



## Oberflächenfunktionalisierung des Werkstoffs 1.2379+ mittels Randschichtumschmelzen mit Laserstrahlung zur Entwicklung von angepassten Oberflächentopographien für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium

André Temmler<sup>\*1</sup>, Ingo Roß<sup>2</sup>, M. Cortina<sup>1</sup> und Reinhart Poprawe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT), RWTH Aachen University, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland

### Abstract

In Prozessen der Kaltmassivumformung wird ein direkter Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück und damit einhergehend das Auftreten von Kaltverschweißungen, durch den Einsatz von Schmierstoffen verhindert. Die aktuellen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Trockenumformung zielen auf eine Realisierung von Kaltumformprozessen ohne den Einsatz von Schmierstoffen. Stattdessen sollen Werkzeuge durch eine Oberflächenbehandlung und Beschichtung vor adhäsivem Verschleiß bewahrt werden. In dieser Arbeit wird eine Oberflächenfunktionalisierung des SPP-Referenzwerkstoffs 1.2379 mittels Randschichtumschmelzen mit Laserstrahlung zur Entwicklung von angepassten Oberflächentopographien für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium vorgestellt. Dabei werden erstmals die Verfahren Laserpolieren und Laserumschmelzstrukturieren anhand des pulvermetallurgisch erschmolzenen Kaltarbeitsstahl 1.2379+ untersucht. Dazu werden resultierende Oberflächentopographien mittels Weißlichtinterferometrie kontaktlos und hochauflösend vermessen. Darauf aufbauend erfolgen einerseits eine spektrale Analyse der Rauheit mittels phasenkorrektem Profilfilter und andererseits eine Analyse der erzielten Strukturhöhen mittels schneller Fourier Transformation. Abschließend erfolgt eine Beurteilung des Werkstoffes 1.2379+ in Bezug auf Laserpolierbarkeit und Eignung zur Laserumschmelzstrukturierung. Insgesamt wird die Ausgangsrauheit für den Werkstoff mittels Makrolaserpolieren signifikant gesenkt und der Glanzgrad mittels Mikropolieren signifikant gesteigert. Ebenso werden mittels Laserumschmelzstrukturieren reproduzierbare Strukturen erzeugt, wobei die erzielten Strukturhöhen, denen auf anderen Stahlwerkstoffen entsprechen.

**Keywords:** Polieren, Strukturieren, Laser, Laserpolieren, Kaltarbeitsstahl 1.2379+, Rauheit, Rauheitsspektrum, Laserumschmelzstrukturierung

### 1 Einleitung

Beim Voll-Vorwärts-Fließpressen treten hohe tribologische Belastungen der Werkzeuge, in Form von hohen Kontaktnormalspannungen und Oberflächenvergrößerungen auf. Vor allem bei der Verarbeitung von Aluminiumlegierungen besteht ein hohes Risiko für Verschleiß durch Adhäsion. Kaltverschweißungen können durch eine Trennung von Werkzeug- und Werkstückoberfläche mittels Schmierstoffen effektiv verhindert werden. Die unterschiedlichen Schmierungskonzepte [1] sind mit zusätzlichen Fertigungsschritten (z.B. Aufbringung des Schmierstoffs und Reinigung des Werkstücks nach der Umformung) und somit höheren Kosten verbunden und in vielen Fällen umweltgefährdend.

Die aktuellen Entwicklungen zielen zunehmend auf den Einsatz von ungefährlicheren Schmiermitteln, um diese Risiken zu verringern [2]. Bestandteil der Forschungsarbeiten im Bereich der Trockenumformung [3] ist eine konsequente Fortführung dieser Bestrebungen und ein kompletter Verzicht auf Schmierstoffe.

In dieser Arbeit wird eine Oberflächenfunktionalisierung des SPP-Referenzwerkstoffs 1.2379 mittels Randschichtumschmelzen mit Laserstrahlung zur Entwicklung von angepassten Oberflächentopographien für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium vorgestellt. Dabei werden erstmals die Verfahren Laserpolieren und Laserumschmelzstrukturieren anhand des pulvermetallurgisch erschmolzenen Kaltarbeitsstahl

1.2379+ untersucht. Dabei werden insbesondere Intensitätsverteilungen der Laserstrahlung verwendet, die in der Bearbeitungsebene eine quadratische Kontur aufweisen.

## 2 Oberflächenfunktionalisierung

### 2.1 Laserpolieren

Zur Verringerung des adhäsiven Verschleißverhaltens, stellt die Beeinflussung der Werkzeugrand-schicht durch Laserpolieren, eine grundlegende Lösungsstrategie dar. Das Laserpolieren ist ein 3D-fähiges, automatisierbares Polierverfahren von metallischen Werkstoffen und beruht auf dem Umschmelzen einer dünnen Rand-schicht mittels Laserstrahlung [4][5][6][7][8]. In der schmelzflüssigen Phase werden Rauheiten infolge der Grenzflächenspannung geglättet und der Werkstoff erstarrt mit einer geglätteten Oberfläche. Untersuchungen am LLT haben gezeigt, dass mit dem Makropolieren mittels kontinuierlicher (cw) Laserstrahlung die Rauheit im Ortswellenlängenbereich größer als ca. 40  $\mu\text{m}$  effektiv geglättet wird.

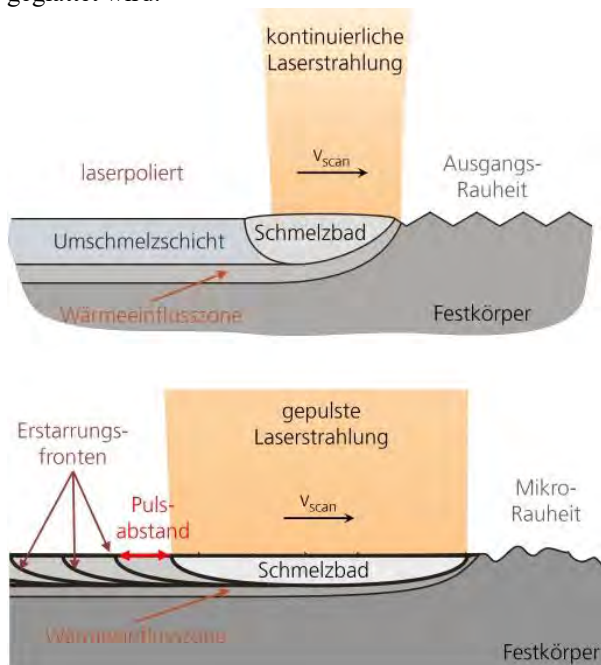


Abb. 1: Schematische Darstellung von Makro- (oben) [7] und Mikropolieren (unten) mittels Laserstrahlung [9]

Geschliffene Oberflächen weisen i.d.R. im Ortswellenlängenbereich größer als 40  $\mu\text{m}$  bereits eine so kleine Rauheit auf, dass durch Makropolieren die Rauheit nicht weiter verringert wird. Die Mikrorauheit mit Ortswellenlängen kleiner als 40  $\mu\text{m}$  kann allerdings durch Mikropolieren (Abb. 4 unten) mit gepulster Laserstrahlung nochmals signifikant reduziert werden [4][7][8][9]. Das Mikropolieren lässt dabei konventionelle Rauheitswerte wie den Mittenrauwert  $R_a$  nahezu unbeeinflusst. Allerdings resultiert die Reduzierung der Mikrorauheit in einem offensichtlich vielfach größeren Glanzgrad der mikropolierten Oberfläche.

### 2.2 Laserumschmelzstrukturierung

Ein innovatives Verfahren zur Erzeugung von Strukturen im Mikro- und Millimeterbereich auf metallischen Oberflächen bei gleichzeitiger Wärmebehandlung ist die

Laserumschmelzstrukturierung (LUST). Dieses Verfahren basiert auf einem Umschmelzprozess einer metallischen Oberflächenrand-schicht mit Laserstrahlung bei gleichzeitiger Modulation der Laserleistung, durch die das Schmelzbadvolumen periodisch variiert wird. Somit ist es möglich, eine metallische Oberfläche nicht durch Abtrag, sondern durch eine Umverteilung von Material in einem Schmelzprozess zu strukturieren. Bei Änderung der Laserleistung folgt die Erstarrung der gewölbten Schmelzbadoberfläche, so dass die Strukturierung durch Umverteilung von bereits vorhandenem Material erfolgt (Abb. 2). [10]

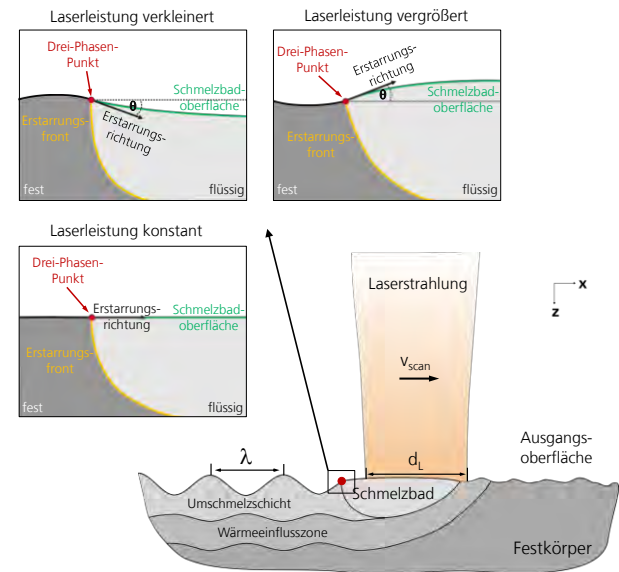


Abb. 2: Schematische Darstellung des Wirkprinzips der LUST [10]

Da die Struktur direkt aus der Schmelze erstarrt, weist sie zusätzlich eine kleine Rauheit auf (wie beim Makrolaserpolieren), die in der Regel keiner weiteren Nachbehandlung bedarf. Typische Strukturgrößen, die mittels LUST erzielt werden können, sind dabei laterale Wellenlängen von 0,125 mm bis 8 mm, bei einstellbaren Strukturhöhen von 1  $\mu\text{m}$  bis 1 mm. Das maximale Verhältnis von Wellenlänge zu Strukturhöhe beträgt dabei derzeit ca. 4:1, d.h. bei einer Wellenlänge von einem Millimeter wird derzeit eine maximale Strukturhöhe von ca. 250  $\mu\text{m}$  erzielt.

