 \text{ W}$; $v = 9.000 \text{ m/min}$; Linienabstand $100 \mu\text{m}$; 2 Bestrahlungen

Optimiert kamen eine Laserleistung von 880 W und eine Scangeschwindigkeit von 9.000 m/min zum Einsatz. Für einen rückstandsfreien Abtrag waren 2 Bestrahlungen notwendig. Der Abtrag war qualitativ hochwertig, die Schichten wurden vollständig abgetragen, so dass das Substrat an den freigelegten Streifen transparent war. Die verbliebenen NiCr-Mikrostege wiesen nur eine geringe Randbeeinflussung auf. Die Haftfestigkeit der Stege war sehr gut. Die Flächenabtragsrate bei der Struktur betrug bei zwei Bestrahlungen $2.500 -$

5.000 cm²/min. Das ist für eine großflächige Mikrostrukturierung extrem hoch. Zur industriellen Anwendung müsste eine schnelle und präzise Taktung des Werkstückes gewährleistet werden, dann wäre mit dem Verfahren eine hochproduktive Technologie realisierbar.

Selektive Oberflächenbearbeitung von Si-Wafern

Zur Demonstration einer noch höheren Flächenbearbeitungsrate wurde die F-Theta-Optik mit Brennweite 330 mm eingesetzt. Aufgrund der größeren Brennweite konnte bei jedem Linienscan mit dem Polygonspiegelscanner eine größere Länge bearbeitet werden. Die Ablenkgeschwindigkeit ließ sich dadurch auf 36.000 m/min steigern. Der Fokus vergrößerte sich nur moderat auf 30 µm. Unter Nutzung von Prozess-Schwellwerten konnte auch mit dem größeren Fokus auf einem Si-Wafer eine Spurbreite von ca. 15 µm erzeugt werden (Abb. 6.4.3.69 links).

Mit einem Spurbabstand von 100 µm wurde eine Flächenbearbeitungsrate von 300 cm²/s (Solar-Wafergröße/s) bzw. 18.000 cm²/min demonstriert (Abb. 6.4.3.69 rechts).

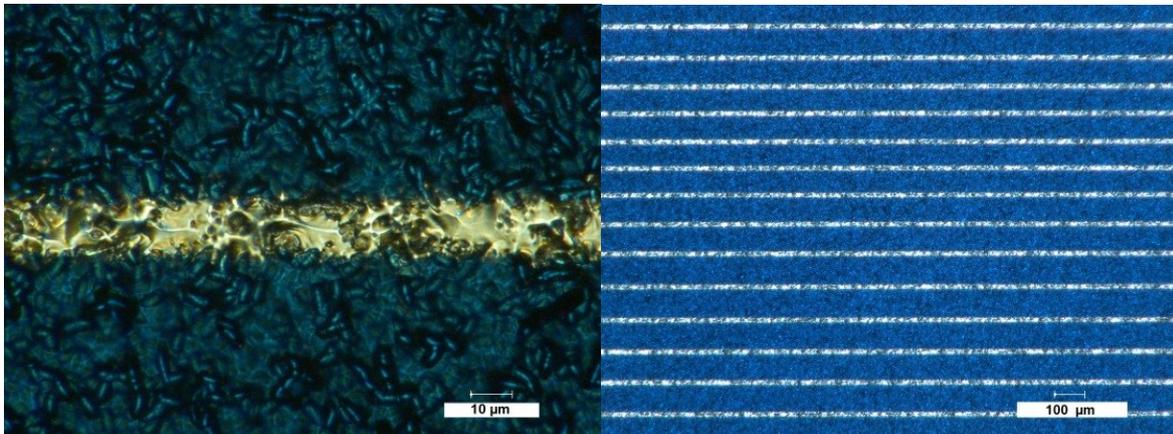


Abb. 6.4.3.69: Digitalaufnahmen; Oberflächenmodifizierung von Silizium; $d = 30 \mu\text{m}$; $P = 800 \text{ W}$; $v = 36.000 \text{ m/min}$; Linienabstand $100 \mu\text{m}$; 1 Bestrahlung

Weitere Untersuchungen wurden mittels ultraschneller Strahlableitung und schneller Strahlschaltung durchgeführt. Durch die erfolgreiche Modifizierung des Versuchstandes mit einem AOM zur schnellen Strahlschaltung wurde der erste Schritt zur Erzielung einer hohen Auflösung unter den Bedingungen gemacht.

Mit der ultrahohen Ablenkgeschwindigkeit von 4.500 m/min wurde als Demonstrator ein Buchstabenfeld erzeugt (Abb. 6.4.3.70). Dazu wurde der Laserstrahl mit An- und Ausschaltzeiten von 500 ns angesteuert. Durch Jitter (Diskretisierungsfehler) entstand eine statistische Unsicherheit von 400 ns, was einer Länge von 30 µm entsprach. Die ist am Rand als „Ausfransung“ zu sehen. Das Buchstabenfeld bestand aus 32 Zeilen. Mit einer Zeilenfrequenz von 375 Hz ergab sich eine Bearbeitungszeit von 12 ms.

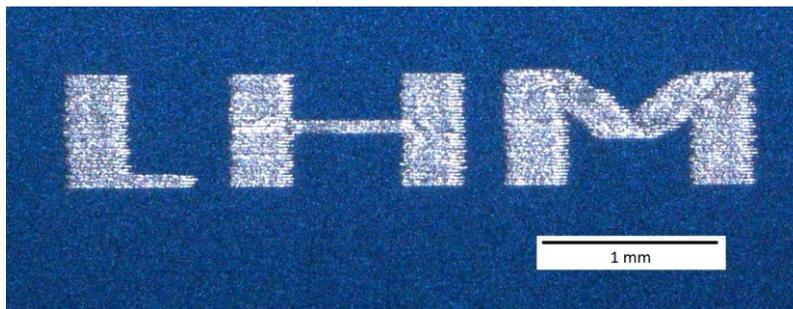


Abb. 6.4.3.70: Digitalaufnahmen; Oberflächenmodifizierung von Silizium; $d = 21 \mu\text{m}$; $P = 200 \text{ W}$; $v = 4.500 \text{ m/min}$; Linienabstand $20 \mu\text{m}$; 1 Bestrahlung

Zusammenfassung

Zur Erhöhung der Präzision beim Materialabtrag mit Laserstrahlung wurden verschiedene Sensoren in die Anlage eingebunden

In grundlegenden Untersuchungen zur Lasermikrostrukturierung mit hochrepetierender fs-Laserstrahlung wurden Mechanismen wie Plasmaabschirmung und Wärmeakkumulation in Abhängigkeit praxisrelevanter Parameter untersucht. In Anwendung der Erkenntnisse wurden Demonstrator-Strukturen in hoher Präzision und Geschwindigkeit erzeugt.

Zur Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften der bearbeiteten Strukturen wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Die Rauheit konnte bei Kupfer bis auf 100nm ohne Nachbearbeitung gesenkt werden. Es gelang auch die Beeinflussung der Oberfläche zur Erzielung von hydrophoben bzw. hydrophilen Eigenschaften.

Es wurden weltweite erste Untersuchungen zur Kombination eines hochrepetierenden fs-Lasers mit einer ultraschnellen Ablenkung unter Nutzung eines Resonanzscanners durchgeführt.

Weiterhin wurde der 2,5D Mikro-Abtrag an Edelstahl mit Hochleistungs-Faserlaser und schneller Strahlableitung mittels Galvo-Scanner umfassend untersucht. In Anwendung der Erkenntnisse konnten 2D Demonstratorerteile schnell und in hoher Qualität ausgeschnitten werden. Es wurden Abtragraten von bis zu $2,4 \text{ cm}^3/\text{min}$ erzielt.

Die Kombination Hochleistungsfaserlaser und ultraschnelle Strahlableitung mit einem Polygonspiegelscanner zur Mikrobearbeitung konnte weltweit erstmals realisiert werden. Das Abtragverhalten wurde anhand von Edelstahl, Wolfram und Kupfer untersucht.

Es wurde die ultraschnelle Mikrobearbeitung von Oberflächen gezeigt. Ein Mikrolinienraster mit einem Spurbabstand von $100 \mu\text{m}$ konnte mit einer Flächenrate von $18.000 \text{ cm}^2/\text{min}$ erzeugt werden.

Durch die neuen Möglichkeiten zur schnellen Ansteuerung des Laserstrahles konnte die Erzeugung von Mikro-Kavitäten als Vorstufe zur 3D Bearbeitung und eines Buchstabenfeldes auf Silizium unter Applikation der ultraschnellen Strahlableitung mit dem cw – Monomode - Hochleistungsfaserlaser gezeigt werden.

6.5 Arbeitspaket 5 – Oberflächenbearbeitung mit Laserplasma

6.5.1 Ziel des Arbeitspaketes

Als begleitende Grundlagenuntersuchung mit Anwendungspotential sollte die indirekte Laser-Mikrostrukturierung mit einem cw-Laserplasma untersucht werden. Im Fokus des Faserlaserstrahles sollten bei voller Leistung und einer Fokussierung auf einen Durchmesser von 20 μm dauerhaft Intensitäten von über 1 GW/cm^2 erreicht werden können. Zur Untersuchung der Strukturierung sollte der Laserstrahl über einer Glasoberfläche fokussiert und ein Plasma erzeugt werden. Die Ablenkung sollte mit der Scanneroptik erfolgen. Es sollten besondere Vorkehrungen zur Abschirmung der entstehenden weichen Röntgenstrahlung getroffen werden.

6.5.2 Verwendung der Zuwendung

Für die Untersuchungen zur Materialbearbeitung mittels Laserplasmen wurden zum einen neue analytische Werkzeuge wie die Hochgeschwindigkeitskinematografie eingesetzt und zum anderen eine Vielzahl von Aufbauten zur Analyse der laserinduzierten Plasmen sowie deren Effekte erstellt. Die hierfür angeschaffte Technik wurde zu diesem Zweck während der gesamten Laufzeit des Projektes an den unterschiedlichsten Stationen aufgebaut, modifiziert und den jeweiligen Bedingungen des zu beobachteten Prozesses angepasst, da die angestrebte Bearbeitung von Materialoberflächen mittels laserinduziertem Plasma zunächst eine genaue Analyse der spezifischen Eigenschaften zur Plasmaentstehung erforderte. Hierunter fielen die benötigte Mindestintensitäten der Laserstrahlung zur Erzeugung sowie die intensitätsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit und das abschließende Kollabieren des Plasmas aufgrund der Verdünnung der Atmosphäre des durch die Aufheizung auseinanderstrebenden angeregten Gases. Gezielt sollten auch die direkten Wechselwirkungsprozesse des durch die Laserstrahlung induzierten Plasmas mit der Materialoberfläche untersucht werden. Die meist versprechende und zugleich auch effektivste Untersuchungsmethode bzgl. der schnellen Erzeugung von auswertbaren Daten war die Hochgeschwindigkeitskinematografie, welche durch Weiterentwicklungen in der schnellen und orts aufgelösten Restlichtverstärkung durch sog. „Micro Channel Plates“ auch in Form von Digitalkameras verfügbar ist. Um Plasmaprozesse in einzelne Stadien der Plasmaentstehung differenziert darstellen zu können, wurden Verschluss- bzw. effektive Aufnahmezeiten der Kamera im Nanosekundenbereich benötigt. Dies ermöglichte die innerhalb des Projektes angeschaffte Hochgeschwindigkeitskamera HSFC-Pro (Abb. 6.5.2.1) der Firma PCO-Imaging GmbH. Die minimale Verschlusszeit dieser Kamera beträgt lediglich 3 ns und gehört somit zu einer der kürzesten kommerziell erhältlichen am Markt. Das gesamte Kamerasystem besteht aus 4 einzelnen Kameramodulen, welche laufzeitkorrigiert innerhalb des großen Außengehäuses angebracht sind. Es kann somit in Summe eine Serie von 4 Bildern aufgenommen werden, wobei jedes

Einzelbild mit einer Genauigkeit von 1 ns innerhalb einer frei wählbaren Gesamtaufnahmezeit der Serie verschoben werden kann.



Abb. 6.5.2.1: links: Hochgeschwindigkeitskamera HSFC-Pro mit geöffnetem Deckel. Zu erkennen ist, dass die Kamera aus 4 Einzelmodulen besteht, welche zum Ausgleich der Laufzeit des Lichtes innerhalb der Kamera versetzt angeordnet sind. Jedes Modul verfügt über einen separaten Bildverstärker sowie einem gekühlten Bildwandler. rechts: Der Einsatz der Kamera im Labor bei der Plasmaanalyse von Laserprozessen, hier am Hochleistungsfaserlaser

Zur Darstellung der durch den Laser erzeugten Plasmen wurde ein Versuchsaufbau wie in Abb. 6.5.2.2 verdeutlicht gewählt.

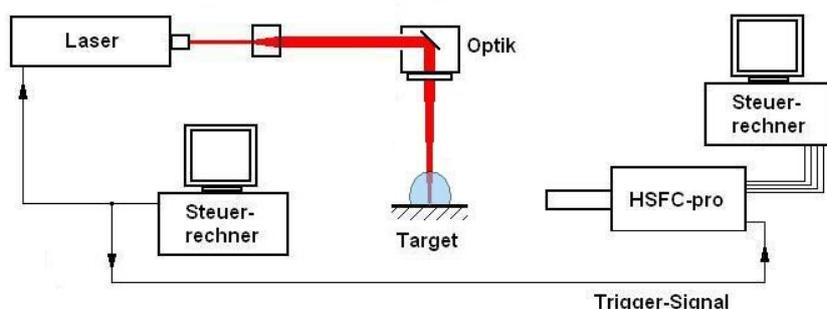


Abb. 6.5.2.2: schematischer Aufbau zur Visualisierung von laserinduzierten Plasmen. Die entstehende Plasmaformation kann direkt von der Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen werden.

Ein Laserpuls wurde hierfür von einem Steuerrechner ausgelöst. Dieses Signal wurde gleichzeitig an die Kamera weitergeleitet, welche die Aufzeichnung der Bilder auslöste. Wichtig war hierbei, dass die benötigte Zeit zur Erzeugung des Bildes sowie die Laufzeit des Laserpulses mit beachtet werden musste. Hierfür kann die Kamera mittels einer integrierten Schaltung verzögert ausgelöst werden. Mittels dieser Schaltung und den zusätzlicher Steuerungsoptionen innerhalb der zur Ansteuerung der Kamera verwendeten Software, im Hand-

buch wird das Gesamtsystem als „Pulser-Delay“ bezeichnet, konnten sogar mehr als die kameraspezifischen 4 Einzelbilder erzeugt werden, indem man die nachfolgenden Laserpulse mittels einer veränderten Verzögerungszeit aufzeichnet. Somit ließen sich auch längere Sequenzen des laserinduzierten Plasmas darstellen (jeweils 4 Bilder/Puls). Problematisch war hierbei, wenn die Intensität oder das zeitliche Auftreffen des Pulses auf die Materialoberfläche zu stark variierten. Somit wurden für die anfänglichen Versuche Laserquellen verwendet, die eine hinreichende „Puls zu Puls“-Stabilität aufwiesen.

Nicht nur der hohe Energiegehalt eines zum Plasma ionisierten Gases führt zu Veränderungen der Oberfläche (hier in Form von Energieübertragung durch Strahlung und Wärme) sondern auch durch die rasche Expansion des Plasmas und die sich ausbildende Schockelle kann es zur oberflächlichen Modifikationen des Materials kommen. Die Analyse der sich ausbildenden Stoßwelle oder Schockwelle, bei welcher es sich um komprimiertes Gas handelt, war nicht trivial und auch nicht mit dem unter Abb. 6.5.2.2 gewählten Aufbau durchführbar. Um die Dichteunterschiede im Gas zu verdeutlichen, bedient man sich der sog. Schlierenfotografie oder Schattenfotografie. Für die Untersuchungen wurde aufgrund des einfacher zu realisierenden Aufbaus die Schattenfotografie gewählt. Physikalischer Hintergrund ist hierbei die Varianz der Brechzahl verschieden stark verdichteter Gase. Gase geringer Dichte besitzen eine Brechzahl nahe 1, wird ein Gas verdichtet, steigt seine Brechzahl infolge der Erhöhung der Anzahl an Wechselwirkungspartner bei gleichzeitiger Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes.