## 3 Experimenteller Aufbau

### 3.1 POLAR - Anlage

Als mechanische Basis für die POLAR-Anlage wird ein Fräsbearbeitungszentrum C600U von Hermle verwendet. Um genügend Platz für die Integration aller erforderlichen Komponenten zum Laserpolieren zu schaffen, wurde die Frässpindel aus dem Spindelkasten entfernt und stattdessen Teile des optischen Systems darin untergebracht. [11]

Als Laserstrahlquellen werden für die POLAR-Anlage zwei diodengepumpte Yb:YAG Scheibenlaser verwendet: ein TruDisk 1000 und ein TruMicro 7051 der Fa. Trumpf. Der TruDisk 1000 kann ausschließlich im kontinuierlichen Betrieb verwendet werden. Die maximale mittlere Laserleistung beträgt  $P_{L,max,TD} = 1000 \text{ W}$ .

Der TruMicro 7051 kann sowohl im kontinuierlichen Betrieb als auch in einem Q-Switch gesteuerten Pulsbetrieb verwendet werden. Die maximale mittlere Laserleistung die durch die Laserstrahlquelle emittiert werden kann, beträgt ca.  $P_{L,max,TM} = 550$  W. Die realisierbaren Repetitionsfrequenzen liegen zwischen  $f_p = 5$  kHz – 20 kHz bei laserleistungsabhängigen Pulsdauern von  $t_p = 0,5 \mu s - 3 \mu s$ . Für beide Strahlquellen liegt die emittierte Wellenlänge im nahen Infrarotbereich von  $\lambda_{em} = 1030$  nm.

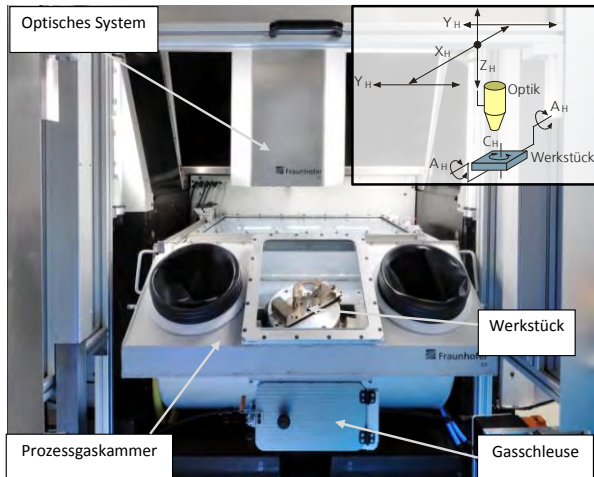


Abb. 3: Frontansicht der verwendeten „POLAR-Anlage“

Die Laserstrahlung wird über ein Lichtleitkabel mit quadratischem Faserkern und Kantenlängen von  $d_{LLK} = 200 \mu m$  in eine optische Anordnung gelenkt. Wesentlicher Zweck des optischen Aufbaus ist die Abbildung des Faserendes auf das zu bearbeitende Bauteil, mit der Möglichkeit die Laserstrahlabmessungen auf dem Bauteil kontinuierlich in der Größe zu verändern. Herzstück des optischen Aufbaus ist dementsprechend ein stufenlos verstellbares Zoomteleskop mit einer Vergrößerung von 0,16fach bis 2fach. Zur schnellen Ablenkung der Laserstrahlung steht ein 3D Laserscannersystem zur Verfügung, bestehend aus einem HurryScan 25 und einem VarioScan 30 der Firma ScanLab. Die Fokussierung der Laserstrahlung erfolgt durch ein f-Theta Planfeldobjektiv mit einer Brennweite von  $f_T = 420$  mm. An dieser Anlage können Laserstrahldurchmesser von  $d_L = 120 \mu m$  bis  $800 \mu m$  realisiert werden. Die Laserbearbeitung erfolgt in einer Prozessgaskammer, um unerwünschte Oxidationen zu vermeiden.

### 3.2 Intensitätsverteilung

Für die Bearbeitung werden Intensitätsverteilungen der Laserstrahlung mit quadratischer Kontur in der Bearbeitungsebene verwendet. Das Profil der Intensitätsverteilung soll dabei in x- und y-Ausdehnung konstant, d.h. Top-Hat-förmig sein. Die Menge an unterschiedlichen transmissiven optischen Elementen bei der Strahlformung und die nicht ideale Beugungsmaßzahl der Laserstrahlquelle führen u.a. bei unterschiedlichen Vergrößerungen des verwendeten Zoomteleskops zu unterschiedlichen Abbildungsqualitäten und somit zu Abweichungen von einer ideal Top-Hat-förmigen Intensitätsverteilung.

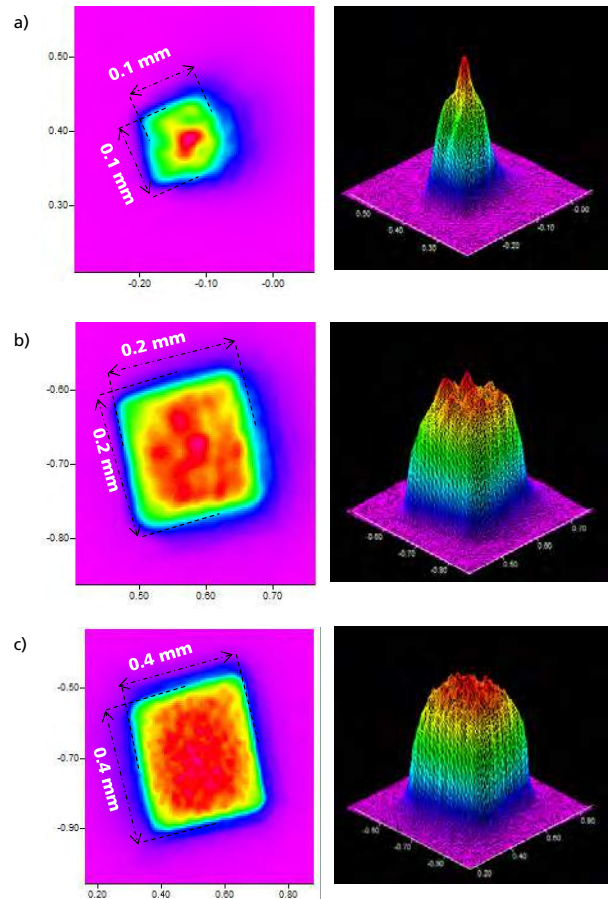


Abb. 4: Intensitätsverteilung und Abmessungen der verwendeten Laserstrahlwerkzeuge a)  $100 \times 100 \mu m^2$  b)  $200 \times 200 \mu m^2$  c)  $400 \times 400 \mu m^2$

Für die Untersuchungen werden insgesamt drei Strahlwerkzeuge mit unterschiedlichen Abmessungen verwendet. Die Kantenlängen der quadratischen Konturen betragen dabei  $100 \mu m$ ,  $200 \mu m$  und  $400 \mu m$ .

## 4 Vorgehensweise

### 4.1 Werkstoff

Der Kaltarbeitsstahl 1.2379 findet breite Anwendung sowohl im Bereich Schneid- und Stanzwerkzeuge, als auch in der Massivumformung. Für das Kaltfließpressen von Aluminium wird 1.2379 unter anderem als Werkstoff für Werkzeugmatrize, Stempel und Auswerfer empfohlen [13]. Für die Untersuchungen zur Laserbearbeitung wird ein pulvermetallurgisch hergestellter, jedoch in der elementaren Zusammensetzung identischer Werkstoff 1.2379+ von der Fa. Dörrenberg eingesetzt. Dieser zeichnet sich durch ein seigerungsfreies Gefüge mit großer Homogenität der Elementverteilung und geringem Anteil an Verunreinigungen wie z.B. Schwefel aus. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Werkstoffdaten 1.2379+

Element	C	Cr	Mo	V	Fe
Richtanalyse [%]	1,55	12,00	0,80	0,90	Rest

Das verwendete Probenmaterial ist im weichgeglühten Zustand und hat die Abmessungen  $50 \times 75 \times 15$  mm<sup>3</sup>.

Die Ausgangsrauheit der geschliffenen Probenoberfläche beträgt  $Ra_{\text{geschliffen}} = 0,40 \pm 0,02 \mu\text{m}$ .

## 4.2 Laserpolieren

Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, können die beiden Verfahrensvarianten Mikro- und Makrolaserpolieren genutzt werden, um unterschiedliche spektrale Rauheitsanteile die Ausgangstopographie der Oberfläche zu beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zu beiden Verfahren grundlegende Untersuchungen für den Werkstoff 1.2379+ durchgeführt.

### Mikrolaserpolieren

Die Untersuchungen zum Mikrolaserpolieren wurde mit der Strahlquelle TruMicro 7051 im Pulsbetrieb bei einer Repetitionsfrequenz von  $f_p = 20 \text{ kHz}$  durchgeführt. Für drei untersuchte Kantenlängen des quadratischen Laserspots ( $d_{L,E} = 100, 200, 400 \mu\text{m}$ ) wurde die Fluenz  $\Phi$ , d.h. Pulsenergie pro Wechselwirkungsfläche, systematisch variiert. Der Einsatz eines teilreflektiven Abschwächersystems ermöglicht die Variation der mittleren Laserleistung am Werkstück bei einer konstanten Pulsdauer von  $t_p = 1 \mu\text{s}$ . Durch Anpassung des Spurversatzes und der Scangeschwindigkeit wurde für alle Untersuchungen ein konstanter Pulsüberlapp von 90% eingestellt. Die untersuchten Verfahrensparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Tabellarische Übersicht der untersuchten Verfahrensparameter für das Mikrolaserpolieren

Verfahrensparameter: Mikrolaserpolieren			
Laserstrahlabmessung $d_{L,E}$	100 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	400 $\mu\text{m}$
Fluenz $\Phi$	3 - 12 J/cm <sup>2</sup>		
Pulsfrequenz $f_p$	20 kHz		
Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}}$	200 mm/s	400 mm/s	800 mm/s
Spurversatz $dy$	10 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
Überfahrtenanzahl $n$	1		
Prozessgas	Argon		
Restsauerstoffgehalt $c_{O_2}$	1000 ppm		

### Makrolaserpolieren

Für die Untersuchungen zum Makrolaserpolieren wurde die Strahlquelle TruDisk 1000 eingesetzt. Für zwei Laserstrahlabmessungen ( $d_{L,E} = 100, 200 \mu\text{m}$ ) wurde jeweils für drei Scangeschwindigkeiten ( $v_{\text{scan}} = 50, 100, 200 \text{ mm/s}$ ) der Einfluss der Laserleistung auf die resultierende Rauheit untersucht. Der Spurversatz wurde derart angepasst, dass der Spurüberlapp bei diesen Untersuchungen konstant 80% betrug. In Tabelle 3 sind die für das Makrolaserpolieren untersuchten Verfahrensparameter dargestellt.

Tabelle 3: Tabellarische Übersicht der untersuchten Verfahrensparameter für das Makrolaserpolieren

Verfahrensparameter: Makrolaserpolieren	
Laserstrahlabmessung $d_{L,E}$	100 $\mu\text{m}$ 200 $\mu\text{m}$
Laserleistung $P_L$	20 – 80 W      40 – 160 W
Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}}$	50; 100; 200 mm/s
Spurversatz $dy$	20 $\mu\text{m}$ 40 $\mu\text{m}$
Überfahrtenanzahl $n$	1; 2; 4
Prozessgas	Argon
Restsauerstoffgehalt $c_{O_2}$	1000 ppm

Im Rahmen dieser Arbeit wurden grundlegende Untersuchungen zur Mikro- und Makrolaserpolitur hinsichtlich des Einflusses ausgewählter Verfahrensparameter auf die Glättung der Ausgangstopographie durchgeführt. Die untersuchten Verfahrensparameter sind die Fluenz, bzw. Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und die Anzahl der Überfahrten.

## 4.3 Laserumschmelzstrukturierung

Für die Laserumschmelzstrukturierung wurde ein quadratischer Laserspot mit einer Kantenlänge von 200  $\mu\text{m}$  verwendet. Abhängig von drei untersuchten Scangeschwindigkeiten ( $v_{\text{scan}} = 50, 100, 200 \text{ mm/s}$ ) wurden die mittlere Laserleistung und Laserleistungsamplitude anhand der Laserleistungen ermittelt die einerseits zum Aufschmelzen ( $P_{L,\text{melt}}$ ) und andererseits zum Verdampfen des Materials ( $P_{L,\text{evap}}$ ) erforderlich sind. Die Aufschmelzleistung  $P_{L,\text{melt}}$  wurde dabei anhand der Breite einer umgeschmolzenen Einzelspur bestimmt, die mindestens 50% der Laserabmessung betrug. Die Verdampfungslaserleistung  $P_{L,\text{evap}}$  wurde visuell anhand einer signifikanten Plasmabildung ermittelt (vgl. [15]). Die ermittelten Verfahrensparameter, die die Grundlage für die folgenden Untersuchungen bilden, sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Tabellarische Übersicht der Verfahrensparameter und Bereiche in denen diese systematisch variiert wurden.

Verfahrensparameter: Laserumschmelzstrukturierung			
Laserstrahlabmessung $d_{L,E}$	200 $\mu\text{m}$		
Laserleistungsbereich $P_{L,\text{melt}} - P_{L,\text{evap}}$ [W]	50 - 130	60 - 145	75 - 175
Mittlere Laserleistung $P_M$ [W]	90	102.5	125
Laserleistungsamplitude $P_{A,\text{max}}$ [W]	40	42.5	50
Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}}$ [mm/s]	50	100	200
Prozessgas	Argon		
Restsauerstoffgehalt $c_{O_2}$	1000 ppm		

Im Rahmen dieser Arbeit wurden grundlegende Untersuchungen durchgeführt, wobei jeweils der Einfluss ausgewählter Verfahrensparameter auf die Strukturhöhe anhand von Einzelspuren untersucht wird. Die untersuchten Verfahrensparameter sind die Laserleistungsamplitude, die Scangeschwindigkeit, die Wellenlänge und die Anzahl an Überfahrten.

## 5 Oberflächencharakterisierung

Neben der Messung des Mittenrauwert  $Ra$  nach DIN EN ISO 4287 und DIN EN ISO 4288:1998 werden die laserbearbeiteten Oberflächen im Anschluss an die Bearbeitung mittels Weißlichtinterferometrie (WLI) digitalisiert, um eine halbautomatisierte Auswertung relevanter Oberflächeneigenschaften, wie z.B. Rauheit, vornehmen zu können. Die Wahl der Größe des mittels WLI erfassten Messfeldes erfolgt dabei grundsätzlich auf Basis der verwendeten Verfahrensparameter des eingesetzten Laserbearbeitungsprozesses und wird durch die Auflösung eines phasenkorrekten Profilters bzw. einer Fourier-Transformation bestimmt. Im Falle der laserpolierten Oberflächen erfolgt eine anschließende Analyse der spektralen Rauheiten.

## 5.1 Spektrale Rauheitsanalyse

Um Änderungen der Rauheit durch eine Mikropolitur zu messen, wird die Digitalisierung einer mikropolierten Oberfläche mittels Weißlichtinterferometrie durchgeführt. Die digitalisierte Oberfläche wird anschließend mittels einer spektralen Rauheitsanalyse untersucht, die durch diskrete Faltung der Oberfläche mit einer Gauß'schen Filterfunktion, ähnlich der ISO 11562, erfolgt. Somit wird ein Rauheitsspektrum erzeugt, das die Rauheit in Abhängigkeit der eingesetzten Wellenlänge zeigt [4][7][8][9][12].

## 5.2 Schnelle Fourier Analyse

Die strukturierten Oberflächen werden im Anschluss an die Bearbeitung mittels Weißlichtinterferometrie (WLI) digitalisiert (Abb. 5 oben), um eine halbautomatisierte Auswertung relevanter Struktureigenschaften, wie z.B. die Strukturhöhe, vornehmen zu können. Die Grundlage der Analyse an Einzelspuren bildet dabei der jeweilige Längsschnitt durch die Mitte einer Einzelspur entlang des Scanvektors (Abb. 5 Mitte). Dieser Längsschnitt wird mittels schneller Fourier-Transformation in seine Ortsfrequenzanteile, Phasen und zugehörigen Amplituden zerlegt (Abb. 5 unten). Zur präzisen Bestimmung der Hauptwellenlängen und Schwingungsamplituden wird grundsätzlich ein Zero-Padding verwendet. Die Bestimmung von Ortswellenlänge und Schwingungsamplitude über den gesamten Scanvektor und über alle Einzelspuren, sowie die statistische Auswertung zur Mittelwertbildung und Bestimmung der Standardabweichung wird halbautomatisch mittels eines geeigneten Algorithmus durchgeführt. Die lokalen Maxima der Schwingungsamplituden werden dabei durch eine numerische Ableitung des Fourier-Spektrums und einer anschließenden Überprüfung der Nulldurchgänge identifiziert. [10]

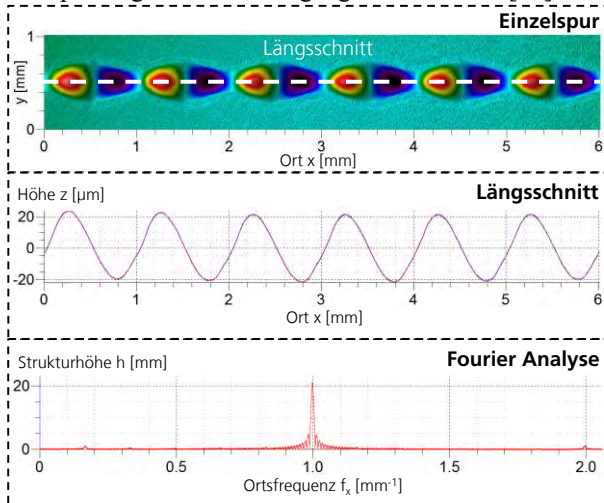


Abb. 5: Eindimensionale Fourier-Analyse anhand eines Querschnitts einer Einzelspur auf Ti6Al6V. [15][16][17]

Die Frequenzauflösung bei der Auswertung mit der diskreten Fourier-Transformation hängt von der Länge des aufgenommenen Messdatenausschnitts ab. Wird nur eine Schwingungsfrequenz erwartet, so reicht unter Benutzung des Zero-Paddings bereits eine Länge von etwa einer Wellenlänge aus. Allerdings enthalten die Messdaten zusätzliche Nebenschwingungen, welche die Lage

und Größe der Hauptfrequenz beeinflussen. Diese Nebenschwingungen resultieren aus der leichten Asymmetrie der Struktur, der Rauheit der Oberfläche und anderen physikalischen Faktoren wie Inhomogenitäten im Material oder Fluktuationen in der Intensitätsverteilung der Laserstrahlung. [10]

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Laserpolieren

Um eine flächige Bearbeitung zu erreichen wird der Laserspot sowohl beim Mikro- als auch beim Makrolaserpolieren mäanderförmig über die Oberfläche geführt. Die Scanvektoren der ersten Überfahrt sind dabei senkrecht zur Richtung der dominierenden Schleifriefen ausgerichtet.