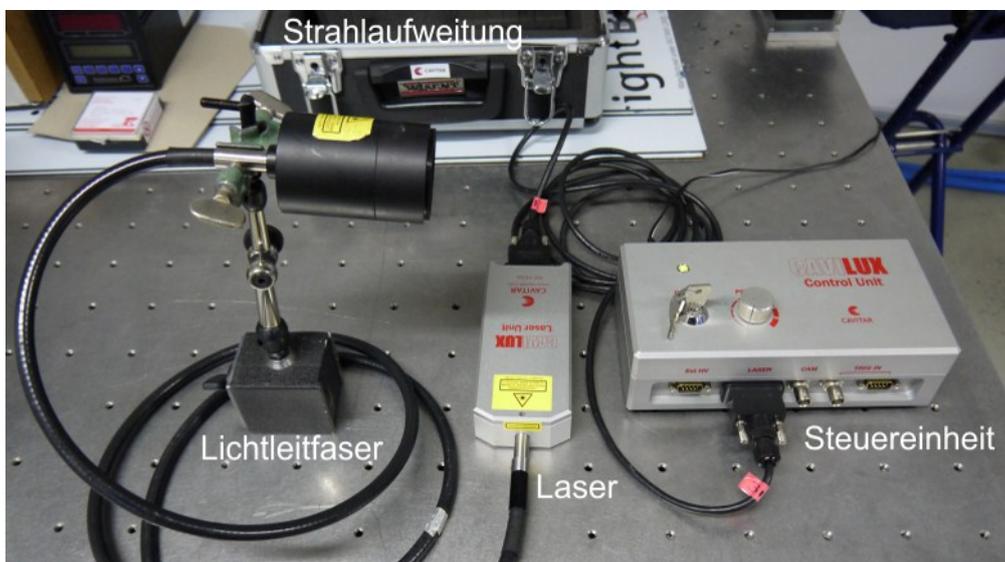


Abb. 6.5.2.3: Der Cavilux-Beleuchtungslaser besteht aus einer Steuereinheit, welche mit der Kamera gekoppelt werden kann, um die Aufnahme zeitlich mit der Beleuchtung zu synchronisieren. Der eigentliche Laser (ein gepulster Diodenlaser) ist in einer extra Einheit untergebracht. Die Strahlung wird mittels einer Lichtleitfaser zum Einsatzort transportiert und kann abschließend durch eine Strahlaufweitung an die benötigte Ausleuchtung und Intensität angepasst werden.

Mittels dieser Effekte sollte nun auch die sich bildende Druckwelle des expandierenden Plasmas sichtbar gemacht werden können, wenn man hierfür eine zusätzliche Beleuchtungsquelle einsetzt, welche zum einen Intensiv genug ist, um das starke Leuchten des Plasmas zu überdecken und zum anderen lediglich eine geringe Schwankung bzgl. der Intensität aufweist, um eine gleichbleibende Ausleuchtung zu den unterschiedlichen Aufnahmezeiten zu ermöglichen. Gewählt wurde hierfür ein Beleuchtungslaser „Cavilux Smart“ (Abb. 5.6.2.3) der Firma Cavitax, welcher bei einer Pulsdauer von 42 ns bis 10 μ s eine konstante Ausgangsleistung von 400W bei einer Wellenlänge von 688 nm bereitstellt.

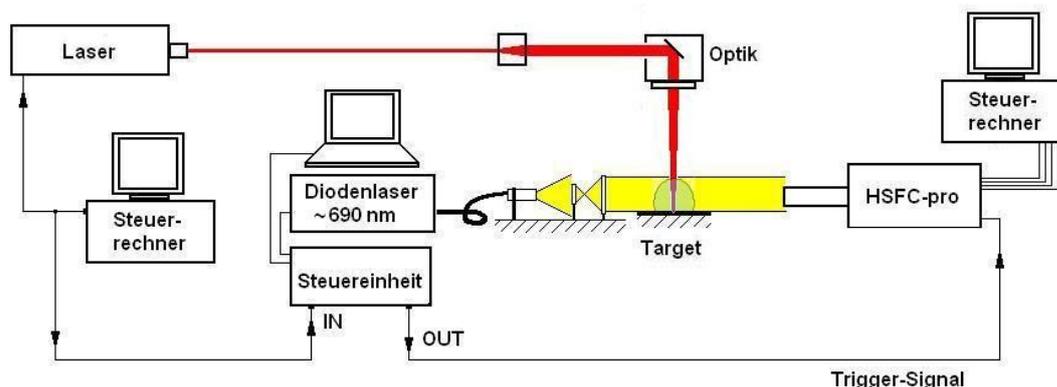


Abb. 6.5.2.4: schematischer Versuchsaufbau zur Visualisierung von Druckwellen nach dem Schattenverfahren. Um die Schattenbildung eines Brechzahlüberganges zu verdeutlichen, muss das Plasma durchleuchtet werden. Hierbei ist spektral eine höhere Intensität als die Leuchtstärke des Plasmas nötig. Somit können fast ausschließlich andere Laser für diese Aufgabe herangezogen werden.

Die Strahlung des Beleuchtungslasers wurde durch ein zusätzlich in den Strahlengang eingebrachtes Linsensystem kollimiert, da anderenfalls aufgrund der zu starken Aufweitung des Lasers eine zu geringe Intensität an der Kamera angelegen hätte, welche das Plasmaleuchten hätte nicht überblenden können. Diese Anordnung wurde entlang der optischen Achse der Hochgeschwindigkeitskamera ausgerichtet. (Abb. 6.5.2.4). Da sich die Strahlungsemission des Plasmas dennoch negativ auf die Empfindlichkeit der Aufnahmen auswirkte, wurde weiterhin ein schmalbandiger Filter zur gänzlichen Ausblendung des Plasmas eingesetzt. Der restliche Aufbau blieb wie bei der Visualisierung des Plasmas konstant. Der dritte Teil der Analysen zu den Wechselwirkungsprozessen des Plasmas bezog sich auf die Beobachtung der Materialoberfläche selbst. Es sollte hierbei wie bei der Schlierenfotografie versucht werden, die Plasmawolke durch Überstrahlung auszublenden und die von der Materialoberfläche reflektierte bzw. gestreute Strahlung des Beleuchtungslasers zur Auswertung heranzuziehen. Hierfür wurde wiederum der Beleuchtungslaser „Cavilux Smart“ (Abb.6.5.2.5) verwendet, diesmal jedoch, um die Materialoberfläche inkohärent auszuleuchten. Der Beleuchtungslaser wurde so positioniert, dass der Laserstrahl über Reflektionen an einen zusätzlich eingebrachten Spiegel entlang der optischen Achse in die Kamera geführt wird. Die Beobachtung der Materialoberfläche erfolgte somit unter einem gewählten Winkel von 45°, so dass

alle Aufnahmen in der y-Richtung, bedingt durch diese Aufnahmeart um den Faktor $\sqrt{2}$ verkürzt waren.

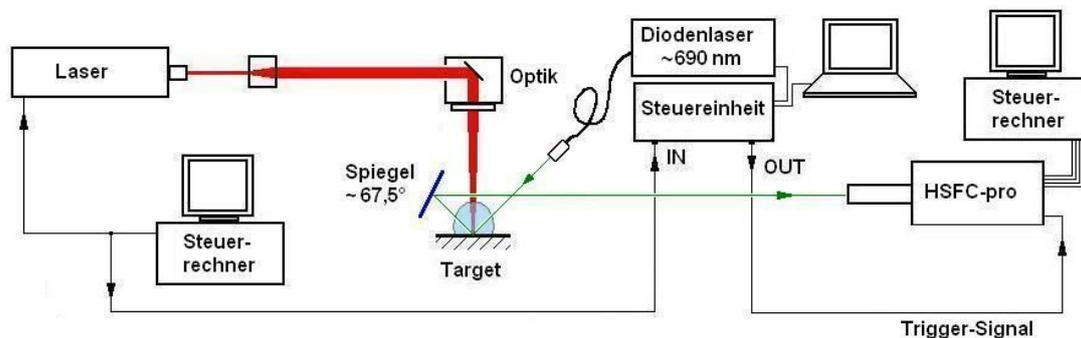


Abb. 6.5.2.5: schematischer Aufbau zur Visualisierung von Materialmodifikationen während des Laserprozesses. Hierfür muss zusätzlich zur Ausblendung des Plasmas eine Umlenkung des Streulichtes mittels eines Spiegels erfolgen. Da die Oberfläche nun nur aus einem Winkel beobachtet werden kann, verringerte sich die Auflösung der gekippten Achse um den Reziprokwert des Sinus des 2-fachen Kippwinkels, im vorliegende Fall bei 45° um $2^{1/2}$.

Sämtliche Versuche wurden an gepulsten und auch an kontinuierlich strahlenden Lasern durchgeführt. Hierbei gelang es mit beiden Lasern Festkörperplasmen zu erzeugen. Es handelt sich hierbei um angeregte Eruptionsprodukte ausgehend von der laserbestrahlten Materialoberfläche.

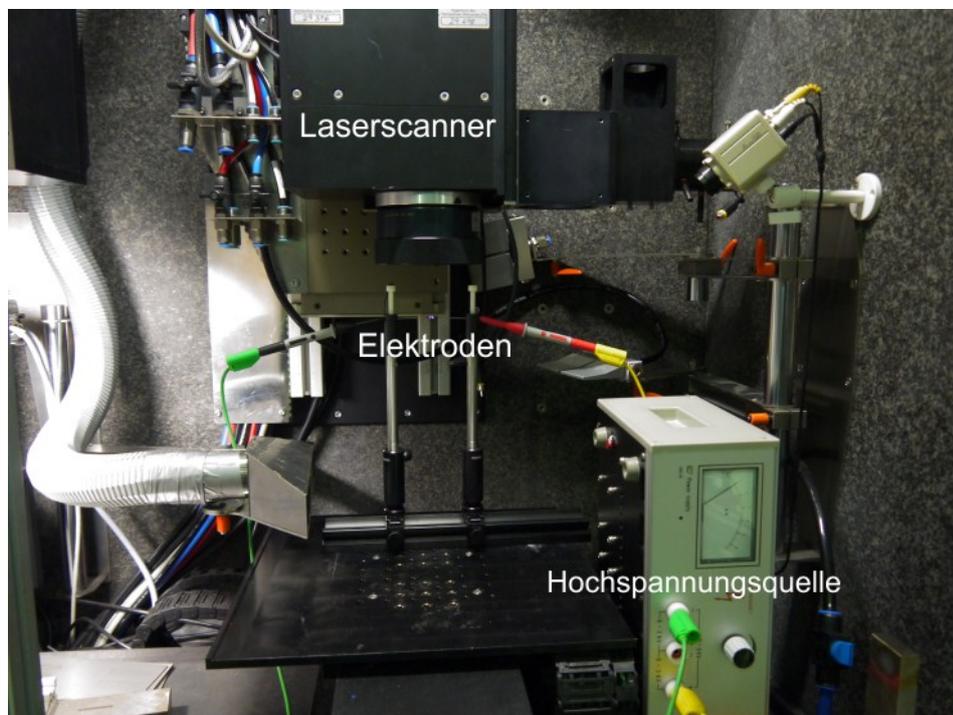


Abb. 6.5.2.6 Versuchsaufbau zum Vorionisieren der Umgebungsluft zum Zünden eines freien Plasmas durch einen cw-Laser. Zu erkennen sind die Elektroden, zwischen denen das Plasma erzeugt werden soll sowie die hierfür nötige Hochspannungsquelle.

Weiterhin wurde versucht, ein freies Plasma mittels Laserstrahlung durch direkte Ionisation der Gasatmosphäre infolge der hohen sich ausbildenden Intensitäten bei Fokussierung der Laserstrahlung zu erzeugen.

Dies gelang zunächst lediglich bei gepulsten Lasern, welche durch zusätzliche Fokussierung eine hinreichend hohe Intensität erreichten. So konnten freie Plasmen in Gasen bei einer zur Erzeugung des Plasmas minimal benötigten Intensität von ca. 10 GW/cm^2 beobachtet werden. Um nun auch mittels gering intensiver Laserstrahlung, wie sie z.B. beim Einsatz von cw-Lasern, aufgrund der fehlenden hohen Pulsspitzenleistung vorliegen, wurden Versuche unternommen um das Plasma gezielt durch eine Vorionisierung des Gases zu erzeugen, um genügend freie Ladungsträger (Elektronen) zur primären Absorption der Laserstrahlung zur Verfügung stellen zu können und durch einen sekundären Schritt der Stoßionisation infolge der Wechselwirkung der nun angeregten Elektronen zu bewirken. Zur Überprüfung dieser Theorie wurde ein weiterer Versuchsaufbau erstellt, welcher neben den üblichen optischen Komponenten für den Laser auch eine Hochspannungsquelle zur Vorionisation der Umgebungsatmosphäre enthielt (Abb. 6.5.2.6).

6.5.3 Ergebnisse

Ablationsunterstützte laserinduzierte Plasmen und freie Plasmen

Zur direkten Abbildung von Plasmen wurde der Aufbau wie in Abb. 6.5.2.2 dargestellt verwendet. Zu Beginn der Versuchsreihe wurde zunächst ein gütegeschalteter Nd:YAG-Laser mit einer Pulsdauer von 80 ns genutzt. Um längere Sequenzen als die maximal möglichen 4 Einzelbilder des laserinduzierten Plasmas darzustellen, wurden bei den darauffolgenden Pulsen andere Startimpulsverzögerungen, des bereits beschriebenen „Pulser-Delays“, eingefügt. Somit wurden die Auslösezeiten der Kameramodule kontinuierlich verschoben. Problematisch war hierbei, wenn die Intensität oder das zeitliche Eintreffen des Pulses auf der Materialoberfläche infolge zeitlicher oder energetischer Fluktuationen innerhalb des Lasergerätes zu stark variierten.

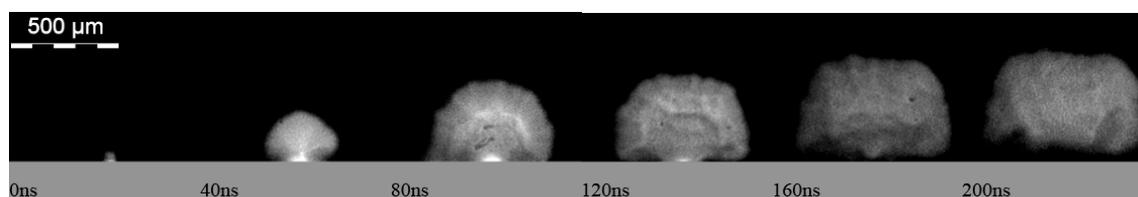


Abb. 6.5.3.1: *Laserinduziertes Plasma bei einer Intensität $0,6 \text{ GW/cm}^2$ bei einer sequenziellen Schrittweite von 40 ns. Deutlich ist ein Ablösen der Plasmawolke von der Materialoberfläche nach 160 ns zu erkennen.*

Abbildung 6.5.3.1 zeigt eine Sequenz von 2 Laserpulsen aufgenommen mit einer Schrittweite von 40 ns bei einer Belichtungszeit von 30 ns. Zu erkennen ist, dass das Plasma bis 80 ns relativ schnell expandierte. Im weiteren Verlauf nahmen die Expansionsgeschwindigkeit und

auch die Leuchtdichte wieder ab. In jeder Aufnahme wirkte das Zentrum des Plasmas leicht von der Materialoberfläche abgelöst. Somit bildete sich keine ideale Halbkugel mit der Laserwechselwirkungszone als Zentrum aus. Bei Erhöhung der Intensität änderte sich das Bild des Plasmas wesentlich (Abb. 6.5.3.2).