#### Mikrolaserpolieren

Das Mikrolaserpolierverfahren kann in erster Linie eingesetzt werden um die Mikrorauheit und damit den Glanzgrad einer Oberfläche zu verbessern. Wie in Abb. 6 exemplarisch für die Laserfokusabmessung  $d_{L,E} = 200 \mu\text{m}$  dargestellt wird mit steigender Fluenz zunächst eine stärker geglättete Oberfläche erkennbar. Hierbei werden größere Strukturen nicht signifikant beeinflusst, kleine Sekundärstrukturen, z.B. flache Schleifriefen werden mit einer Fluenz  $\Phi = 4 - 6 \text{ J/cm}^2$  jedoch bereits geglättet. Das Ergebnis einer Mikrolaserpolitur ist stark von der elementaren Homogenität des Werkstoffs abhängig. Insbesondere bei der Bearbeitung inhomogener Materialien entstehen stochastisch verteilte Defekte entsprechend der Verteilung elementarerer Inhomogenitäten oder von nicht metallischen Einschlüssen. Diese haben oftmals eine laterale Abmessung von 5 - 20  $\mu\text{m}$  und entstehen in der Regel durch das explosionsartige Verdampfen von oberflächennahen Einschlüssen [14].

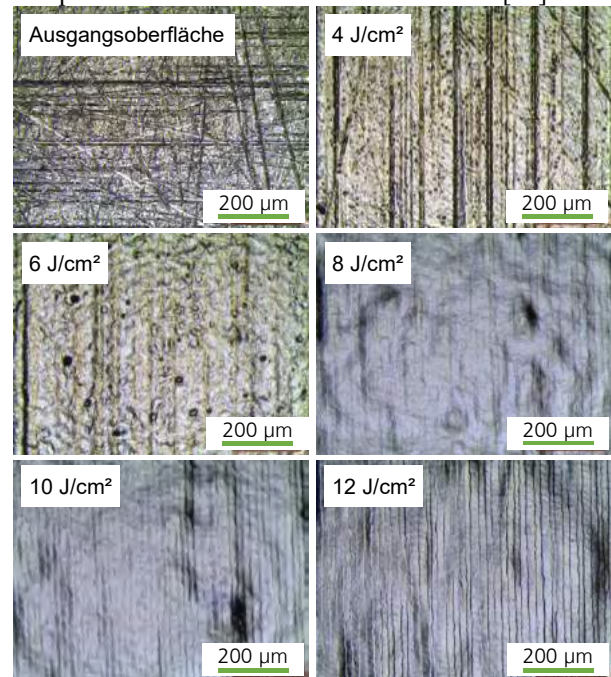


Abb. 6: Lichtmikroskopaufnahmen von Testfeldern nach der Mikrolaserpolitur ( $d_{L,E} = 200 \mu\text{m}$ ) mit unterschiedlichen Fluenzen.

Bei Fluenzen von  $\Phi = 8-12 \text{ J/cm}^2$  werden auch tiefere Schleifriefen umgeschmolzen. Gleichzeitig werden

auch neue Strukturen auf der Oberfläche erzeugt. In Abb. 6 sind für größere Fluenzen Welligkeiten sowie Linien mit einem Abstand von 20  $\mu\text{m}$  erkennbar. Letztere können auf den Spurversatz der scannenden Bearbeitung zurückgeführt werden [14].

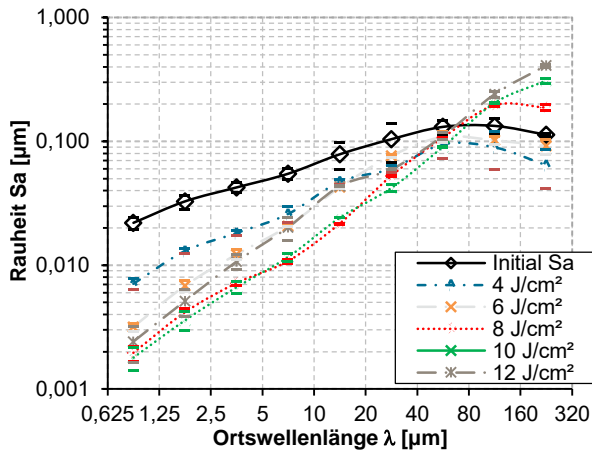


Abb. 7: Spektrale Rauheitsanalyse von mit unterschiedlicher Fluenz mikrolaserpolierten Oberflächen ( $d_{L,E} = 200 \mu\text{m}$ , siehe auch Abb. 6)

Der visuelle Eindruck der Oberflächen wird durch die spektrale Rauheitsanalyse (Abb. 7) gestützt: Bis zu einer Fluenz  $\Phi = 6 \text{ J/cm}^2$  kann die spektrale Rauheit über das gesamte gemessene Spektrum (bis  $\lambda = 320 \mu\text{m}$ ) reduziert werden. Hierbei kann insbesondere die verkleinerte Mikrorauheit dem vergrößerten Glanzgrad zugeordnet werden. Mit steigender Fluenz bis  $\Phi = 10 \text{ J/cm}^2$  wird im Ortswellenlängenbereich  $\lambda < 40 \mu\text{m}$  eine weitere Verkleinerung der Mikrorauheit detektiert. Für  $\Phi > 10 \text{ J/cm}^2$  wird die Mikrorauheit wiederum vergrößert. Für Ortswellenlängen  $\lambda \geq 80 \mu\text{m}$  wird mit steigender Fluenz eine Vergrößerung der Rauheit gemessen, welche in Abb. 6 als Welligkeit sichtbar ist.

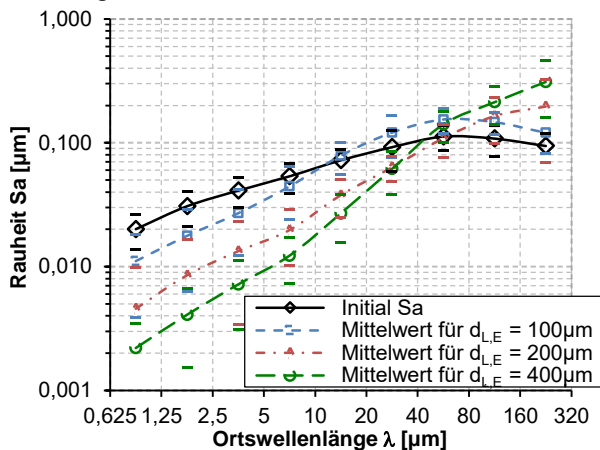


Abb. 8: Mittelwert aller Rauheitsspektren der hergestellten Versuchsflächen, zusammengefasst jeweils für die verwendeten Laserfokusabmessungen  $d_{L,E} = 100, 200$  und  $400 \mu\text{m}$

Die oben beschriebene Tendenz für steigende Fluenzen ist grundsätzlich mit allen untersuchten Laserfokusabmessungen erkennbar. Um den Einfluss der Laserfokusabmessung auf das Bearbeitungsergebnis zu vergleichen sind in Abb. 8 die Rauheitsspektren aller Versuchsflächen jeweils für  $d_{L,E} = 100, 200$  und  $400 \mu\text{m}$

zu Mittelwertskurven zusammengefasst. Die große Standardabweichung der einzelnen Punkte im Graph spiegelt die Variation bei jeweiliger Verwendung unterschiedlicher Fluenzen dar. Sowohl im Mittel als auch absolut können demnach die kleinste Mikrorauheit mit einer Laserfokusabmessung von  $d_{L,E} = 400 \mu\text{m}$  erreicht werden. Gleichzeitig ist hier auch mit der deutlichsten Vergrößerung der Rauheit im Bereich  $\lambda \geq 40 \mu\text{m}$  zu rechnen. Im Gegensatz hierzu scheint mit  $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$  eine kleinere Rauheitsreduktion möglich mit gleichzeitig kleinerer Rauheitsvergrößerung im Bereich  $\lambda \geq 80 \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse mit  $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$  sind dazwischen eingeordnet. Insgesamt wird unabhängig von den Laserstrahlabmessungen eine kritische Ortswellenlänge von  $\lambda_{\text{krit.}} = 40 \mu\text{m}$  identifiziert, bis zu der die Ausgangsrauheit bei der Mikrolaserpolitur mit einer Pulsdauer von  $t_p = 1 \mu\text{s}$  verkleinert werden kann.

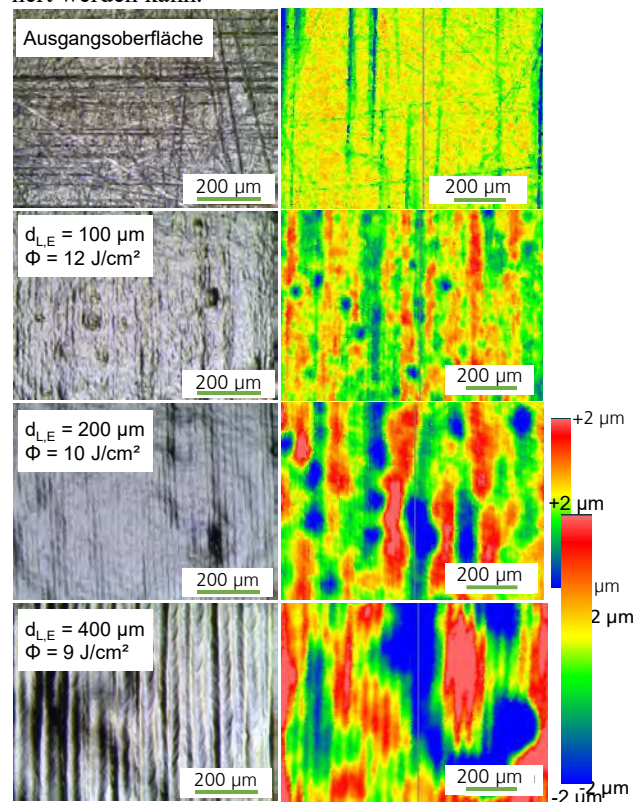


Abb. 9: Vergleich der Lichtmikroskop- (links) und WLI-Aufnahmen (rechts) der mikrolaserpolierten Oberflächen mit der kleinsten gemessenen Mikrorauheit, jeweils für die drei Laserfokusabmessungen  $d_{L,E} = 100, 200$  und  $400 \mu\text{m}$

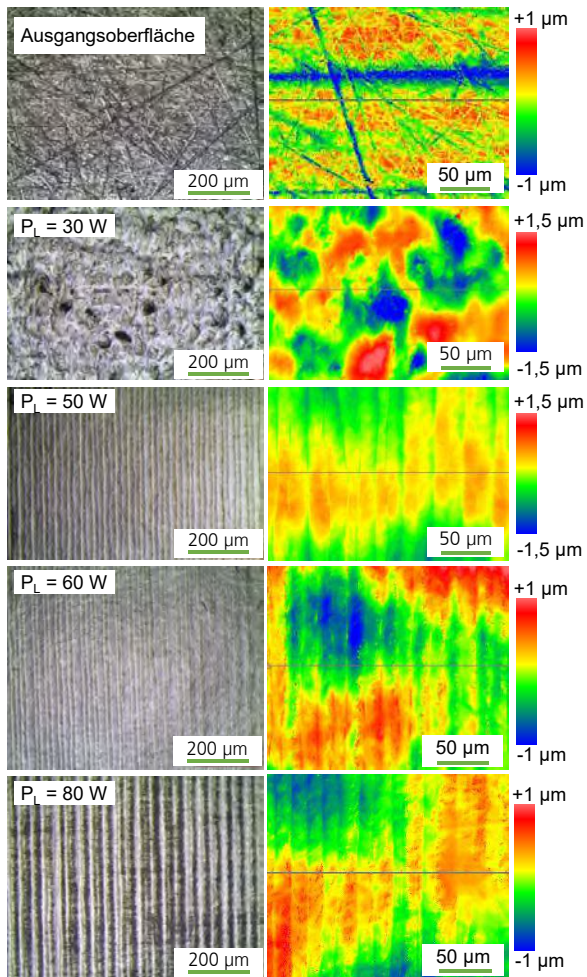
Bei einem Vergleich der erzeugten Oberflächen, die jeweils die kleinste Mikrorauheit für die verwendeten Laserfokusabmessung aufweisen (Abb. 9), wird die beschriebene Tendenz ebenfalls visuell qualitativ bestätigt. Die mit den kleinsten Laserfokusabmessungen mikropolierte Fläche weist hierbei die kleinste Welligkeit und somit den größten Glanzgrad auf.

#### Makrolaserpolieren

Das Makrolaserpolieren wird eingesetzt, um auch Strukturen im Ortswellenlängenbereich  $\lambda \geq 80 \mu\text{m}$  effizient zu glätten. Im Vergleich zum Mikrolaserpolieren wird bei diesem Verfahren eine größere Umschmelztiefe erreicht. Dabei wird zusätzlich eine Homogenisierung

der Randschicht erzielt, insbesondere in Bezug auf die lokale Verteilung der elementaren Legierungsbestandteile. Damit wird vor allem der Einfluss von oberflächen-nahen oxidischen oder sulfidischen Einschlüssen auf die erreichbare Rauheit verringert [18].

In Abb. 10 sind Oberflächenaufnahmen für unterschiedliche Laserleistungen bei einer Laserstrahlabmessung von  $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$ , einer Scangeschwindigkeit von  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$  und einer Anzahl an Überfahrten  $n = 2$  zusammengefasst.



$d_{L,E} = 100 \mu\text{m} \mid v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s} \mid n = 2$   
 Abb. 10: Vergleich der Lichtmikroskop- (links) und WLI-Aufnahmen (rechts) von mit unterschiedlicher Laserleistung makrolaserpolierten Oberflächen ( $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$ ,  $n = 2$ )

Um eine Oberfläche effektiv zu glätten ist eine Mindestlaserleistung erforderlich, um das Material kontinuierlich aufzuschmelzen. Im Grenzbereich ist die Laserleistung zu klein um ein kontinuierlich stabiles Schmelzbad zu erzeugen (Abb. 10,  $P_L = 30 \text{ W}$ ). Eine Folge der Verwendung einer Laserleistung in diesem Bereich ist daher eine inhomogen aufgeworfene Oberfläche, die noch keine Verkleinerung der Ausgangsrauheit ermöglicht. Mit steigender Laserleistung erfolgt eine Glättung der Ausgangsrauheit, die im gezeigten Fall ein lokales Minimum bei  $P_L = 60 \text{ W}$  erreicht (Abb. 10). Wird die Laserleistung darüber hinaus vergrößert sind Oxidationseffekte und eine vergrößerte Welligkeit sichtbar. Dies spiegelt sich in der spektralen Rauheitsanalyse wieder (Abb. 11). So wird für  $P_L = 30 \text{ W}$  eine Rauheitsvergrößerung im Bereich  $\lambda = 40\text{-}640 \mu\text{m}$  gemessen. Ab

$P_L = 50 \text{ W}$ , d.h. bei vollständig umgeschmolzener Oberfläche, wird die Rauheit im Bereich  $\lambda < 160 \mu\text{m}$  verkleinert. Die vergrößerte Welligkeit bei einer Bearbeitung mit  $P_L = 80 \text{ W}$  wird in der spektralen Rauheitsanalyse durch ein lokales Maximum im Bereich  $\lambda = 320\text{-}1280 \mu\text{m}$  repräsentiert. Oxidationseffekte hingegen beeinflussen den Ortswellenlängenbereich der Mikrorauheit, erkennbar an den im Vergleich zum Spektrum für  $P_L = 60 \text{ W}$  größeren Rauheiten für  $\lambda < 20 \mu\text{m}$ .

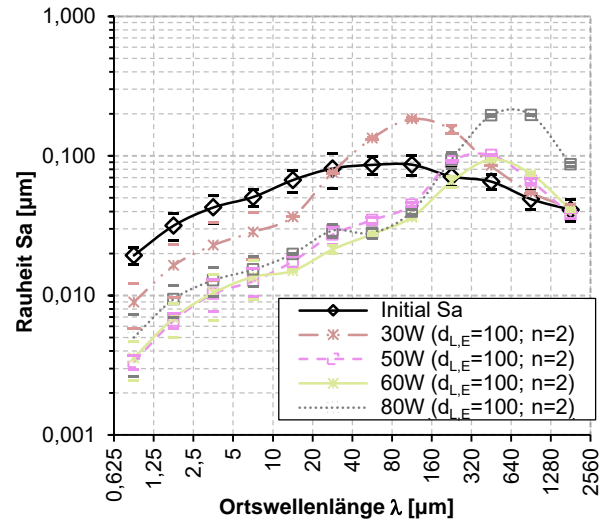


Abb. 11: Spektrale Rauheitsanalyse der in Abb. 10 dargestellten makrolaserpolierten Oberflächen ( $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$ ,  $n = 2$ )

Eine weitere Bewertungsgröße zur Charakterisierung der Oberfläche ist der Mittenrauwert  $R_a$ . In Abb. 12 sind die  $R_a$ -Werte für  $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$  und  $n = 1$  bis 4 Überfahrten zusammengefasst. Aus früheren Untersuchungen am Lehrstuhl für Lasertechnik LLT ist bekannt, dass durch mehrfache Bearbeitung für viele Werkstoffe eine Verkleinerung der Rauheit erreicht werden kann [5][7][18]. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass in Abhängigkeit von der Ausgangstopographie und von prozessinduzierten Oberflächenstrukturen eine Überfahrtenanzahl zu erwarten ist, bei der der Mittenrauwert  $R_a$  ein lokales Minimum einnimmt. Hier wird das lokale Minimum von  $R_a = 0,16 \pm 0,2 \mu\text{m}$  bei  $P_L = 60 \text{ W}$  und  $n = 2$  Überfahrten erreicht.