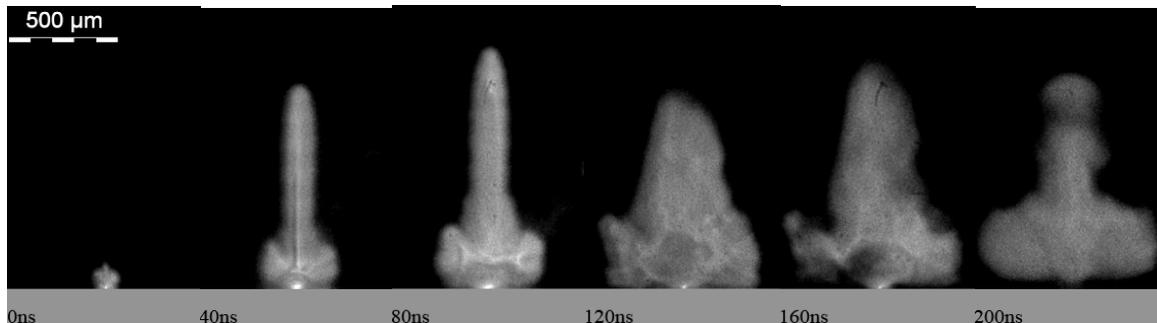


Abb. 6.5.3.2: Darstellung eines laserinduziertes Plasmas bei $10,2 \text{ GW/cm}^2$. Deutlich ist die Ausbildung eines Plasmakanals zu erkennen. Dieser breitet sich entgegen der Einfallsrichtung der Laserstrahlung aus.

Wie bei den Aufnahmen geringerer Intensitäten schien auch hier das Plasma nach Beendigung des Pulsereignisses ($> 80 \text{ ns}$) zu kollabieren. Deutlich war die Ausbildung eines Plasmakanals zu erkennen, welcher sich geradlinig entgegen der Einfallsrichtung der Laserstrahlung mit hoher Geschwindigkeit ausbreitete.

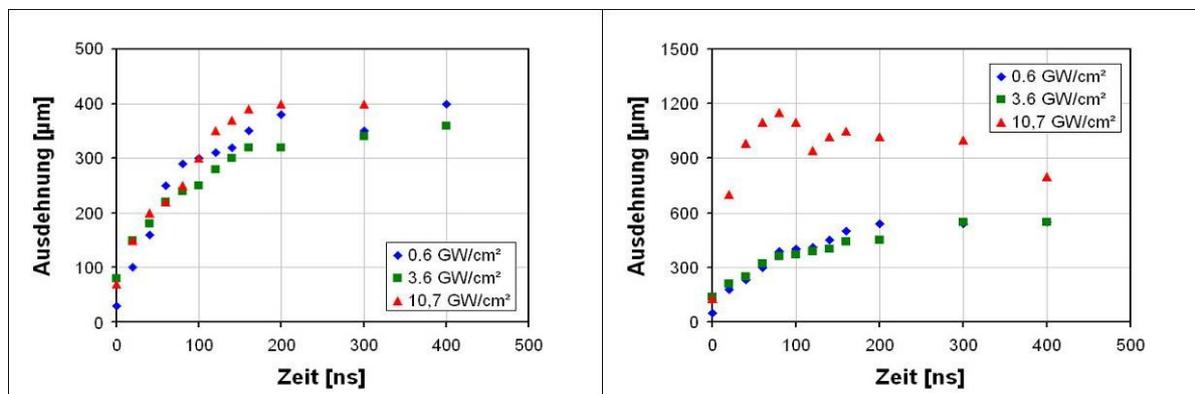


Abb. 6.5.3.3: Ausdehnung des Plasmas parallel (links) und senkrecht (rechts) zur Materialoberfläche aufgetragen über die Zeit

Der Einfluss der Intensität wirkte sich nur geringfügig auf die Plasmaexpansion parallel zur Oberfläche aus (Abb. 6.5.3.3 links). Am Ende des Pulses nach 80 ns war ein Abknicken der Kurven hin zu geringeren Expansionsgeschwindigkeiten zu erkennen. Nach ca. 200 ns kam die Expansion bei stetiger Abnahme der Leuchtdichte zum Erliegen. Bei Betrachtung der Plasmaausdehnung in Richtung des Strahleinfalles (Abb. 6.5.3.3 rechts) zeigte sich für die Intensitäten bis $3,6 \text{ GW/cm}^2$ ein ähnliches Bild wie für die Ausbreitung parallel zur Materialoberfläche. Zu erkennen ist, dass die vertikale Ausdehnung des Plasmas besonders in der Anfangsphase vergrößert war. Ab einer Grenzintensität von etwa 10 GW/cm^2 entstand ein ausgeprägter Plasmakanal. Die Geschwindigkeit, mit der sich dieser Kanal entgegen der La-

sereinstrahlrichtung bildete, betrug bis zu 16.000 m/s und war somit mehr als 3-mal schneller als die horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit. Es schien sich hierbei um eine induzierte Anregung bereits vorhandener atomarer Luftbestandteile zu handeln (freies Plasma). Die Annahme war, dass es durch Übertragung von Energie z.B. durch Strahlung oder Stößen ausgehend vom bereits hoch angeregten Festkörperplasma zu einer energetischen Anregung der bis dato nicht direkt absorbierenden Bestandteile der Umgebungsatmosphäre kommen konnte. Durch diesen zusätzlichen Betrag an Energie sollten die atomaren Bestandteile des Gases mithilfe des noch aktiven Laserstrahles über die Ionisationsschwellenergie angeregt werden können. Es bildete sich somit ein quasi extern induziertes freies Plasma. Zur Untersuchung dieses Effektes wurden weiter Versuchsreihen durchgeführt (Abb. 6.5.3.4).

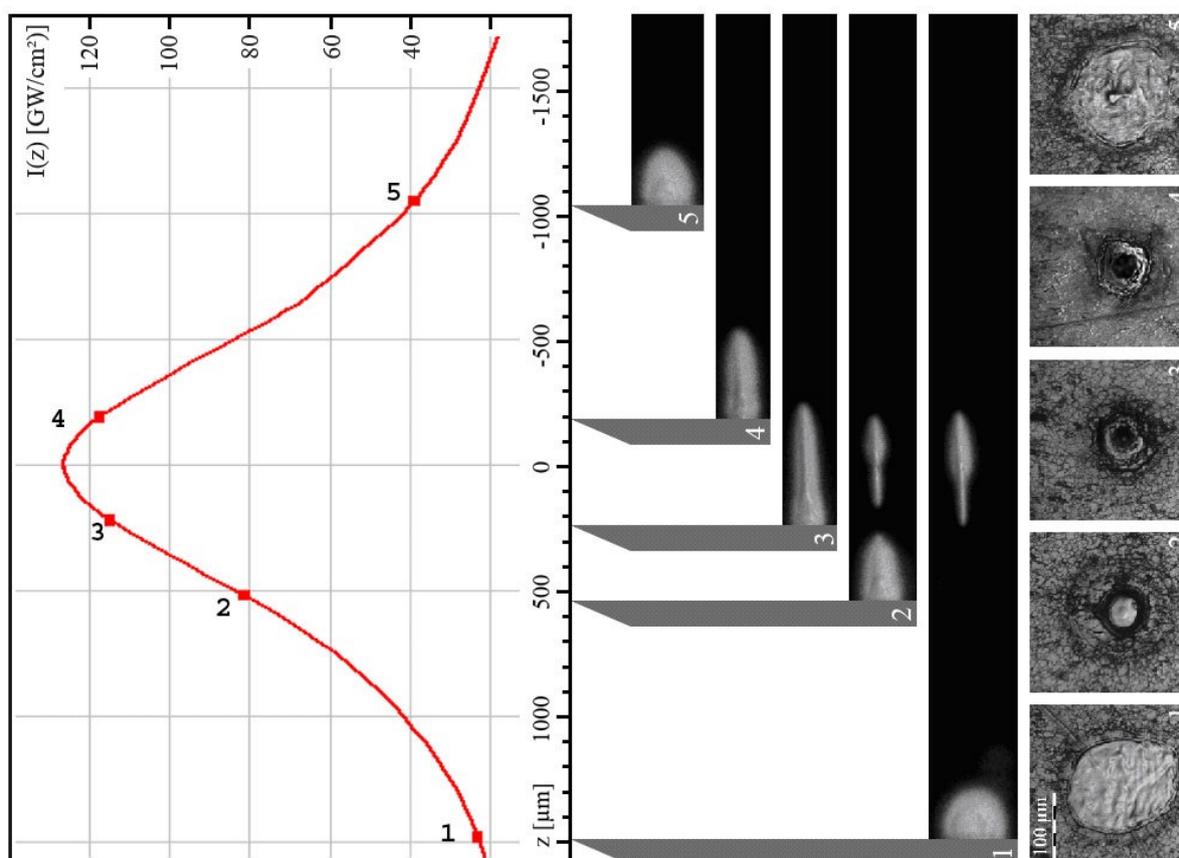


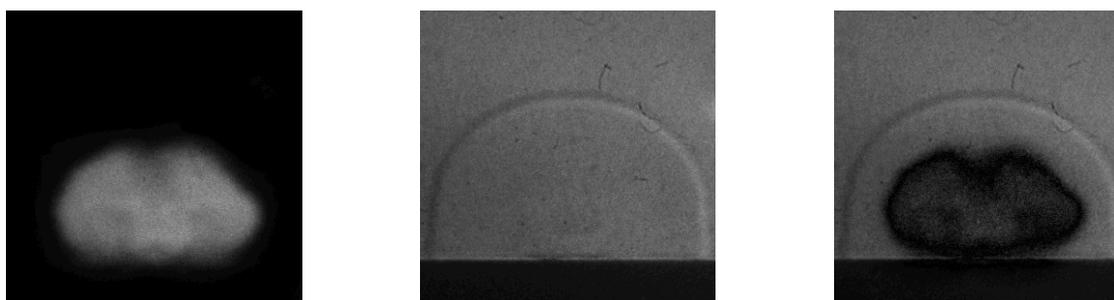
Abb. 6.5.3.4: Intensitätsverteilung eines Gaußstrahls relativ zur Fokusslage bzgl. der Materialoberfläche (links). „0“- entspricht dem Fokus auf der Materialoberfläche „-“, – entspricht einer Fokusslage innerhalb des Materials. Die zugehörigen Plasmaaufnahmen (Mitte) zeigen die Plasmen zur relativen Fokusslage mit den dazugehörigen Abtragungen der Materialoberfläche (rechts).

Die Materialoberfläche wurde hierfür relativ zur Fokusslage verschoben. Die auf die Materialoberflächen wirkenden Intensitäten konnten somit über einen großen Bereich variiert werden. Zu erkennen ist bei den Plasmaformationen in Abb. 6.5.3.4(1) und Abb. 6.5.3.4(2) ein von der Materialoberfläche losgelöstes Luftplasma, welches infolge der weitaus höheren Intensitäten im Bereich des Laserfokus ohne äußere Einflüsse entstand. Entscheidend für die

Betrachtung eines induzierten Luftplasmas waren die Aufnahmen Abb. 6.5.3.4(3) und Abb. 6.5.3.4(4). In Abb. 6.5.3.4(3) verband sich das selbstständig ausgebildete Luftplasma mit dem des von der Materialoberfläche ausgebildeten und zeigte das bekannte Bild des Plasmakanals aus Abb. 6.5.2.8. Die Lage der Materialoberfläche der Plasmaformation aus Abb. 6.5.3.4(4) lag jedoch 200 μm oberhalb des eigentlichen Fokuspunktes. Es existierte somit über der Materialoberfläche kein Bereich, in dem der Laserstrahl eine genügend hohe Intensität besaß, um selbständig ein Luftplasma zu initiieren. Dennoch bildete sich wiederum die aus Abb. 6.5.3.2 bekannte Plasmaformation aus. Hierbei musste es sich um das postulierte extern induzierte freie Plasma handeln.

Darstellung von plasmainduzierten Druckwellen

Bei der Oberflächenbearbeitung mittels Plasma können gleichwohl Effekte eine Rolle spielen, welche infolge der auf das Material auftreffenden Schockwellenfront entstanden sind. Lokal auftretende sprunghafte Änderungen in den Brechungsindizes erzeugen im Übergangsbereich Beugungseffekte, was wiederum zu einer Kontrastwirkung führt. Verdichtete Gase besitzen einen höheren Brechungsindex als Unverdichtete. Somit können mit der Schattenfotografie die Übergänge zwischen höher- und niederverdichteten Gasen sichtbar gemacht werden. Da die spektrale Leuchtdichte des Plasmas verglichen zu der des Beleuchtungslasers relativ hoch war, musste zusätzlich ein schmalbandiger auf die Beleuchtungswellenlänge angepasster Bandpassfilter vor der Kamera angebracht werden, um das Plasma gänzlich auszublenzen. Es wurden jeweils 2 Laserpulse gleicher Parameter an der betreffenden Stelle aufgezeichnet. Zum einen mit aktivem Beleuchtungslaser und Filter und zum anderen mit ausgeschaltetem Beleuchtungslaser ohne Filter. Somit konnte jeder Schattenabbildung ein äquivalentes Plasma zugeordnet werden. Im Nachgang wurde dann aus diesen zwei Einzelbildern ein überlagertes Bild mit beiden Anteilen erzeugt (Abb. 6.5.3.5).



Plasma

Schatten

Kombination

Abb. 6.5.3.5: *Kombination der beiden Aufnahmetechniken. links: Aufnahme des Laserplasmas, Mitte: Aufnahme der Druckfront mit eingeschaltetem Beleuchtungslaser, rechts: Kombination der beiden Bilder im Rechner*

Interessanterweise war bei den schattenfotografischen Aufnahmen (Abb. 6.5.3.5 Mitte) innerhalb der Stoßwelle bis auf sehr geringe Schlierenbildung keine Unterstruktur zu erkennen. Es konnte somit geschlossen werden, dass in diesem Bereich gleichmäßige Druckverhältnisse herrschten.

Die äußere Form der Druckwelle korrelierte mit der des leuchtenden Plasmas, gleich ob es sich um Festkörperplasma oder um induziertes Luftplasma handelte (Abb. 6.5.3.6). Dies wurde deutlich, da die Form des Plasmakanals ebenfalls in der expandierenden Druckwelle abgebildet wurde. Einen Unterschied in der Stärke (Kontrast) der Druckwelle ausgehend von ihrem Ursprungs (Festkörper- bzw. Luftplasma) schien es nicht zu geben. Bei der Analyse der Aufnahmen zu den Plasmaformationen (Abb. 6.5.3.1, 6.5.3.2) fiel auf, dass die Abbildung der Druckwelle bereits in diesen enthalten war. Sie wurde deutlich in kreisrunden Bereichen erhöhter Leuchtkraft bei der ersten Expansion des Plasmas bis 80 ns sichtbar. In den beiden folgenden Diagrammen ist die Ausdehnung der Druckwelle in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen (Abb. 6.5.3.7).