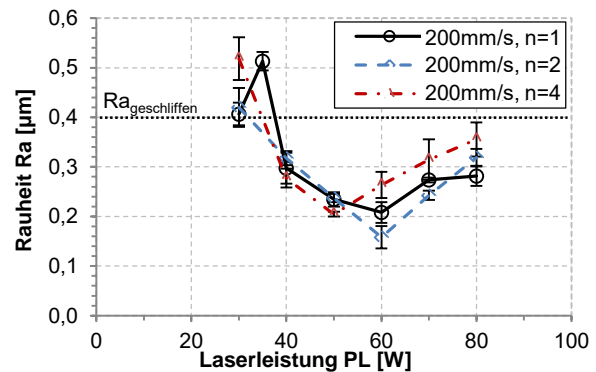


Abb. 12: Mittenrauwert  $R_a$  von makrolaserpolierten Oberflächen ( $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$ ,  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$ ) nach  $n = 1$  bis 4 Überfahrten

Analog zu dieser Untersuchung wurde das lokale Rauheitsminimum in Abhängigkeit der Laserleistung für die Scangeschwindigkeiten  $v_{\text{scan}} = 50, 100$  und  $200 \text{ mm/s}$

sowie variiertes Überfahrtenanzahl jeweils für die Laserfokusbmessungen  $d_{L,E} = 100$  und  $200 \mu\text{m}$  bestimmt. Die spektrale Rauheitsanalyse dieser Versuchsflächen ist in Abb. 13 zusammengefasst. Für alle untersuchten Verfahrensparameterkombinationen stellte sich das lokale Minimum für eine Überfahrtenanzahl von  $n = 2$  ein.

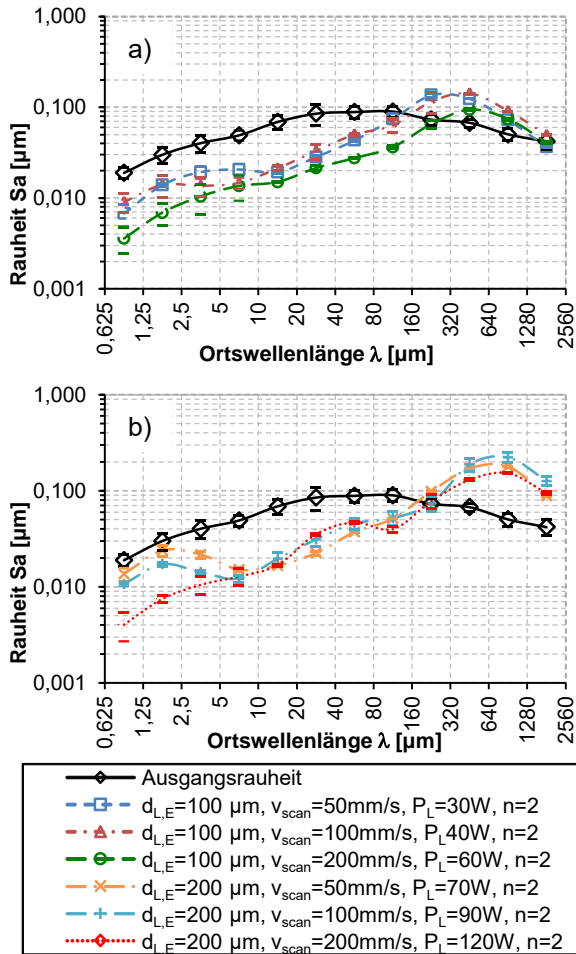


Abb. 13: Zusammenfassung der spektralen Rauheitsanalyse für die makrolaserpolierten Oberflächen mit dem kleinsten Mittenrauwert  $R_a$  für  $d_{L,E} = 100 \mu\text{m}$  (a) und  $200 \mu\text{m}$  (b) ( $v_{\text{scan}} = 50, 100, 200 \text{ mm/s}$ ;  $n = 2$ )

Für beide Laserfokusbmessungen kann mit größerer Scangeschwindigkeit eine Tendenz zu kleineren Makro- und Mikrorauheitswerten beobachtet werden. Hierbei fällt auf, dass die Mikrorauheit mit  $\lambda < 20 \mu\text{m}$  bei einer Scangeschwindigkeit von  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$  für beide Fokusbmessungen im Rahmen der Standardabweichung ist. Im den Bereichen  $\lambda = 20 - 80$  sowie  $320 - 2560 \mu\text{m}$  werden für  $d_{L,E} = 200 \mu\text{m}$  dagegen signifikant größere Werte gemessen als für den kleineren  $100 \mu\text{m}$  Laserfokus.

Basierend auf der spektralen Rauheitsanalyse wird eine kritische Ortswellenlänge  $\lambda_{\text{krit.}} = 160 \mu\text{m}$  identifiziert, bis zu der die Ausgangsrauheit verkleinert werden kann. Diese ist für den untersuchten Parameterbereich konstant. Das lokale Maximum des Rauheitsspektrums liegt für den kleineren Laserfokus im Bereich  $\lambda = 160 - 640 \mu\text{m}$  und für den größeren Laserfokus im Bereich  $\lambda = 320 - 1280 \mu\text{m}$ .

## 6.2 Laserumschmelzstrukturierung

### 6.2.1 Einzelspurtopographie

Bei der Oberflächenstrukturierung durch Laserumschmelzen wird die Laserleistung sinusförmig moduliert und dadurch in der Regel Strukturen mit einem sinusförmigen Profil im Längsschnitt erzeugt. Allerdings unterscheiden sich Strukturhöhe und Profil z.T. deutlich u.a. in Abhängigkeit des Werkstoffes. Für die Untersuchungen werden Einzelspuren auf einer 1.2379+ Probenoberfläche mit geschliffenen Ausgangsoberfläche erzeugt, wobei die Bearbeitung in Richtung der Schleifriefen erfolgt. Die Breite der Umschmelzspur variiert dabei mit der modulierten Laserleistung (Abb. 14 oben). Abhängig von der Laserleistung werden entlang der Einzelspur unterschiedliche Strukturhöhen erzielt (Abb. 14 Mitte), die im Längsschnitt analysiert werden (Abb. 14 unten).

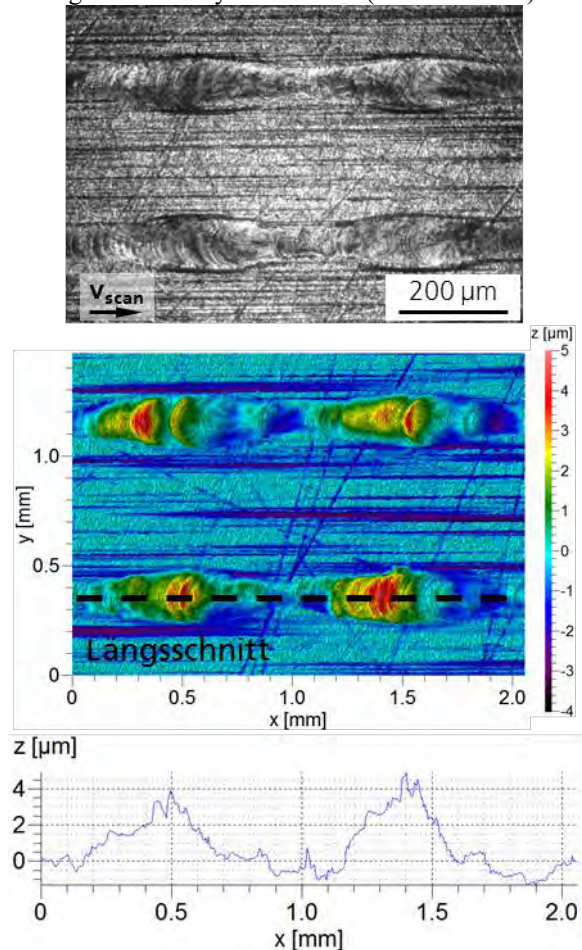


Abb. 14: Lichtmikroskopische (oben), WLI (Mitte) Aufnahmen und Längsschnitt (unten) einer Einzelspur auf 1.2379+ ( $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$ ;  $\lambda = 1 \text{ mm}$ ;  $P_M = 90 \text{ W}$ ;  $P_A = 40 \text{ W}$ ;  $n = 1$ )

Abb. 14 zeigt hierbei einen Ausschnitt aus einer typischen Einzelspurbearbeitung auf dem Werkstoff 1.2379+. Hierbei ist insbesondere auffällig, dass das Profil der Einzelspur im Längsschnitt deutlich von einem ideal sinusförmigen Verlauf abweicht (Abb. 14 unten). Dies liegt wahrscheinlich an einer ausgeprägten Schuppenbildung während der Strukturierung. Schuppenbildung wird dabei auf Änderungen des Schmelzbadvolumens zurückgeführt und wird üblicherweise vor allem durch Inhomogenitäten in der elementaren Werkstoffzu-



sammensetzung erzeugt. Somit führt eine vergleichsweise unregelmäßige Schuppenbildung mit Strukturhöhen von  $1 - 2 \mu\text{m}$  zu einer signifikanten Abweichung vom sinusförmigen Profil. Unabhängig davon kann die Strukturhöhe der Basiswellenlänge  $\lambda$  trotzdem mittels Fourieranalyse ausgewertet werden.

### 6.2.2 Laserleistungsamplitude $P_A$

In vorherigen Arbeiten wurde stets eine lineare Abhängigkeit der erzeugten Strukturhöhe von der verwendeten Laserleistungsamplitude festgestellt. Diese Abhängigkeit wird auch für den Werkstoff 1.2379+ bei Scangeschwindigkeiten von  $v_{\text{scan}} = 50, 100$  und  $200 \text{ mm/s}$  unter Variation der Laserleistungsamplitude (Abb. 15) untersucht.