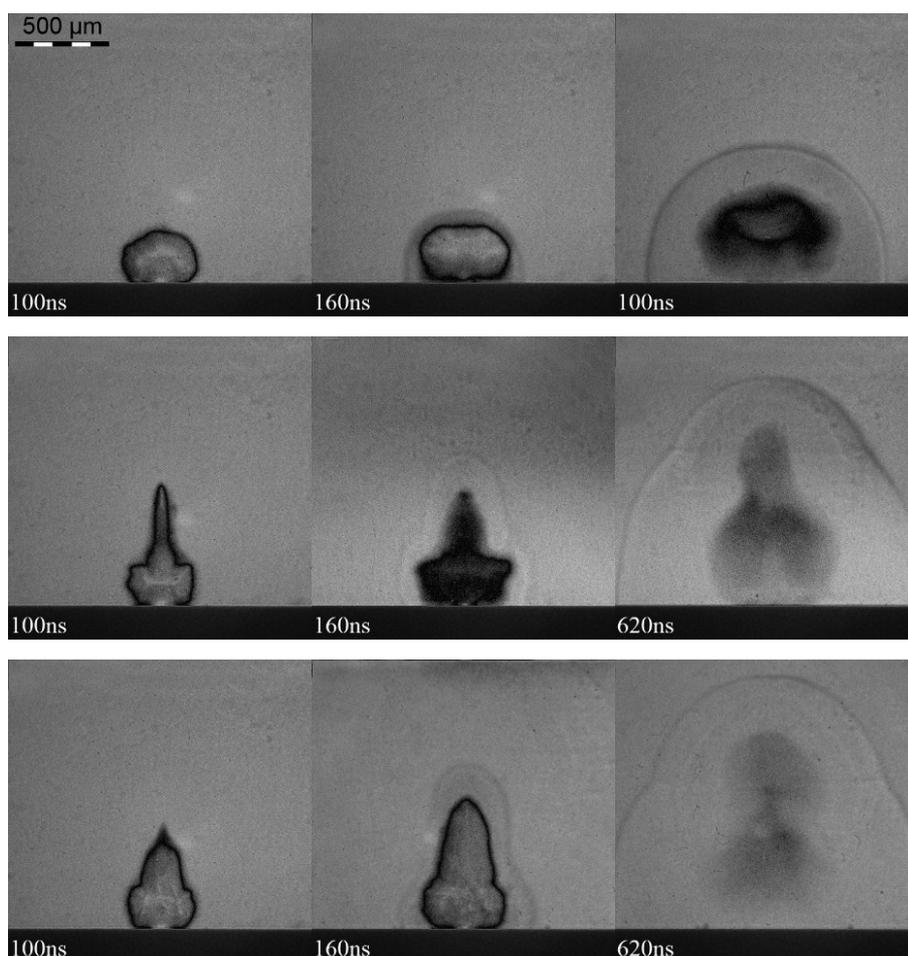


Abb. 6.5.3.6: zeitlicher Verlauf der plasmainduzierten Druckwelle bei 100, 160 und 620 ns (von links nach rechts) bei verschiedenen Intensitäten von $1,8 \text{ GW/cm}^2$, $11,7 \text{ GW/cm}^2$ und $33,3 \text{ GW/cm}^2$ (von oben nach unten)

Prinzipiell war eine Verringerung der Geschwindigkeiten beim Austritt der Druckwellen aus dem Plasmabereich zu erkennen. In Tab. 6.5.3.1 sind die Geschwindigkeiten abhängig von der Laserstrahlintensität innerhalb und außerhalb des leuchtenden Plasmabereiches aufgelistet.

Wie bereits bei den Aufnahmen des strahlenden Plasmas unterschieden sich die Geschwindigkeiten der Druckwellen in horizontaler und vertikaler Richtung ab einer gewissen

Schwellintensität wesentlich. Dies war wiederum auf den Effekt des sich ausbildenden freien Plasmas zurückzuführen.

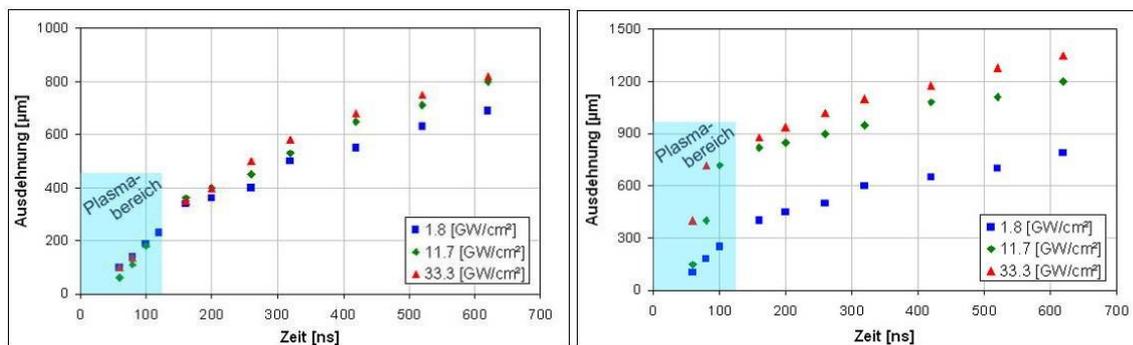


Abb. 6.5.3.7: links: horizontale Ausdehnung der Druckwelle über die Zeit bei unterschiedlichen Intensitäten. rechts: vertikal

Tab. 6.5.3.1: Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_x und v_z der Druckwellen, innerhalb und außerhalb des Plasmas

Bereich	Intensität, I_{\max} [GW/cm ²]	Geschwindigkeit [m/s]	
		v_x	v_z
Im Plasma	1,8	2.400	3.350
	11,7	3.040	14.250
	33,3	2.540	16.000
Außerhalb des Plasmas	1,8	790	820
	11,7	970	840
	33,3	1.020	1.010

Beobachtung der Materialoberfläche während der Laserbestrahlung

Zur Beobachtung der Wirkung des Plasmas auf eine Materialoberfläche wurde im letzten Teil der analytischen Untersuchungen versucht, das Plasma auszublenden. Hierfür wurde die Wechselwirkung von gepulster Laserstrahlung auf Edelstahl beobachtet (Abb. 6.5.3.8). Um lediglich den Einfluss des Plasmas zu verdeutlichen, wurde nur eine Intensität von weniger als 1 GW/cm² eingesetzt.

Aufgrund des Beobachtungswinkels von 45° und des relativ kleinen Abbildungsmaßstab des Kameraobjektivs (3,44:1) war das Auflösungsvermögen jedoch begrenzt. Zudem waren die Aufnahmen aufgrund der endlichen Tiefenschärfe nur im Mittenbereich scharf.

Zu erkennen war, dass bis zur Pulsdauer des Lasers von 80 ns ein Leuchten aus dem Einwirkbereich des Lasers trat. Ein Auswurf von Material konnte in diesen Zeitskalen aufgelöst werden. Aussagen über Effekte, die lediglich durch das Plasma hervorgerufen werden können hierbei nicht getätigt werden. Ein weiterer Versuch zielte darauf ab, Plasmaeffekte während der Bearbeitung einer Materialoberfläche mittels eines kontinuierlich strahlenden Lasers zu beobachten. Hierbei kam es bei der gewählten Leistung zum partiellen Schmelzen der Oberfläche (Abb. 6.5.3.9).

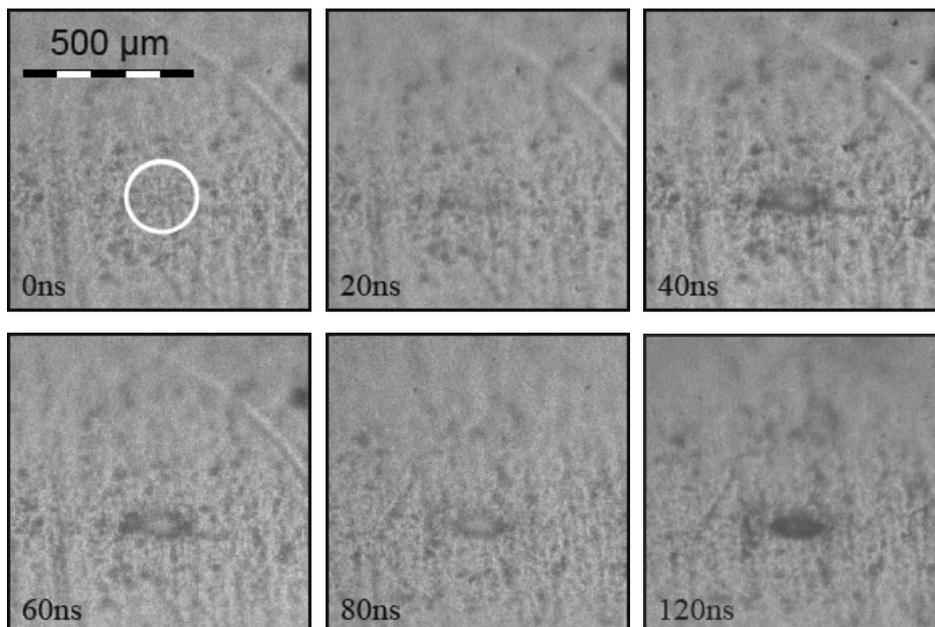


Abb. 6.5.3.8: Oberfläche einer Edelstahlprobe wurde mit gepulster Laserstrahlung von 80 ns Pulslänge und einer Intensität von $0,6 \text{ GW/cm}^2$ beaufschlagt. Belichtungszeit der Aufnahmen 30 ns.

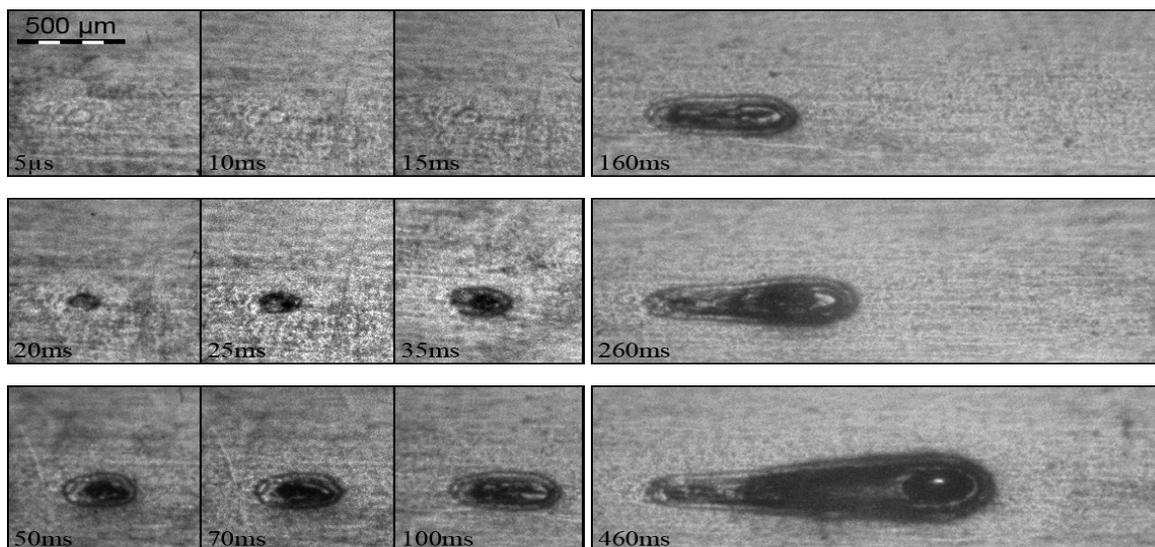


Abb. 6.5.3.9: Lasermaterialwechselwirkung, Edelstahlblech, Dicke 1 mm, Leistung 60 W, Vorschubgeschwindigkeit 0,18 m/min, Intensität 100 KW/cm^2 , Streckenenergie $0,02 \text{ J/m}$

Da die Schmelze das einfallende Licht des Beleuchtungslasers nicht wie das umliegende Material diffus streute, wirkte sie in den Aufnahmen dunkler. Zu erkennen ist, dass sich bei den gewählten Parametern ein signifikanter Schmelzpool erst ab einer Zeit von 20 ms bildet. Somit hätten bis zu dieser Zeit Effekte, die allein vom Plasma herrühren, beobachtbar sein müssen. Nach dieser Zeit vergrößerte sich der Schmelzpool stetig. Ab diesen Zeitpunkt war keine Trennung mehr zwischen Schmelz- und Plasmaeffekten zu erwarten.

Erzeugung von freien Plasmen

Zur Bearbeitung einer Materialoberfläche lediglich mit Plasma sollte versucht werden, ein Plasma zu erzeugen, dass allein in der Umgebungsatmosphäre, also quasi frei, initiiert werden kann. Zum Ionisieren der Umgebungsatmosphäre wird prinzipiell eine Mindestenergie von 13,5 eV für Sauerstoff und für das Element Stickstoff 14,5 eV benötigt. Die in der Materialbearbeitung eingesetzten Laser können jedoch wellenlängenbedingt nur eine Photonenenergie von 1 eV bereitstellen. Somit werden hohe Intensitäten benötigt, um eine nichtlineare Absorption und letztendlich eine Anregung des Elements bis zur Plasmabildung zu erreichen. Dies kann recht einfach mit gepulsten Lasern erreicht werden. Aus diesem Grund wurden die ersten Untersuchungen mit einem kurzgepulsten Laser (Edgewave IS41-E) durchgeführt. Die Parameter des Lasers sind in Tab. 6.5.3.2 dargestellt.

Tab. 6.5.3.2: Parameter des Lasers

Wellenlänge	1064 nm
Pulsdauer	6 ns
Pulsspitzenleistung	470 kW
Fokussieroptik	15 mm
Strahlradius im Fokus	5,1 μm
max. Laserintensität im Fokus	1.150,4 GW/cm^2

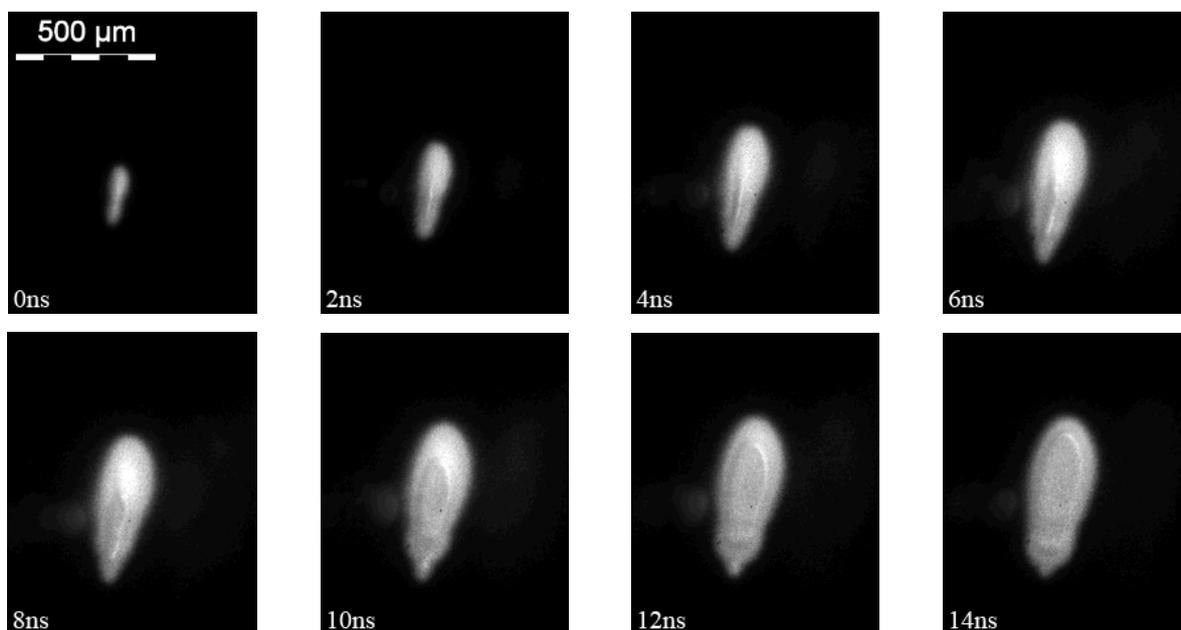


Abb. 6.5.3.10: laserinduziertes freies Plasma mittels eines gepulsten Lasers bei einer Intensität von $25 \text{ GW}/\text{cm}^2$

Wird durch starke Fokussierung eines Laserstrahls die kritische Intensität überschritten, kommt es zum optischen Durchbruch. Schlagartig werden hierbei Teilchen ionisiert und ein Plasma hoher Dichte bildet sich aus. Aufgrund der kurzen Pulsdauern erreichte der vorhandene Laser diese hohe Pulsspitzenleistung. In Kombination mit einer asphärischen Optik kurzer Brennweite von nur (15 mm) konnte die kritische Intensität überschritten und ein freies Plasma in der Umgebungsatmosphäre im Fokus des Laserstrahls gezündet werden (Abb. 6.5.3.10). Ausgehend vom Ort größter Laserstrahlintensität bildete sich im Fokusbereich ein Plasma. Ähnlich wie in den Aufnahmen Abb. 6.5.3.2 bildete sich ein Plasmakanal entlang der Strahlpropagation aus. Nach 6 ns verbreitert sich dieser Kanal und eine innere Struktur bildete sich aus.