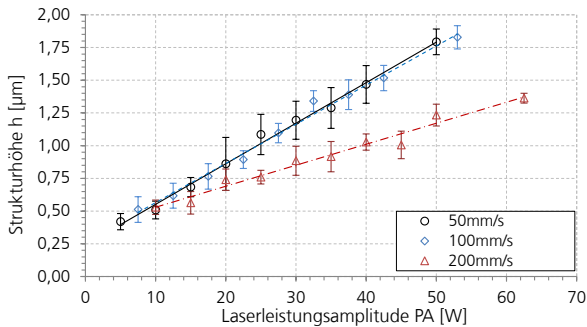


Abb. 15: Strukturhöhe in Abhängigkeit der Laserleistungsamplitude für drei Scangeschwindigkeiten

Die Strukturhöhe zeigt auch für den Werkstoff 1.2379+ grundsätzlich eine lineare Abhängigkeit der Strukturhöhe von der Laserleistungsamplitude für die untersuchten Scangeschwindigkeiten. Die größte Strukturhöhe von  $h = 1,83 \pm 0,09 \mu\text{m}$  wird hierbei für  $v_{\text{scan}} = 100 \text{ mm/s}$ ,  $P_M = 102,5 \text{ W}$  und  $P_A = 53 \text{ W}$  erzielt. Die Strukturhöhe für  $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$  ist geringfügig kleiner, während bei  $v_{\text{scan}} = 200 \text{ mm/s}$  eine maximale Strukturhöhe von  $h = 1,36 \pm 0,04 \mu\text{m}$  bei  $P_M = 125 \text{ W}$  und  $P_A = 65 \text{ W}$  erreicht wird. Bei Laserleistungsamplituden (Tabelle 4), die größer sind als die maximalen Laserleistungsamplituden wird zwar eine größere Strukturhöhe erzielt, allerdings erfolgt die Strukturierung diskontinuierlich, d.h. der Umschmelzprozess wird regelmäßig unterbrochen. Somit ist in diesem Fall die Abweichung von einem ideal sinusförmigen Profil noch stärker ausgeprägt. Für eine spätere Strukturierung werden ausschließlich Verfahrensparameter gewählt, die eine kontinuierliche Umschmelzung ermöglichen.

### 6.2.3 Anzahl Überfahrten $n$

Die maximale Strukturhöhe nach  $n = 1$  Überfahrt ist bisher auf  $h = 1,83 \pm 0,09 \mu\text{m}$  bei  $v_{\text{scan}} = 100 \text{ mm/s}$ ,  $P_M = 102,5 \text{ W}$  und  $P_A = 53 \text{ W}$  beschränkt. Da für makroskopische Strukturen oftmals größere Strukturhöhen erforderlich sind, wird die Skalierbarkeit der Laserumschmelzstrukturierung durch mehrfache Wiederholung der Bearbeitung mit den gleichen Verfahrensparametern untersucht. In Anlehnung an vorherige Untersuchungen wird die Anzahl an Überfahrten schrittweise verdoppelt bis zu einer maximalen Anzahl an Überfahrten von  $n = 64$ , da auch der Zeitaufwand für einen späteren Einsatz des Verfahrens nicht gänzlich außer Acht gelassen werden soll.

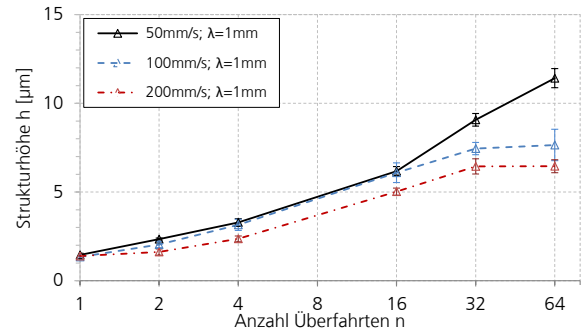


Abb. 16: Strukturhöhe in Abhängigkeit der Anzahl an Überfahrten für drei Scangeschwindigkeiten bei  $\lambda = 1 \text{ mm}$ .

In Abb. 16 ist exemplarisch die Strukturhöhe in Abhängigkeit der Anzahl an Überfahrten für Scangeschwindigkeiten  $v_{\text{scan}} = 50, 100$  und  $200 \text{ mm/s}$  bei einer Wellenlänge  $\lambda = 2 \text{ mm}$  gezeigt. Im Gegensatz zur Laserleistungsamplitude skaliert die Strukturhöhe nicht linear mit der Anzahl an Überfahrten. Dies liegt vor allem darin begründet, dass bei nachfolgenden Strukturierungsschritten, bestehende Strukturen zum Teil durch das Umschmelzen wieder geglättet werden. Die maximale Strukturhöhe mit  $h = 11,66 \pm 0,44 \mu\text{m}$  wird dabei bei einer Scangeschwindigkeit von  $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$  und  $n = 64$  Überfahrten erzielt. Bemerkenswert ist allerdings, dass bis zu  $n = 32$  Überfahrten mit  $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$  und  $100 \text{ mm/s}$  näherungsweise die gleichen Strukturhöhen erzielt werden, so dass eine Strukturierung mit der doppelten Geschwindigkeit erfolgen kann. Allerdings zeigt sich für die beiden größeren Scangeschwindigkeiten eine Sättigung der Strukturhöhe für eine größere Anzahl an Überfahrten. Dabei werden für  $v_{\text{scan}} = 100 \text{ mm/s}$  und  $200 \text{ mm/s}$  für  $n = 32$  Überfahrten näherungsweise die gleichen Strukturhöhen erzielt wie für  $n = 64$  Überfahrten. Somit können bei Einzelspuren durch eine weitere Vergrößerung der Anzahl an Überfahrten keine größeren Strukturen als ca.  $7 \mu\text{m}$  erzeugt werden. Auf welchem physikalischen Effekt diese Begrenzung der Strukturhöhe resultiert ist bisher noch ungeklärt und wird Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### 6.2.4 Flächige Strukturierung

Eine Erweiterung von einer Einzelspurbearbeitung zu einer flächigen Bearbeitung erfolgt durch eine teilweise Überlagerung der Einzelspuren. Die Untersuchung des Einflusses dieser Überlagerung auf die Strukturhöhe erfolgt anhand einer systematischen Variation des Spurversatzes, d.h. dem Abstand zwischen zwei benachbarten Einzelspuren. Durch den Überlapp einzelner Bearbeitungsspuren erfolgt somit eine Mehrfachbearbeitung, die ebenfalls zu einer Vergrößerung der Strukturhöhe führt. Allerdings erfolgt bei einem Überlapp nebeneinanderliegender Spuren eine lokale Erwärmung, die umso größer ist, je kleiner der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender Einzelspuren ist. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde der Spurversatz schrittweise in 5 Stufen beginnend bei  $dy = 128 \mu\text{m}$  jeweils halbiert. Der kleinste untersuchte Spurversatz ist somit  $dy = 8 \mu\text{m}$ . Bei einer Kantenlänge von  $d_{L,E} = 200 \mu\text{m}$  entspricht dies max. 25 Umschmelzungen pro Spur.

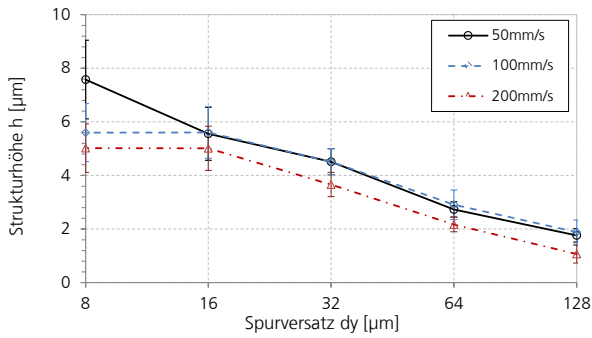


Abb. 17: Strukturhöhe in Abhängigkeit des Spurversatzes für drei Scangeschwindigkeiten bei  $\lambda = 1$  mm.

In Abb. 17 ist die erzielte Strukturhöhe in Abhängigkeit des Spurversatzes für  $v_{\text{scan}} = 50, 100$  und  $200$  mm/s bei  $\lambda = 1$  mm dargestellt. Im Rahmen der Messgenauigkeit werden für die untersuchten Scangeschwindigkeiten gleiche Strukturhöhen bis zu einem Spurversatz von  $dy = 16$  µm beobachtet. Bei einer weiteren Verkleinerung des Spurversatzes auf  $dy = 8$  µm wird für  $v_{\text{scan}} = 100$  mm/s und  $200$  mm/s keine weitere Vergrößerung der Strukturhöhe mehr erzielt. Die größte Strukturhöhe mit  $h = 7,5 \pm 0,97$  µm wird allerdings bei  $dy = 8$  µm und einer Scangeschwindigkeit von  $v_{\text{scan}} = 50$  mm/s erzielt. In Abb. 18 oben ist die mit diesem Verfahrensparametersatz erzeugte Oberfläche in Form einer Falschfarbendarstellung gezeigt.

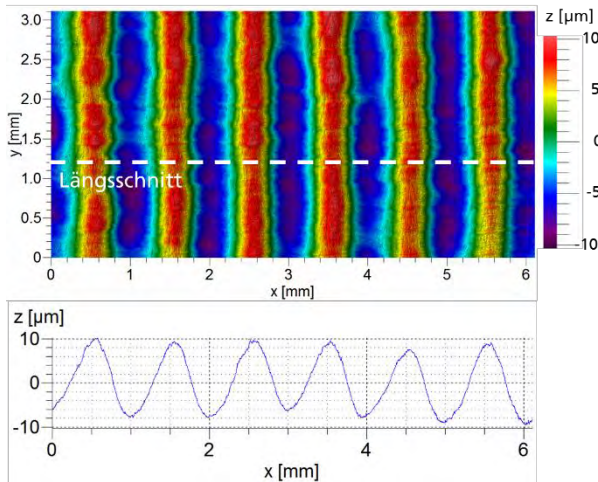


Abb. 18: Falschfarbendarstellung einer flächig strukturierten Oberfläche mittels WLI aufgenommen ( $v_{\text{scan}} = 50$  mm/s;  $dy = 8$  µm;  $\lambda = 1$  mm).