Ziel dieses Arbeitspakets war es jedoch, eine Plasmabearbeitung mittels eines cw-Lasers durchzuführen. Hierbei konnte jedoch kein Plasma in der Umgebungsatmosphäre initiiert werden. Die erzeugte Spitzenintensität lag bei $1,5 \text{ GW/cm}^2$. Bei gepulster Strahlung war eine mittlere Mindestintensität von 10 GW/cm^2 notwendig, um das Plasma zu zünden.

Die Annahme, dass bei kontinuierlicher Einstrahlung die Schwelle zum Zünden des Plasmas sinkt, bestätigte sich nicht. Zur Erzielung einer Intensität von 10 GW/cm^2 wäre eine Fokussierung des Lasers bei voller Leistung auf einen maximalen zulässigen Fokusradius von $3 \mu\text{m}$ nötig gewesen, was beim vorhandenen Aufbau den Einsatz von Brennweiten unter 4 cm bedeutet hätte. Der Einsatz solcher Optiken war jedoch bei diesen hochenergetischen Lasern mit 3000 J/s nicht applikabel, da die Optik keine thermische Linse hätte ausbilden dürfen und durch das sich bildende Plasma auf jeden Fall beim Bearbeiten von Materialoberflächen wegen dem kurzen Arbeitsabstand beschädigt worden wäre.

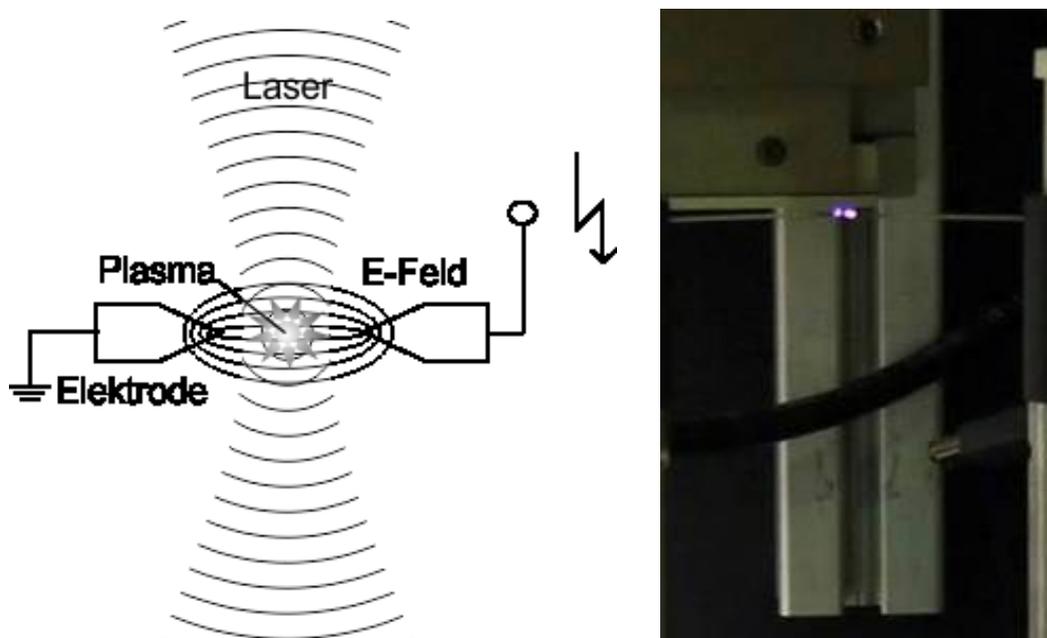


Abb. 6.5.3.11: links: Vorionisation schematisch, durch die hohen äußeren Feldstärken wird das Gas partiell angeregt, durch den zusätzlich eingestrahlt Laser zündet das Plasma gänzlich, rechts: durch den Laser gezündetes Plasma

Als Ausweg wurde versucht, ein stabiles freies Plasma auch bei längeren Brennweiten durch Vorionisierung der Atmosphäre zu erreichen. Im o.g. Versuchsaufbau wurden hierfür zwei Elektroden in der Nähe des Fokuspunktes angebracht (Abb. 6.5.3.11). Prinzipiell war es hierdurch möglich, gezielt ein Plasma beim Einschalten des Lasers zwischen den beiden Elektroden zu erzeugen. Beim Abschalten des Lasers verlösch das Plasma wieder. Problematisch war hierbei, dass sich nach Zünden des Plasmas sofort ein Plasmakanal, also eine Bogenentladung zwischen den beiden Elektroden, ausbildete, welche eine effektive Bearbeitung von Materialoberflächen verhinderte. Bis zum Ende des Projektes war es nicht mehr möglich, dieses Problem durch eine schnelle Strombegrenzung zu beheben.

Zusammenfassung

Es wurden umfangreiche Untersuchungen zur Bildung eines Laserplasmas mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt. Die Intensität, ab der bei einem kurzgepulsten Laser unabhängig vom Materialdampfplasma ein freies Luftplasma gezündet werden kann, wurde mit 10 GW/cm^2 bestimmt.

Mittels Schattenfotografie wurden plasmagetriebene Druckwellen untersucht und die Ausbreitungsgeschwindigkeiten bestimmt.

Das Zünden eines Luftplasmas mit einem cw-Laser bei einer Spitzenintensität von $1,5 \text{ GW/cm}^2$ gelang nicht. Somit konnte die Bearbeitung von Oberflächen mit einem cw-Laserplasma nicht untersucht werden.

6.6 Arbeitspaket 6 – Koordination

6.6.1 Ziel des Arbeitspaketes

Es bestand das Ziel, das Projekt durch den Leiter der Nachwuchsforschergruppe sowohl intern fachlich und organisatorisch zu koordinieren als auch die zahlreichen externen Veranstaltungen in Form von Workshops und Status-Seminaren zu organisieren. Weiterhin musste die Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern koordiniert werden und es waren Ideen für eine langfristige strukturelle Weiterentwicklung der Laserforschung an der Hochschule Mittweida zu entwickeln und umzusetzen.

6.6.2 Verwendung der Zuwendung

Für die Koordination wurden in der gesamten Projektlaufzeit 14 Mannmonate aufgewendet. Alle geplanten Aktivitäten wurden durchgeführt. Darüber hinaus wurde das Projekt mit einem Aufstockungs- und einem Verlängerungsantrag inhaltlich weiterentwickelt. Es wurde ein strategisches Konzept erstellt, das in einen Antrag für einen neuen Forschungsbau erfolgreich eingebracht werden konnte. Auf Anregung der Evaluatoren wurde weiterhin ein Strategiepapier „Rapid Microtooling 2015“ entwickelt. Hierin sind Ziele und Projektideen formuliert, die nach dem Auslauf der Förderung weiterverfolgt werden sollten. Der Nachwuchsforschergruppenleiter wirkte maßgeblich mit an der Ausgründung einer GmbH aus dem Laserinstitut Mittelsachsen e.V..

Der Leiter der Nachwuchsforschergruppe initiierte weiterhin zahlreiche neue Projekte, z.B. zwei IP Transfer Projekte (Stiftungsprofessur, marktorientiertes Verbundforschungsprojekt), so dass die Forschung auch nach Ablauf der Förderung kontinuierlich fortgeführt werden konnte.

6.6.3 Ergebnisse

Das Projekt konnte organisatorisch und fachlich erfolgreich abgeschlossen werden. Ein Großteil der fachlichen und nichtfachlichen Ziele wurde erreicht.

6.7 Innoprofile – Programmkriterien

6.7.1 Ziele

Das Projekt hatte zum Ziel, neben den fachlichen Erfolgen auch eine strukturelle Weiterentwicklung in der Region zu bewirken. Dazu wurden vom Projektträger fünf Programmkriterien definiert, die von der Nachwuchsforschergruppe erfüllt werden sollten. Im Einzelnen waren das:

- Beiträge zur Herausbildung eines Technologie- und Wirtschaftsprofiles für die Region
- Abstimmung der FuE - Aufgaben mit den kooperierenden Unternehmen
- Personalqualifizierung für die Unternehmen
- Qualifizierung der Mitglieder der Nachwuchsforschergruppe
- Technologieorientierte Aus- und Neugründungen.

Diese Ziele sollten von der Nachwuchsforschergruppe während der ganzen Laufzeit des Projektes verfolgt werden.

6.7.2 Verwendung der Zuwendung

Für die Erfüllung der Programmkriterien wurden keine zusätzlichen Mittel bereitgestellt. Sie mussten neben der fachlichen Arbeit verfolgt werden.

6.7.3 Ergebnisse

Beiträge zur Herausbildung eines Technologie- und Wirtschaftsprofiles für die Region

Das Innoprofile-Projekt hat durch die signifikante Verbesserung der Ausstattung und die Erzielung weltweit beachteter Ergebnisse wesentlich dazu beigetragen, dass ein weiterer Qualitätssprung in der Laserforschung der Hochschule Mittweida eingetreten ist. Durch das Projekt wurde das Spektrum der am Laserinstitut der Hochschule etablierten Verfahren erheblich erweitert. Insbesondere die Lasermikrostrukturierung mit hochrepetierenden fs-Laser und die Hochleistungsmikrobearbeitung mit 3 kW Monomode-Faserlaser haben quasi ein neues Forschungsfeld, die Hochrate-Laserbearbeitung, begründet.

Die langfristig ausgerichtete Strategie des Laserinstitutes der Hochschule sieht die verstärkte Entwicklung der Forschungsfelder „Lasernanobearbeitung“ und „Hochrate-Laserbearbeitung“ sowie der zugehörigen Theorie vor. Dieses Konzept mündete in einem Antrag für einen Forschungsbau nach Art. 91b Abs. 1 Nr. 3 GG im Gesamtumfang von 21 Mio. Euro, der vor dem Ausschuss für Forschungsbauten des Wissenschaftsrates erfolgreich verteidigt wurde. Das neue Gebäude soll bis 2014 errichtet werden. Im Antrag sind Investitionen in neue Technik im Gesamtumfang von 5 Mio. Euro enthalten, ein Schwerpunkt ist dabei die

Hochrate-Laserbearbeitung. Die Innoprofile-Nachwuchsforschergruppe hat bei der Ausarbeitung des Antrages erheblich mitgewirkt und wird die Feinplanung des Forschungsbaues ebenfalls aktiv unterstützen.

Durch die im Innoprofile-Projekt entwickelten neuartigen Technologien wurde das Forschungsprofil des Laserinstitutes der Hochschule Mittweida somit weiter geschärft und an die Bedürfnisse der kooperierenden regionalen Unternehmen und Institute angepasst sowie für weitere neue Partner attraktiv gemacht. Ein in der Nachwuchsforschergruppe erstelltes Strategiekonzept „Rapid Microtooling 2015“, das auf Anregung der Evaluatoren zustande kam, ist weitgehend konform mit der Strategieplanung des Laserinstituts der Hochschule Mittweida.

2008 gelang es aufgrund der vorhandenen Kompetenz zur Lasermikrobearbeitung in zwei Universitäts-Verbundprojekten aufgenommen zu werden. Die wissenschaftlichen Arbeiten der Innoprofile-Gruppe waren dafür u.a. die Voraussetzung. Im ersten Forschungsprojekt geht es um das definierte Aufrauen von Oberflächen (AiF/DFG-Gemeinschaftsvorhaben, CLUSTER-Antrag „Gecko“, Projektbeginn Mitte 2011) und im zweiten Forschungsprojekt um die Lasermikrostrukturierung und -modifizierung zur Erzeugung von spintronischen Strukturen für Sensoren (Prof. Geßner, Spitzenforschungsprojekt „Kompetenznetzwerk für Nanosystemintegration“). Das Spitzenforschungsprojekt wird vom BMBF seit Dezember 2009 gefördert.

Zur weiteren Vertiefung der Zusammenarbeit und zur Stärkung des Technologie- und Wirtschaftsprofiles wurde ein großes interdisziplinäres Projekt der Hochschule Mittweida, das aus EFRE-Mitteln der EU gefördert wird und bei dem insgesamt 6 Professuren (Lasertechnik, Laserphysik, Photonik, Elektrotechnik, Maschinenbau, Akustik) zusammen arbeiten, unter Federführung der Innoprofile - Nachwuchsforschergruppe beantragt. In der Gruppe werden Master-Absolventen verschiedener Fachrichtungen der Hochschule zusammen zur ultraschnellen Mikrobearbeitung forschen. Das Projekt startete im Oktober 2011.

Insgesamt wurden seit 2009 von der Nachwuchsforschergruppe 12 Drittmittelanträge begleitet und eingereicht.

An der Entwicklung eines zukunftssträchtigen Technologie- und Wirtschaftsprofiles der Region unter maßgeblichem Einfluss der Hochschule Mittweida wirkte die Innoprofile-Gruppe schon seit Projektbeginn tatkräftig mit. So konnte der Wachstumskern - Antrag FASKAN von Laserfirmen der Region, die teilweise auch Kooperationspartner im Projekt waren, erfolgreich begleitet werden. Die inhaltliche Ausrichtung des Wachstumskerns ergänzte sehr gut die technologischen Aktivitäten im Projekt. Beide Projekte trugen so aktiv zur weiteren Schärfung des Technologie- und Wirtschaftsprofiles von Mittweida als **Laserregion** bei. Waren früher die klassischen Laserthemen Schneiden und Schweißen im Vordergrund, so werden heute zunehmend die von der Nachwuchsforschergruppe initiierten innovativen Themenstellungen „Rapid Microtooling“ und „Hochrate-Laserbearbeitung“ von außen wahrgenommen.

Abstimmung der FuE - Aufgaben mit den kooperierenden Unternehmen

Der FuE-Bedarf wurde aufgrund der heterogenen Interessenlage mit den Unternehmen bilateral abgestimmt. Es kam zu vielfältigen gemeinsamen Projektaktivitäten. Folgende spezifischen Themen wurden bearbeitet:

- Strahlcharakterisierung
- Aufbau einer Spintronik-Forschung in Sachsen
- Untersuchungen zur Lasermikrobearbeitung
- Untersuchungen zur Hochrate-Laserbearbeitung
- Untersuchungen zur Oberflächenmikrostrukturierung
- Untersuchungen zum Lasereinsatz für die Solartechnik
- Hochrate-Lasermikrosintern mit Zweistrahltechnologie
- allg. Laserbearbeitung / Laserquellen
- Laserschutz

Die Abstimmung bezüglich des FuE-Bedarfes erfolgte nicht nur innerhalb des Projektes sondern auch zu anderen regionalen Initiativen. So war eine gute Abstimmung zum Wachstumskern – FASKAN vorhanden. Für Untersuchungen des Laserinstitut Mittelsachsen e.V. zum Laserschutz im FASKAN-Projekt wurde die Technik der Innoprofile-Gruppe zur Verfügung gestellt. Die gewonnen Erkenntnisse wurden wiederum zur Weiterentwicklung der Innoprofile-Anlagen hinsichtlich Lasersicherheit genutzt und werden zukünftig in den Qualifikationslehrgang zum Laserschutzbeauftragten mit einfließen

Personalqualifizierung für die Unternehmen

Im Projekt wurden über 6.000 Stunden Forschungshilfsarbeiten von Studenten der Hochschule geleistet. Dadurch konnten sie das moderne Forschungsgebiet kennen lernen. Es wurden 22 Diplom-, Bachelor-, und Masterarbeiten betreut. Damit wurde ein bedeutender Beitrag zur Heranführung von Studenten an die von den kooperierenden Firmen benötigten Technologien geleistet.