Bei einem Vergleich der Profile entlang eines Längsschnittes in Scanrichtung für die erzeugten Einzelspuren (Abb. 14 unten) und für die flächige Bearbeitung (Abb. 18 unten) sind unmittelbar ein qualitativer und quantitativer Unterschied zu erkennen. Einerseits entspricht das Profil bei der flächigen Bearbeitung deutlich eher einem sinusförmigen Verlauf und andererseits ist die Strukturhöhe aufgrund der Mehrfachbearbeitung um ein Vielfaches größer. Auffällig ist allerdings auch die vergleichsweise große Standardabweichung von ca.  $1$  µm bei der Strukturhöhe, d.h. ca. 12,5% der Strukturhöhe.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Laserpolieren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden grundlegende Untersuchungen zum Mikro- und Makrolaserpolieren des Werkstoffes 1.2379+ mit quadratischer Intensitätsverteilung durchgeführt. Dabei wurde mit beiden Verfahrensvarianten eine signifikante Verkleinerung der Mikro- und Mesorauheit erreicht. Oberflächendefekte, welche bei der Mikrolaserpolitur auftraten, sind vermutlich auf oberflächennahe Einschlüsse bzw. Inhomogenitäten der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes zurückzuführen. Bei der Makrolaserpolitur traten keine vergleichbaren Oberflächendefekte auf. Durch die systematische Untersuchung eines breiten Parameterbereichs für beide Verfahrensvarianten wurde der Einfluss der einzelnen Verfahrensparameter auf die Oberflächentopographie analysiert. Dabei wurde gezeigt, dass für die Makrolaserpolitur eine Vergrößerung der Scangeschwindigkeit sowohl die Mikrorauheit als auch die Makrorauheit positiv beeinflusst. Die insgesamt kleinste Mikrorauheit kann dagegen auch für diesen Werkstoff mit der Mikrolaserpolitur erzeugt werden. Der im Rahmen dieser Untersuchungen kleinste Mittenrauwert  $R_a = 0,16 \pm 0,2$  µm wird durch Makrolaserpolitur mit einer Fokusabmessung von  $d_{L,E} = 100$  µm bei einer Scangeschwindigkeit von  $v_{\text{scan}} = 200$  mm/s, einer Laserleistung  $P_L = 60$  W und  $n = 2$  Überfahrten erreicht.

### 7.2 Laserumschmelzstrukturierung

Für die ersten Untersuchungen zur Laserumschmelzstrukturierung des Werkstoffes 1.2379+ wird zusammenfassend festgehalten. Grundsätzlich ist eine Strukturierung von 1.2379+ mit quadratischer Intensitätsverteilung und Modulation der Laserleistung möglich. Dabei hat sich gezeigt, dass auch für diesen Werkstoff eine lineare Abhängigkeit der Strukturhöhe von der Laserleistungsamplitude gilt. Die Profile der Längsschnitte bei einer Einzelspurbearbeitung weichen allerdings deutlich von einem ideal sinusförmigen Verlauf ab, was auf eine verstärkte Schuppenbildung zurückzuführen ist. Diese wird wahrscheinlich durch Inhomogenitäten in der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes verursacht. Weiterhin kann die Strukturhöhe signifikant durch eine Mehrfachbearbeitung gesteigert werden. Insbesondere bei einer flächigen Bearbeitung durch Überlapp von Einzelspuren können derzeit Strukturhöhen von ca.  $10$  µm erzielt werden. Weiterhin wird durch die überlappende Bearbeitung ein Profil erzeugt, das qualitativ deutlich stärker einem idealsinusförmigen Verlauf und somit dem vorgegebenen Laserleistungssignal entspricht. Für nachfolgende Untersuchungen im Rahmen des SPP 1676 reichen die erzielten Strukturhöhen bereits aus um gezielt wellenlängenabhängige Strukturhöhen einzustellen und deren Einfluss auf das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium zu untersuchen.

Im Weiteren sollen die erzielten Ergebnisse mit vergleichbaren Untersuchungen unter Verwendung einer runden Intensitätsverteilung verglichen werden und der Einfluss der Intensitätsverteilung auf die Oberflächenstrukturierung gezielt untersucht werden. Weiterhin soll

untersucht werden, ob die Strukturhöhe sich weiter steigern lässt, z.B. durch noch größere Scangeschwindigkeiten und vergrößerte Laserleistungsamplituden unter Inkaufnahme, dass geringe Materialmengen verdampft werden. Die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des SPP soll ebenfalls untersucht werden, ob und wie Strukturen mit 8 mm Wellenlänge und ca. 1 mm Strukturhöhe erzielt werden können.

### 7.3 Ausblick für die Oberflächentopographiemodifikation mittels Laserpolitur und Laserumschmelzstrukturierung im SPP1676

Im Rahmen des SPP1676 soll auf Basis der gezeigten Ergebnisse mittels Tribometertests am Institut für Bildsamer Formgebung (IBF) der RWTH Aachen University einerseits der Einfluss der Modifikation von Mikro-, Meso- und Makrorauheit mittels Laserpolitur und andererseits der Einfluss von gezielt gerichteten Strukturen auf den adhäsiven Verschleiß beim Trockenmassivumformen von Aluminium untersucht werden [19][20][21]. In Kooperation mit dem Institut für Materialchemie MCh der RWTH Aachen University sind Untersuchungen zur SAM-Funktionalisierung von laserpolierten und laserumschmelzstrukturierten Oberflächen mit Octadecylphosphonsäure geplant [22]. Zudem sind aufbauend auf diesen Ergebnissen Untersuchungen zur Kombination der Mikro- und Makrolaserpolitur, sowie der Laserumschmelzstrukturierung mit runden und quadratischen Intensitätsverteilungen ebenso geplant wie eine Übertragung der erzielten Oberflächentopographien auf 3D-Freiformflächen.

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1676 „Trockenumformen – Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“.

### Literaturverzeichnis

[1] N. Bay: The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology* 46 (1994) 19-40

[2] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid, M. Yoshida: Environmentally benign tribo-systems for metal forming. *Annals of the CIRP* 59/2 (2010) 760-780

[3] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology* 1/1 (2014) 59-62

[4] E. Willenborg, K. Wissenbach, R. Poprawe: Polishing by laser radiation, in: R. Poprawe (Hg.): *Proceedings of the 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, AT-Verlag, München (2003) 451–456

[5] T. Kiedrowski: Oberflächenstrukturierung beim Laserstrahlpolieren von Stahlwerkstoffen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2009)

[6] R. Ostholt: Laserpolieren metallischer Freiformflächen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2012)

[7] E. Willenborg: Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2006)

[8] A. Temmler, E. Willenborg, K. Wissenbach: Laser Polishing, *Proc. SPIE* 8243, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII, 82430W (February 9, 2012); doi:10.1117/12.906001

[9] A. Temmler: Selektives Laserpolieren von Design- und Funktionsoberflächen. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2013)

[10] A. Temmler: Laserumschmelzstrukturierung. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2012)

[11] E. Willenborg: Abschlussbericht zum Projekt POLAR "Polishing with Laser Radiation", Fraunhofer ILT (2007).

[12] I. Roß, A. Temmler, R. Poprawe, M. Teller, G. Hirt, S. Prünke, Untersuchung zur Oberflächenmodifikation mittels Laserpolieren für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium: *Dry Met. Forming OAJ FMT 1* (2015) 143-151

[13] ICFG Document No. 10/95: Lubrication aspects in cold forging of aluminium and aluminium alloys, *Suppl. WIRE* 46 (1) (1996).

[14] C. Nüsser, J. Kumstel, T. Kiedrowski, A. Diatlov, E. Willenborg: Process- and Material-Induced Surface Structures During Laser Polishing, *J Adv Eng Mat* 2015, 17, No.3, 268-277

[15] A. Temmler, M.A. Walochnik, E. Willenborg, K. Wissenbach: Surface structuring by laser remelting of titanium alloy Ti6Al4V, *J Laser Appl*, 27 (2015), p. S29103

[16] A. Temmler, T. Schmickler, E. Willenborg: Surface Structuring by laser remelting of Inconel 718, *Lasers in manufacturing 2015, proceedings*, June 22 - 25, 2015

[17] A. Temmler, M. Küpper, M. A. Walochnik, A. Lanfermann, T. Schmickler, A. Bach, T. Greifenberg, O. Oreshkin, E. Willenborg, K. Wissenbach and R. Poprawe: Surface structuring by laser remelting of metals, *J Laser Appl*, 29 (1) (2017).

[18] C. Liebing: Beeinflussung funktionaler Oberflächeneigenschaften von Strahlwerkstoffen durch Laserpolieren. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen (2010)

[19] M. Teller, M. Bambach, G. Hirt, I. Roß, A. Temmler, R. Poprawe, H. Bolvadi, S. Prünke, J. M. Schneider: Methodik zur Entwicklung von interaktionsminimierten Oberflächenschichten für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium, *Dry Met Forming OAJ FMT 1* (2015) 34-41

[20] M. Teller, G. Hirt, I. Roß, A. Temmler, R. Poprawe, S. Prünke: Abschätzung der umformtechnischen Grenzen des schmierstofffreien Kaltfließpressens von Aluminium anhand von Tribometerversuchen, *Dry Met. Forming OAJ FMT 2* (2016) 056-061

[21] M. Teller, S. Seuren, M. Bambach, G. Hirt: A new compression-torsion-tribometer with scalable contact pressure for characterization of tool wear during plastic deformation. *Conference Papers in Science*, Article ID 496515, in press

[22] S. Prünke, D. Music, J. M. Schneider, M. Teller, G. Hirt: Decreasing friction during Al cold forming using a nanomolecular layer, *J Vac Sci Technol., A*, Vol. 35, issue 2, 10.1116/1.4972515 |