Es fanden zahlreiche Statusseminare und Workshops statt. Dabei wurde der Stand des Projektes dargestellt und mit den anwesenden Firmenvertretern diskutiert. Das trug wesentlich zur Heranführung der Kooperationspartner an die neuen Technologien und somit zur Weiterbildung bei.

Auch auf Anregung des Evaluationsworkshops wurde im November 2008 ein Rundschreiben an alle Firmen zur detaillierten Bedarfserfassung bezüglich Weiterbildung versandt. Wegen der sehr guten Resonanz konnten 2009 die ersten beiden Veranstaltungen zur Lasersicherheit und ein Grundkurs Lasermaterialbearbeitung durchgeführt werden. Sieben weitere erfolgreiche Veranstaltungen (Kurse Lasertechnik/ultrakurze Pulse sowie Praktika Laserstrahldiagnose/Laserwartung/ultrakurze Pulse) fanden 2010/2011 statt. Ergänzend wurden

auch bilaterale Schulungen zu speziellen Messaufgaben in den Firmen durchgeführt. Insgesamt fanden 9 Veranstaltungen mit 124 Teilnehmern statt.

2010 konnte ein Diplomand in der Innoprofile-Gruppe seine Diplomarbeit zu einem speziellen Photovoltaik-Thema sehr erfolgreich absolvieren und anschließend nahtlos in den noch jungen Bereich eines Kooperationspartners wechseln.

Qualifizierung der Mitglieder der Nachwuchsforschergruppe

Mit einem Kooperationspartner wurde ein aktiver Personalaustausch vereinbart. Ein Firmenmitarbeiter wechselte 2006 in das Projekt und hatte die Aufgabe, sich durch eine Promotion weiter zu qualifizieren. Er absolvierte ab September 2008 einen sehr erfolgreichen Auslandsaufenthalt am Photon Sciences Institute der University of Manchester. Neben gemeinsamen Fachveröffentlichungen konnte eine intensive Zusammenarbeit aufgebaut werden. Er wird seine Promotion dort einreichen. Zwei Mitarbeiter des britischen Institutes nahmen 2009 an der wissenschaftlichen Konferenz der Hochschule Mittweida teil.

Ein weiterer Mitarbeiter wird seine Promotion an der TU Chemnitz, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, einreichen. Er hat an einem Antrag zur Etablierung einer weiteren Nachwuchsforschergruppe gearbeitet und leitet diese fachlich an.

Die gesamte Nachwuchsforschergruppe qualifizierte sich kontinuierlich weiter. Dazu wurden zahlreiche internationale Kongresse und Workshops besucht. 2009 waren es Fachkongresse in München, Kobe (Japan), Leiria (Portugal) und Orlando (USA), 2010 in San Francisco (USA), Stuttgart, Chemnitz und Anaheim (USA) und 2011 in San Francisco (USA).

Durch alle Mitglieder der Nachwuchsforschergruppe wurden mehrere spezielle Workshops zur persönlichen Weiterbildung besucht, 2010 z.B. zur Messung von Hochleistungs-Laserstrahlen, zur Normung von Lasersinterprozessen und zur Anwendung brillanter Laserstrahlung.

Technologieorientierte Aus- und Neugründungen

Ein Projektmitarbeiter hat gemeinsam mit seiner Frau nebenberuflich ein Unternehmen zur Laserbeschriftung/Lasermikrobearbeitung aufgebaut. Er nutzte die Mitarbeit im Projekt Innoprofile zur weiteren technologischen Qualifizierung. Die im Projekt gesammelten Erfahrungen zur Lasermikrobearbeitung allgemein und speziell mit ultrakurzen Pulsen und mit hohen Laserleistungen sollen im eigenen Unternehmen umgesetzt werden. Zur weiteren Vertiefung der Zusammenarbeit war sein Unternehmen seit 2008 offizieller Kooperationspartner im Projekt.

Ein weiterer Projektmitarbeiter hat 2008 nebenberuflich ein Ingenieurbüro angemeldet. Dort arbeitete er zu speziellen lasertechnischen Problemen sowie zu elektronischen/softwaremäßigen Steuerungslösungen für Laserprozesse. Insbesondere in der Lasersteuerung für ultraschnelle Bearbeitungsprozesse, wie sie auch im Projekt realisiert wurden, sah er mittelfristig einen Zukunftsmarkt, da dies umfangreiche Kenntnisse zu den ablaufenden Laser-

prozessen sowie zu der entsprechenden Elektronik erfordert und er diese in der nötigen Komplexität besitzt.

Der Laserinstitut Mittelsachsen e.V. hat als 100%-Gesellschafter im September 2008 die LIM Laserinstitut Mittelsachsen GmbH gegründet. Erheblich unterstützt wurde er dabei von der Innoprofile-Gruppe, da der Nachwuchsforschergruppenleiter den komplexen Prozess maßgeblich gesteuert hat und nebenberuflich als Geschäftsführer der GmbH wirkt. Mit einigen Kooperationspartnern konnte bereits eine intensive kommerzielle Zusammenarbeit auf den Gebieten, die über die normale Projektzusammenarbeit hinausgingen, aufgebaut werden. Die Ausgründung der GmbH hat sich bisher als äußerst nützlicher und flexibler Baustein für die Laserforschung der Hochschule Mittweida erwiesen.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Aufwände und die Kosten wurden wie im Förderantrag beschrieben im Rahmen der vorgegebenen Grenzen von 20% für die Einzelpositionen eingehalten.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die einmaligen Projektergebnisse konnten nur durch die Langzeit-Förderung einer mannstarken Nachwuchsforschergruppe in der vorliegenden Konstellation, also durch die Begleitung von professionellen Evaluatoren und Kooperationspartnern aus dem KMU-Umfeld, erreicht werden.

Durch das Projekt wurde ein Forschungsumfang bewältigt, der wegen seiner Komplexität und Heterogenität von der Hochschule oder den Kooperationspartnern nicht aus Eigenmitteln hätte bestritten werden können. Die Begründung der laserbasierten Rapid Microtooling Technologien in vorher nicht vorhandener Vielfalt und der Hochrate-Laserbearbeitung durch das Projekt hatte nationale Bedeutung. Da es sich bei den untersuchten Technologien um sehr innovative und wissenschaftlich sehr anspruchsvolle Forschungsaufgaben handelte, mussten methodische Pionierarbeiten im Projekt geleistet werden.

Die wirtschaftliche Umsetzbarkeit von neuen Technologien hängt neben der Produktivität, die sie bieten, auch von der Akzeptanz durch die Nutzer ab. Deshalb sind oft umfangreiche und langjährige Vorleistungen notwendig, um die mentalen Barrieren für neue Technologien in der Industrie abbauen zu können. In der Regel müssen also schon lange vor der Markteinführung der Technologien vollständige und funktionstüchtige Prototypen und Muster gene-

riert werden, deshalb stehen anfänglich geringen Umsätzen hohen Kosten für Forschung und Entwicklung gegenüber, die KMU alleine nicht bewältigen können.

Das Projekt hatte in großem Umfang strukturpolitische Zielstellungen. Diese können nur durch eine öffentliche Förderung erreicht werden. Der mit dem Projekt in der Region eingeleitete Strukturbildungsprozess hin zu innovativen Technologien mit dem Schwerpunkt auf das Werkzeug Laser wird die Möglichkeiten zur Erzielung einer höheren Wertschöpfung dauerhaft erweitern.

Die umfangreiche Verbreitung der neuartigen Ergebnisse machte ebenfalls eine Zuwendung durch öffentliche Mittel notwendig.

9 Voraussichtlicher Nutzen

Eine Nutzung der Ergebnisse in den angegebenen Anwendungen durch die Kooperationspartner oder weitere Interessenten wird angestrebt und bereits partiell vorbereitet. Bei den kooperierenden Firmen erfolgt eine fließende Übernahme von Erkenntnissen z.B. zu speziellen Anforderungen an die Lasertechnik für die Mikrobearbeitung und zur Hochrate-Laserbearbeitung. Vom geplanten Rapid Microtooling Zentrum werden alle Kooperationspartner zumindest indirekt profitieren, da z.B. die kooperierenden Lasermaschinenbauer in konkrete Anfragen zur Realisierung von Technologien einbezogen werden.

Die drei im Projekt aufgebauten Laseranlagen passen insgesamt hervorragend in das Entwicklungskonzept des Laserinstitutes der Hochschule Mittweida. Sie sind so flexibel nutzbar ausgeführt, dass sie in Zukunft, z.B. in Nachfolgeprojekten, auch mit anderen Faserlasersquellen betrieben werden können. Für sich bereits in der Antragsphase befindliche neue Projekte stellen die Anlagen zum größten Teil die technische Basis dar. Durch die Erweiterung der Funktionalität im Verlängerungs- und Aufstockungsprojekt ist eine noch bessere Nutzbarkeit gegeben.

Die im Projekt angeschaffte Ultra High Speed Kamera stellt einen wichtigen neuartigen Baustein zur Prozessanalyse für die Laserforschung der Hochschule Mittweida dar. Sie ist ebenfalls Bestandteil in vielen neu beantragten Projekten.

Neben der Hochrate-Mikrobearbeitung können die Anlagen auch für weitere Forschungsschwerpunkte nach Projektende genutzt werden. Für die Materialbearbeitung im Makrobereich ist der angeschaffte Monomode-Hochleistungsfaserlaser bestens geeignet, z.B. zum Remote-Schweißen und Remote-Schneiden. Da der Laser die bestmögliche Strahlqualität besitzt, kann mit ihm der Extremwert eines Verfahrens ermittelt werden. Eine künstliche Verschlechterung der Strahlqualität durch Einkopplung in einen größeren Faserdurchmesser ist jederzeit möglich.

Insgesamt haben die technische Ausstattung des Projektes und die Entwicklung neuer Technologien die Position des Laserinstitutes der Hochschule Mittweida zur Neueinwerbung von Projekten im Laserbereich bereits wesentlich verbessert. Zur Herausbildung eines signifikanten Technologie- und Wirtschaftsprofils in Richtung Hochtechnologie Lasertechnik hat das Projekt ebenfalls einen wesentlichen Beitrag geliefert. Das geplante Rapid Microtooling Zentrum wird die neuen Technologien überregional bekannt machen und somit zu einer sehr guten weitreichenden Verwertung beitragen.

Die im neuen Forschungsbau umzusetzende Forschungsprogrammatische greift die beiden Projektaspekte Rapid und Mikro mit den zu entwickelnden Forschungsfeldern Hochratelaserbearbeitung und Lasernano-/mikrobearbeitung unmittelbar auf. Das Nachwuchsforscherprojekt hat somit eine elementare Grundlage für die zukünftige Ausrichtung der Laserforschung am Laserinstitut der Hochschule Mittweida gelegt. Der neue Forschungsbau wird zu einer nachhaltigen Nutzung aller im Projekt angeschafften Technik und aller im Projekt entwickelten Verfahren beitragen.

10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Da es sich um ein sehr komplexes Forschungsvorhaben mit mehreren technologischen Ausrichtungen handelte, konnten die Fortschritte bei anderen Stellen nur schwerpunktmäßig betrachtet werden.

Lasermikrosintern

Hier waren keine parallelen Forschungsvorhaben an anderen Stellen bekannt.

3D Lasermikroschneiden

Am Fraunhofer Institut ILT in Aachen wurde in der Projektlaufzeit parallel ein alternatives Verfahren zur Erzeugung von 3D Mikrokörpern aus Glas und Saphir entwickelt. Dazu wurde das Material im Inneren selektiv mit ultrakurzen Pulsen bestrahlt. Die bestrahlten Stellen wiesen in einem späteren Ätzprozess eine höhere Ätzrate auf, so dass dadurch 3D Mikrokörper hergestellt werden konnten (Hörstmann-Jungemann, M., Gottmann, J., Keggenhoff, M.: 3D-Microstructuring of sapphire using fs-laser irradiation and selective etching, J. Laser Micro/Nanoeng. 5, 2010, 145-149). Der Bestrahlungsprozess ist kürzer als beim 3D Lasermikroschneiden, dafür wird aber ein zusätzlicher Ätzprozess benötigt. Die Materialauswahl ist bei dem Konkurrenz-Verfahren eingeschränkt. Insbesondere für Keramik und Kunststoff ist es nicht anwendbar.

Micro Cladding

Die Miniaturisierung des Pulverauftragschweißverfahrens mit dem Laser, auch Micro Cladding genannt, wurde in den letzten Jahren von mehreren Forschungseinrichtungen weltweit vorangetrieben.

Am Fraunhofer ILT in Aachen ist es 2007 gelungen, eine 90 µm breite und 900 µm hohe Einzelspur aus Stellite zu erzeugen (T. Jambor, K. Wissenbach: Micro-Laser-Cladding with high quality fibre lasers, Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, June 2007, pp. 193-197). Das Fraunhofer IWS in Dresden stellte 2010 erste Ergebnisse zum Micro Cladding vor (F. Brückner, S. Nowotny, M. Riede, D. Lepski, E. Beyer: Generation of high-precision metallic 3D structures with brilliant lasers - Herstellung hochpräziser metallischer 3D-Strukturen durch Auftragschweißen mit brillanten Strahlquellen, International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC), Dresden, Oktober 2010). Die Ergebnisse wurden mit einer selbst entwickelten Anlage erzielt. International trat 2007 die Firma LaserResearch mit einer Micro Cladding Maschine in Erscheinung (<http://www.laserresearch.com/pdf/LaserMicro.pdf>; nicht mehr verfügbar). Die Anlage diente zur Herstellung oder Reparatur gedruckter Platinen, ICs oder anderer Schaltelemente. Seit 2007 arbeitet eine chinesische Gruppe intensiv an der Entwicklung des Verfahrens (H. Li, X. Zeng: Study on the structure and properties of thick-film capacitors fabricated by laser micro-cladding and rapid prototype, Journal of Materials, Processing Technology 184 (2007) 184–189). Im Mittelpunkt stehen Anwendungen für Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik. Umfassend erforscht wird das Verfahren auch in Spanien, dort arbeiten mindestens zwei Gruppen daran (F. Lusquiños, R. Comesaña, A. Riveiro, F. Quintero, J. Pou: Fibre-laser micro-cladding of Co-based alloys on stainless steel, Surface & Coatings Technology 203 (2009) 1933–1940 / P. Romeroa, N. Oteroa, A. González, G. García, A. Scanob: Additive Generation of Surface Microstructures for Fluid-Dynamic Applications by using Single-Mode Fibre Laser Assisted Microcladding, Physics Procedia 12 (2011) 268–277).

Allen bisher publizierten Verfahrensvarianten ist gemein, dass ausschließlich cw-Laser und eine Ablenkgeschwindigkeit bis maximal 60 m/min verwendet wurden. Die am Laserinstitut der Hochschule Mittweida entwickelte Verfahrensvariante mit einem gepulsten Laser und schneller Strahlableitung durch einen Scanner ist nach wie vor einmalig. Sie ist durch das gepulste Regime und der dadurch bedingten kurzen Einwirkzeit in Pulsfrequenz, Laserleistung und Scangeschwindigkeit weiter skalierbar und auch auf ultraschnelle Strahlableitung mit cw-Laser übertragbar.

Lasermikrostrukturieren

Ultrakurzpuls

Kurz nach Projektbeginn erfuhr die Lasermikrobearbeitung mit hochrepetierenden ultrakurzen Pulsen einen enormen Aufschwung. Als Grund kann die Entwicklung von leistungsstarken Laserquellen im ps - Zeitbereich angesehen werden (Fa. Lumera). Anfängliche qualitative Probleme bei der Mikrostrukturierung (nicht unterdrückbare Bildung von Mikroforma-

tionen) konnten durch ein sogenanntes Burst-Regime, bei dem die Pulse hochfrequent (50–100 MHz) abgestrahlt und in Bündeln von 2-10 Pulsen mit zwischenliegenden Pausen zusammengefasst wurden, überwunden werden. Pioniere auf dem Gebiet waren wiederum Gruppen vom Fraunhofer Institut ILT in Aachen und von der Uni in Bern (C.A. Hartmann, T. Fehr, M. Brajdic and A. Gillner: Investigation on Laser Micro Ablation of Steel Using Short and Ultrashort IR Multipulses, JLMN-Journal of Laser Micro/ Nanoengineering, 2 1 (2007)/ B. Neuenschwander, G. Bucher, G. Hennig, Ch. Nussbaum, B. Joss, M. Murali, S. Zehnder, U. Hunziker, P. Schuetz: Processing of dielectric materials and metals with ps-laserpulses, 2010 ICALEO Conf. Proc. M101). Eine Industrialisierung in der Druckindustrie und im Werkzeugbau hat schon eingesetzt (Fa. Schepers GmbH, Fa. Daetwyler Graphics AG, Fa. Sauer GmbH). Hinsichtlich der wissenschaftlichen Durchdringung bestehen noch Lücken, vor allem der wissenschaftliche Vergleich von ps- und fs-Laserbearbeitung steht aus.

Auf dem Gebiet der Mikrostrukturierung mit hochrepetierender fs-Laserbearbeitung war die Nachwuchsforschergruppe stets weltweit präsent und gehörte zu den wissenschaftlichen Vorreitern.

Monomode-Hochleistungsfaserlaser

Mit der Anschaffung des Monomode-Hochleistungsfaserlasers bei uns begannen auch andere Gruppen mit Untersuchungen zum Abtrag- oder Remote-Schneiden mit solchen Quellen, insbesondere am Fraunhofer IWS Dresden und an der TU München (Lütke, M; Himmer, T.; Morgenthal, L.: Remote-Cutting – Material Processing with High Brightness Lasers, 4th International Workshop on Fiber Lasers, November 5-6, 2008, Dresden, Germany / Zaeh, M.F.; Moesl, J.; Musiol, J.; Oefele, F.: Material Processing with Remote Technology - Revolution or Evolution?, Physics Procedia 5, (2010), pp. 19–33).

Einmalig blieb aber die Konzentration auf die Mikrostrukturierung und die ultraschnelle Ablenkung. Untersuchungen mit Scangeschwindigkeiten über 10.000 m/min mit einer Fokusgröße von 21 μm sind uns zu Projektende von keiner anderen Gruppe weltweit bekannt.

Oberflächenbearbeitung mit Laserplasma

Parallele Forschungsvorhaben mit cw-Laserstrahlung waren nicht bekannt.

11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

1. A. Streek, P. Regenfuß, F. Ullmann, L. Hartwig, R. Ebert, H. Exner: Processing of Silicon carbide by Laser Micro Sintering, Proceedings of the 17. solid freeform fabrication symposium; 14.-17.08.06; Austin (Texas/USA); pp. 349-358.
2. A. Streek, P. Regenfuß, F. Ullmann, L. Hartwig, R. Ebert, H. Exner: Direct Laser Sintering of Siliconcarbide - Material Specific Behaviour, Poster and Oral Presentation, Junior Euromat 2006; 4.-7.09.06; Lausanne (Schweiz).
3. A. Streek, P. Regenfuß, F. Ullmann, L. Hartwig, R. Ebert, H. Exner: Lasermikrosintern von SiSiC und SiC Keramik, 18. internationalen Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, 09.-11.11.2006, Tagungsgruppe Lasertechnik, S. 57-65.
4. P. Regenfuß, R. Ebert, H. Exner: Laser Micro Sintering a Versatile Instrument for the Generation of Microparts, Laser Technik Journal 1/2007, S. 26-31.
5. J. Schille, R. Ebert, P. Regenfuß, H. Exner: Einfluss der Pulslänge bei der abtragenden Laserbearbeitung von Metallen, 8. Nachwuchswissenschaftler-Konferenz, Jena, Januar 2007, S.71-76.
6. R. Ebert, U. Löschner, A. Streek, J. Schille, T. Süß, L. Hartwig, S. Klötzer, H. Exner: Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren, Lasermagazin 2/2007, S.26-27.
7. A. Streek: Lasermikrosintern von Keramik, Workshop Glas und Keramikbearbeitung mit dem Laser 09.05.2007 Erlangen, Workshopunterlagen.
8. Regenfuss, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, Th.; Horn, M.; Ullmann F., Ebert, R.; Exner, H.: The Performance of Laser Micro Sintering with Different Material Classes. In: Proceedings of the 31st Rapid Prototyping Symposium, June 27-29. 2007, Tokyo, Japan, 31-38.
9. A. Streek, P. Regenfuß, T. Süß, R. Ebert, H. Exner: Laser micro sintering of Silica with an Nd:YAG Laser, Proceedings FLAMN-07 "Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies" St. Petersburg (Russia), in Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies (ISBN: 9780819471833), Vadim P. Veiko, Editors, 69850Q (Jan. 15, 2008).
10. Regenfuss, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, Th.; Horn, M.; Ullmann F., Ebert, R.; Exner, H.: Material depending mechanisms in laser micro sintering. In: Geiger, M; Otto, A., Schmidt M. (Eds.): Proceedings of the 5th LANE 2007, Sept. 22.-28. 2007, Erlangen, Germany, Meisenbach-Verlag, 403-418.
11. H. Exner, M. Horn, A. Streek, P. Regenfuß, F. Ullmann, R. Ebert: Laser micro sintering – a new method to generate metal and ceramic parts of high resolution with sub-

- micrometer powder, Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria (Portugal), 2007, 491-499.
12. Regenfuss, P. ; Streek, A. ; Ullmann, F. ; Hartwig, L. ; Ebert, R. ; Kühn, C. ; Horn, M. ; Exner, H.: Laser Micro Sintering of Ceramic Materials, Part 1; Interceram 56 (2007) [6] 420-422, High-Performance Ceramics.
 13. P. Regenfuss, A. Streek, F. Ullmann, L. Hartwig, M. Horn, C. Kühn, R. Ebert, H. Exner: Lasermikrosintern von keramischen Materialien - Mechanismen und Resultate, R. Claasen, M. Herrmann, A. Roosen (Hrsg): Fortschrittberichte der DKG, Verfahrenstechnik, cfi-Beihefte ISSN 0173-9913, 21 (1) (2007), SS 151-160.
 14. R. Ebert, U. Löschner, A. Streek, J. Schille, T. Süß, L. Hartwig, S. Klötzer, H. Exner: Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren – anlagentechnische Realisierung, Lasermagazin 5/6 2007, S.22-23.
 15. P. Regenfuß, A. Streek, F. Ullmann, L. Hartwig, R. Ebert, C. Kühn, M. Horn, H. Exner: Laser Micro Sintering of Ceramic Materials, Part 2, Interceram 57 (2008) [1] 6-9, High-Performance Ceramics.
 16. H. Exner, U. Löschner, J. Schille, R. Ebert: Lasermikrobearbeitung mit hochrepetierender fs-Laserstrahlung, 72. Frühjahrstagung DPG, Darmstadt, 2008, Symposium Lasermaterialbearbeitung, Abtragen und Strahlführung, Hauptvortrag SYLM 3.3.
 17. J. Schille, R. Ebert, U. Löschner, P. Regenfuß, T. Süß, H. Exner: Micro structuring with highly repetitive ultra short laser pulses, Proceedings of LPM2008 - the 9th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 16.-20.6.2008, Quebec, Canada.
 18. R. Ebert, A. Streek, P. Regenfuß, H. Exner: Selektives Lasersintern keramischer Mikroteile, Mikroproduktion 04/08, S. 36 - 39.
 19. A. Streek, P. Regenfuß, R. Ebert, H. Exner: Laser micro sintering – a quality leap through improvement of powder packing, D. L. Bourell et al. (Eds): The Proceedings of the 19th Annual SFF Symposium, 4.-6-8.2008, Austin (TX), USA, pp. 297-308.
 20. Robby Ebert, Horst Exner: Selektives Lasersintern - präzise Bauteile schnell generiert - ein Überblick, Laser Technik Journal, 4, September 2008, S. 51-53.
 21. U. Löschner, J. Schille, L. Schneider, S. Mauersberger, R. Ebert, H. Exner: Materialbearbeitung mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen, Lasermagazin 4/08, S. 20-21.
 22. R. Ebert, L. Hartwig, S. Weinhold, S. Klötzer, A. Gruner, J. Drechsel, H. Exner: Erste Ergebnisse zum Schweißen mit 3kW Monomode-Faserlaser, Lasermagazin 5/2008, S. 30-31.
 23. P. Regenfuß, A. Streek, L. Hartwig, M. Horn, S. Klötzer, R. Ebert, H. Exner: Freeform fabrication of dental inlays by laser micro-sintering, The laser user magazine, issue 052 - autumn 2008.

24. U. Löschner, S. Mauersberger, R. Ebert, H. Exner, J. Schille, P. Regenfuß, L. Hartwig: Micromachining of glass with short ns-pulses and highly repetitive fs-Laser pulses, Proceedings of the ICALEO 2008, 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 20.-23.10.2008, Temecula, USA, pp. 193-201.
25. R. Ebert, U. Löschner, A. Streek, J. Schille, T. Süß, L. Hartwig, U. Klötzer, H. Exner: Rapid Microtooling with laser based methods, Proceedings of ISL 2008 - 2nd International Symposium on Laser-Micromachining at 3D-Micromac in Chemnitz, Germany.
26. J. Schille, R. Ebert, U. Löschner, L. Schneider, H. Exner: Material processing with highly repetitive femtosecond laser pulses, Proceedings of ISL 2008 - 2nd International Symposium on Laser-Micromachining at 3D-Micromac in Chemnitz, Germany.
27. P. Regenfuß, A. Streek, F. Ullmann, L. Hartwig, M. Horn, C. Kühn, R. Ebert, H. Exner: Laser Microsintering - Reaction Models and Results, cfi/Berichte DKG (2008) 85 No. 13, pp. 65-72.
28. A. Streek: Lasermikrosintern – Qualitätssteigerung durch Verbesserung der Pulverpackung, Euromold Werkstoffforum, Euromold 2008; Werkstoffe für Rapid Prototyping S. 14.
29. T. Süß: Materialanalyse an ausgewählten, thermisch nachbehandelten, lasergenerierten Festkörpern, Euromold Werkstoffforum, Euromold 2008; Werkstoffe für Rapid Prototyping S. 14.
30. S. Klötzer, M. Eler, M. Heinrich, L. Hartwig, R. Ebert, B. Steiger, H. Exner: Micro Cladding mit gepulstem Faserlaser, Lasermagazin 1/2009, S.28/29.
31. R. Ebert, L. Hartwig, T. Hagemann, F. Peuckert, S. Klötzer, J. Schille, S. Wischmann, H. Exner: High rate ablation with 3 kW single mode fibre laser, Proceedings of the 5. Int. WLT-Conference on Laser in Manufacturing, June 2009, Munich, Germany, pp.565-570.
32. T. Süß, A. Streek, F. Ullmann, M. Horn, R. Ebert, H. Exner: Material analysis at selected, furnace treated, laser-generated solids, Proceedings of the 5. Int. WLT-Conference on Laser in Manufacturing, June 2009, Munich, Germany, pp. 489-494.
33. J. Schille, R. Ebert, H. Exner, U. Löschner, L. Schneider, N. Walther, P. Scully, N. Goddard: 3D micro machining with a high repetition rate ultra short fibre laser, Proceedings of the 5. Int. WLT-Conference on Laser in Manufacturing, June 2009, Munich, Germany, pp.549-554.
34. U. Löschner, S. Mauersberger, J. Schille, R. Ebert, H. Exner: Machining of transparent materials with short pulse and ultrashort pulse laser sources, Proceedings of the 5. Int. WLT-Conference on Laser in Manufacturing, June 2009, Munich, Germany, pp.659-665.

35. A. Streek, P. Regenfuß, R. Ebert, H. Exner, J. Schille: Laser-micro-sintering, Proceedings of the LAMP2009- the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 29 June – July 2, Kobe, Japan, #ThOL 1-8, (#171).
36. J. Schille, R. Ebert, U. Löschner, L. Schneider, N. Walther, P. Regenfuß, P. Scully, N. Goddard, H. Exner: An ultrafast femtosecond fibre laser as a new tool in Rapid Microtooling, Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 29 June – July 2, Kobe, Japan, ThOL 1-3(#151).
37. S. Liang, J. Schille, P. Scully, J. Vaughan, M. Benyazzar, D. Liu, W. Perrie: Feasibility of 3D refractive index structures written by femtosecond laser in polymethyl methacrylate, Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, June 29 – July 2, Kobe, Japan, TuPL-21(#131).
38. L. Hartwig, R. Ebert, S. Klötzer, S. Weinhold, J. Drechsel, F. Peuckert, J. Schille, H. Exner: Material processing with a 3kW single mode fibre laser, Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, June 29 – July 2, Kobe, Japan, TuPH-3(#153).
39. U. Löschner, J. Schille, S. Mauersberger, R. Ebert, H. Exner: Defect Generation in Transparent Material with Ultrashort Laser Pulses, Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, June 29 – July 2, Kobe, Japan, WePL-17(#31).
40. R. Ebert, L. Hartwig, S. Klötzer, F. Peuckert, J. Schille, H. Exner: Hochleistungs-Abtragschneiden mit cw Single-Mode-Faserlaser, Lasermagazin 4/2009, S.34/35.
41. M. Erler, S. Klötzer, M. Heinrich, L. Hartwig, R. Ebert, B. Steiger, H. Exner: Untersuchungen zum Mikropulverauftragschweißen mittels gepulster Faserlaserstrahlung, 8. WTK TU Chemnitz, Oberflächen- und Wärmebehandlungs-technik, Tagungsband 035, Oktober 2009, S. 222-228.
42. S. Klötzer, M. Erler, L. Hartwig, R. Ebert, B. Steiger, H. Exner: Micro-Cladding mit gepulstem Faserlaser, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 33-36.
43. A. Streek, M. Müller, T. Süß, R. Ebert, L. Hartwig, S. Klötzer, P. Regenfuß, H. Exner: Lasermikrosintern – Stand und Perspektiven, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 37-43.
44. U. Löschner, S. Mauersberger, J. Schille, R. Ebert, H. Exner: Innenbearbeitung transparenter Materialien mit kurzen und ultrakurzen Pulsen, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 44-49.
45. J. Schille, L. Schneider, U. Löschner, R. Ebert, H. Exner: Mikrobearbeitung mit hochrepetierender Ultrakurzpuls-Laserstrahlung, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 50-56.

46. L. Hartwig, R. Ebert, F. Peuckert, S. Klötzer, A. Streek, J. Schille, U. Löschner, H. Exner: Hochleistungs-Lasermikrobearbeitung mit brillanter cw-Laserstrahlung, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 57-64.
47. A. Streek, K. Kujawa, L. Hartwig, S. Klötzer, J. Schille, U. Löschner, R. Ebert, B. Steiger, H. Exner: Visualisierung von Laser-Material-Wechselwirkungsprozessen, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 65-71.
48. B. Steiger, V. Neumann, S. Klötzer, A. Fischer: Methoden zur Berechnung der Strahlpropagation, 20th International Scientific Conference Mittweida, Oktober 28-29, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 120-122.
49. S. Liang, P. Scully, J. Schille, J. Vaughan, W. Perrie: Femtosecond laser induced refractive index structures in polymer optical fibre (POF) for sensing, Conference paper, OFS20 - 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, October 2009, Edinburgh, UK.
50. A. Streek, P. Regenfuß, R. Ebert, H. Exner: Laser Micro Sintering – Upgrade of the Technologie, November 2-5, Proceeding of the 29th ICALEO, Orlando, USA. S. 152.
51. J. Schille, U. Löschner, L. Schneider, R. Ebert, H. Exner: Mikrobearbeitung mit hochrepetierender Ultrakurzpuls-Laserstrahlung, Lasermagazin 5-6/2009, S.32/33.
52. Robby Ebert, Frank Ullmann, Lars Hartwig, Tino Suess, Sascha Kloetzer, Andre Streek, Joerg Schille, Peter Regenfuss, Horst Exner: Laser microsintering of tungsten in vacuum, Photonics West, LASE, 22 - 27 January 2010, San Francisco, CA, USA, Proceedings of the SPI Vol. 7589 – 50.
53. Joerg Schille, Robby Ebert, Udo Loeschner, Patricia Scully, Nicholas Goddard, Horst Exner: High repetition rate femto second laser processing of metals, Photonics West, LASE, 22 - 27 January 2010, San Francisco, CA, USA, Proceedings of the SPI Vol. 7589 – 39.
54. U. Loeschner; J. Schille; R. Ebert; H. Exner: Short pulse and ultrashort pulse laser machining inside transparent polymers, Proceedings of the 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) 2010, 07.-10.06.2010, Stuttgart, Germany.
55. J. Schille; R. Ebert; L. Hartwig; U. Loeschner; P. Scully; N. Goddard; H. Exner: Rapid micro processing of metals with a high repetition rate femto second fibre laser, Proceedings of the 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) 2010, 07.-10.06.2010, Stuttgart, Germany.
56. R. Ebert; F. Ullmann; D. Hildebrandt; J. Schille; L. Hartwig; S. Kloetzer; A. Streek; H. Exner: Laser Processing of Tungsten Powder with Femtosecond Laser Radiation, Pro-

ceedings of the 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) 2010, 07.-10.06.2010, Stuttgart, Germany.

57. H. Exner; L. Hartwig; R. Ebert; S. Kloetzer; A. Streek; J. Schille, U. Loeschner: High rate laser micro processing using high brilliant cw laser radiation, Proceedings of the 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) 2010, 07.-10.06.2010, Stuttgart, Germany.
58. S. Kloetzer; M. Erler; L. Hartwig; R. Ebert; B. Steiger; H. Exner: Micro-cladding using a pulsed fibre laser and scanner, Proceedings of the 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM) 2010, 07.-10.06.2010, Stuttgart, Germany.
59. J. Schille, U. Loeschner, R. Ebert, P. Scully, N. Goddard, H. Exner: Laser micro processing using a high repetition rate femto second laser; Proceedings of ICALEO - 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Anaheim, Ca. (USA), 2010, p. 1491-1499.
60. U. Löschner, J. Schille, R. Ebert, H. Exner: Laser processing inside transparent materials: dependence on pulse length and wavelength, published in Photonics West, MEMS & MOEMS, 22 - 27 January 2011, San Francisco, CA, USA, 22 - 27 January 2011, Proceedings of the SPIE Vol. 7726 - 5.
61. R. Ebert, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek, U. Löschner, J. Schille, F. Ullmann, H. Exner: Hochrate-Laserbearbeitung mit schnellen und ultraschnellen Scannern, Lasermagazin 1/2011, S.34/35.
62. S. Klötzer, A. Streek, L. Hartwig, R. Ebert, H. Exner: Schnelle und ultraschnelle Ansteuerung von Laser und Scanner für die Hochrate-Laserbearbeitung, Laser Magazin 2/2011, S.33.
63. U. Löschner, J. Schille, R. Ebert, H. Exner: Laser processing inside polymers, Industrial Laser Solutions, May/June 2011, 9-11.
64. J. Schille, L. Schneider, U. Loeschner, R. Ebert, P. Scully, N. Goddard, B. Steiger, H. Exner: Micro processing of metals using a high repetition rate femto second laser: from laser process parameter study to machining examples, Paper #M102, 24. Oct. 2011 LMF Session 1: Drilling & Micromachining, Orlando FL, USA

Durch Peer-Review Prozess redigierte Veröffentlichungen, erscheinen im Journal of Laser Micro/Nano Engineering (JLMN):

65. R. Ebert, F. Ullmann, D. Hildebrandt, J. Schille, L. Hartwig, S. Kloetzer, A. Streek,: Laser Processing of Tungsten Powder with Femtosecond Laser Radiation
66. H. Exner, L. Hartwig, R. Ebert, S. Kloetzer, A. Streek, J. Schille, U. Loeschner: High speed laser micro processing using high brilliant continuous wave laser radiation

Schutzrechtsanmeldungen:

1. R. Ebert, H. Exner, P. Regenfuß, J. Schille: Verfahren und Einrichtung zur schnellen integralen und berührungslosen Messung der Rauigkeit, Priorität 20.10.2007, 10 2007 050 557.6,
2. R. Ebert, H. Exner, P. Regenfuß, J. Schille: Einrichtung zur schnellen integralen und berührungslosen Messung der Rauigkeit, GM 20 2007 014 773.2, Eintragung 7.2.2008,
3. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek: Vorrichtung zum Rakeln mit einer in sich geschlossenen Rakel, GM 20 2007 016 591.9, Eintragung 7.2.2008,
4. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek, J. Drechsel, U. Löschner, J. Schille, T. Süß: Einrichtung zur Hochleistungs-Mikrobearbeitung eines Körpers oder einer Pulverschicht mit einem Laser hoher Brillanz, GM 20 2007 016 590.0, Eintragung 7.2.2008,
5. R. Ebert, H. Exner, A. Streek: Einrichtung zur Herstellung von Gegenständen aus Pulverpartikeln zur sicheren Handhabung einer Menge von Pulverpartikeln, GM 20 2008 005 417.6, Eintragung 3.7.2008,
6. R. Ebert, H. Exner: Einrichtung zur automatischen Herstellung dentaler Körper aus Keramik mit einem Laser, GM 20 2008 005 418.4, Eintragung 3.7.2008,
7. R. Ebert, H. Exner, U. Löschner, J. Schille: Einrichtung zur Erzeugung von mikrostrukturierten Funktionsoberflächen auf Substraten mit wenigstens einem Laser, Priorität 23.5.2008, 10 2008 025 354.5,
8. R. Ebert, H. Exner, U. Löschner, J. Schille: Einrichtung zur Erzeugung von mikrostrukturierten Funktionsoberflächen auf Substraten mit wenigstens einem Laser, GM 20 2008 007 122.4, Eintragung 31.7.2008,
9. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer: Einrichtung zum Aufbringen von Schichtstrukturen auf wenigstens ein Substrat mittels Laserauftragschweißen, Priorität 8.10.2008, 10 2008 051 460.8,
10. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer: Einrichtung zum Aufbringen von Schichtstrukturen auf wenigstens ein Substrat mittels Laserauftragschweißen, GM 20 2008 013 569.9, Eintragung 24.12.2008,
11. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek: Einrichtung zur unmittelbaren Messung bei schichtweiser Bearbeitung von Körpern mittels Laserstrahlung eines Lasers, Priorität 8.10.2008, 10 2008 051 459.4,
12. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek: Einrichtung zur unmittelbaren Messung bei schichtweiser Bearbeitung von Körpern mittels Laserstrahlung eines Lasers, GM 20 2008 013 568.0, Eintragung 24.12.2008,
13. L. Hartwig, R. Ebert, H. Exner: Einrichtung und Verwendung von brillanter Laserstrahlung zum Schweißen, zum Verglasen oder sowohl zum Schweißen als auch zum Ver-

glasen von Werkstücken aus sprödharten oder anderen heißrissempfindlichen Materialien, Anmeldenr. 102009051336.1, Priorität 27.10.2009,

14. H. Exner, P. Regenfuß, A. Streek: Einrichtung zum Auftrag von Pulver für additive Fertigungsverfahren, Anmeldenr. 102011014610.5, Priorität 19.03.2011

15. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek: Einrichtung zur Hochgeschwindigkeits-Lasermaterialbearbeitung, Anmeldenr. 102011102082.2, Priorität 19.05.2011

Erteilte Patente:

1. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek: Vorrichtung zum Rakeln mit einer in sich geschlossenen Rakel, Priorität 24.11.2007, DE 10 2007 057 130.
2. R. Ebert, H. Exner, L. Hartwig, S. Klötzer, A. Streek, J. Drechsel, U. Löschner, J. Schille, T. Süß: Verfahren und Einrichtung zur Hochleistungs-Mikrobearbeitung eines Körpers oder einer Pulverschicht mit einem Laser hoher Brillanz, Priorität 24.11.2007, DE 10 2007 057 129.
3. R. Ebert, H. Exner, A. Streek: Verfahren zur sicheren Handhabung einer Menge von Pulverpartikeln und Einrichtung zur Herstellung von Gegenständen aus Pulverpartikeln zur sicheren Handhabung einer Menge von Pulverpartikeln, Priorität 17.04.2008, DE 10 2008 019 693.
4. R. Ebert, H. Exner: Verfahren und Einrichtung zur automatischen Herstellung dentaler Körper aus Keramik mit einem Laser, Priorität 17.04.2008, DE 10 2008 019 694.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN keine	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Ebert, Robby; Löschner, Udo; Streek, Andre; Schille, Jörg; Hartwig, Lars; Klötzer, Sascha; Ullmann, Frank ; Süß, Tino; Exner, Horst	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03. 2011
	6. Veröffentlichungsdatum 16.12. 2011
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences Technikumplatz 17 09648 Mittweida	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 03IP505
	11. Seitenzahl 216
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 99
	14. Tabellen 10
	15. Abbildungen 227
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Geschäftsbereich TRI, Forschungszentrum Jülich GmbH, Zimmerstr. 26-27, Herrn Dr. Reimann, 10969 Berlin, 16.12.2011	
18. Kurzfassung Mit den Rapid Microtooling –Technologien: Lasermikrosintern, 3D Lasermikroschneiden, Micro Cladding und Lasermikrostrukturieren mit hochrepetierenden fs-Laser sowie mit Hochleistungs-Monomodefaserlaser konnten neuartige Technologien zur schnellen Erzeugung von Mikroteilen und Mikrostrukturen umfassend untersucht und entwickelt werden. Herausragende Ergebnisse waren: Generierung einer Mikroturbine mit Lasermikrosintern, direktes 3D Schneiden einer Mikro-Kugel aus PMMA, schnelles Erzeugen von Mikrowänden mit Micro Cladding, schnelles Erzeugen von hochpräzisen Mikrostrukturen mit fs-Laser und ultraschnelle Mikrostrukturierung mit Hochleistungsfaserlaser und Polygonspiegelscanner. Daneben wurde auch die Programmkriterien: Beiträge zur Herausbildung eines Technologie- und Wirtschaftsprofils für die Region / Abstimmung der FuE - Aufgaben mit den kooperierenden Unternehmen / Personalqualifizierung für die Unternehmen / Qualifizierung der Mitglieder der Nachwuchsforschergruppe und Technologieorientierte Aus- und Neugründungen umfassend bearbeitet und erfüllt. Herausragend war hier die Etablierung der Hochrate-Laserbearbeitung als neuen technologischen Schwerpunkt am Laserinstitut und als eine Säule für einen Institutsneubau. Für die kooperierenden Unternehmen wurden 9 Weiterbildungsveranstaltungen durchgeführt. Die Mitglieder der Nachwuchsforschergruppe qualifizierten sich durch Auslandsaufenthalte, Kongress- und Workshopteilnahmen umfassend. Die Ausgründung der LIM Laserinstitut Mittelsachsen GmbH wurde von der Nachwuchsforschergruppe aktiv begleitet. Durch die Innoprofile-Nachwuchsforschergruppe wurde die Zusammenarbeit zwischen dem Laserinstitut der Hochschule Mittweida und regionalen Firmen und Instituten stark intensiviert. Zu Projektende waren 10 Kooperationspartner aktiv involviert. Zusammenfassend konnten sowohl die technologischen Zielstellungen als auch die Programmkriterien weitgehend erfüllt werden.	
19. Schlagwörter Innoprofile, Rapid, Mikro, Laser, fs, Ultrakurzpuls, Monomode, Hochleistung, Sintern, Schneiden, Schweißen, Abtragen	
20. Verlag keiner	21. Preis kostenfrei

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN none	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Rapid Microtooling mit laserbasierten Verfahren	
4. author(s) (family name, first name(s)) Ebert, Robby; Löschner, Udo; Streek, Andre; Schille, Jörg; Hartwig, Lars; Klötzer, Sascha; Ullmann, Frank ; Süß, Tino; Exner, Horst	5. end of project 31.03. 2011
	6. publication date 16.12. 2011
	7. form of publication -
8. performing organization(s) (name, address) Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences Technikumplatz 17 09648 Mittweida	9. originator's report no. -
	10. reference no. 03IP505
	11. no. of pages 216
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 99
	14. no. of tables 10
	15. no. of figures 227
16. supplementary notes none	
17. presented at (title, place, date) Projekträger Jülich, Geschäftsbereich TRI, Forschungszentrum Jülich GmbH, Zimmerstr. 26-27, Herrn Dr. Reimann, 10969 Berlin, 16.12.2011	
18. abstract The project <i>Rapid Micro tooling with laser based methods</i> investigated and developed the innovative laser machining technologies Laser Micro Sintering, 3D Laser Micro Cutting, Micro Cladding and Laser Micro Structuring using a high repetition rate femto second laser as well as a high power single mode cw fibre laser. Outstanding results were achieved, such as generation of a laser micro sintered micro turbine, three-dimensional direct laser cutting of a sphere in PMMA bulk material, the fast build of micro walls by using laser micro cladding technology, rapid fabrication of highly precise micro structures in high repetition rate ultra short pulse laser processing as well as the application in high speed laser micro machining by using a high power cw fibre laser in combination with a polygon scanner. Furthermore, during the project the following non-technical program criteria were handled and successfully fulfilled: contributions to develop a regional technology and economic profile, coordination of the R&D activities with the co-operating companies, personnel training for employees of the co-operating companies, training measures of the junior research group members and starting of both technology-orientated spin-off and start-up companies. It is especially noteworthy that the high-rate laser technology has been established as a new focal point of research at the institute and was an important key pillar to apply for the new laser institute building. The employees of the co-operating companies were qualified in nine training seminars. The members of the junior research group attended several personnel qualification measures, such as workshops, international scientific congresses and international internships. Further the junior research group participated actively in the outsourcing of the LIM Laserinstitut Mittelsachsen GmbH. The project strengthens the cooperation between the Laserinstitut der Hochschule Mittweida and regional companies and institutes. At the end ten separate cooperation partners were actively involved within the project. All in all, both the technical objectives and non-technical program criteria of the project were largely fulfilled.	
19. keywords Innoprofile, rapid, micro, laser, fs, ultra short pulse, single mode, high power, sintering, cutting, welding, ablating	
20. publisher none	21. price Free of charge