

SCIENTIFIC REPORTS

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

The main aspect of the Scientific Reports is to promote the discussion of modern developments in research and production and to stimulate the interdisciplinary cooperation by information about conferences, workshops, promotion of partnerships and statistical information on annual work of the Hochschule Mittweida (FH) University of Applied Sciences. This issue will be published sporadically. Contributors are requested to present results of current research, transfer activities in the field of technology and applied modern techniques to support the discussion among engineers, mathematicians, experts in material science and technology, business and economy and social work.

Journal of the University of Applied Sciences Mittweida
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Referat Forschung
PF 1457
D-09644 Mittweida

Tel. +49 (0) 3727 / 58 1264
Fax +49 (0) 3727 / 58 1178

© Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Technikumplatz 17
D-09648 Mittweida

All rights reserved

ISSN 1437-7624

SCIENTIFIC REPORTS

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE



Journal of the University of Applied Sciences Mittweida
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida

Lasertechnik/Photonik



Nr. 2, 2012
ISSN 1437-7624

22nd International Scientific Conference Mittweida
Oktober 24-25, 2012



**Laser- und Fertigungstechnik,
Produkt- und Prozessentwicklung**

Impressum:

Herausgeber:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Der Rektor
Prof. Dr. phil. Ludwig Hilmer
Der Prorektor für
Forschung und Entwicklung
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Thiem

Redaktion dieser Ausgabe:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Tagungsgruppenleiter
Prof. Dr.-Ing. Horst Exner
Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel
Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Steiger
Prof. Dr. rer. nat. Andreas Fischer
Prof. Dr.-Ing. Udo Löschner
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa

Postanschrift:

Hochschule Mittweida
University of Applied Sciences
Referat für Forschung
Postfach 1457
D-09644 Mittweida

Erscheinungsweise: unregelmäßig

Druck: WIRmachenDruck GmbH

Schutzgebühr: 15 €

Die Scientific Reports /Wissenschaftliche Berichte als Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH) University of Applied Sciences lösen die bisherigen Scientific Reports mit allen Volume I- III ab und erscheinen mit Nr. 1, 1998 ab November 1998 in neuem Layout und in neuer Zählung

Bisher 2012 erschienen:

Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen Nr. 1, 2012

Die IWKM 2012 erscheint in den Bänden:

Lasertechnik/Photonik Nr. 2, 2012
Effizienzorientierte Prozessentwicklung Nr. 3, 2012
Bauteilprüfung/Bruchmechanik Nr. 4, 2012
Umformtechnik
Design and Calculation
Lärminderung und Lärmwirkung Nr. 5, 2012
Drahtlose Sensor-Aktor-Netzwerke Nr. 6, 2012
International Workshop on Online Teaching Initiatives Nr. 7, 2012

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Two beam ND3+-YAG Laser with side quasi-homogeneous Diode Pumping for Welding of heterogeneous metal Materials	3
Oleg A. Abrosimov, Anton V. Gorechiy, Andrey B. Yastrebkov, Mikael M. Zarubin Ryazan State Radio Engineering University, RU	
Corrosion Behavior of Laser and TIG welded Austenitic Stainless Steels 316L in Lithium bromide	6
Ahmed Abd El-Aziz ^{1,2} , Ahmed Momtaz ¹ , Anke Klingner ¹ , Jan Drechsel ³ , Horst Exner ³ ¹ German University in Cairo, Materials Engineering Department, EG; ² Department of Physical Chemistry, National Research Centre (NRC), Giza, EG; ³ Hochschule Mittweida	
Status and progress of European FP7 Project of LIFT – Leadership in Fibre Laser Technology	10
Udo Klotzbach, Fraunhofer Institute Material and Beam Technology Dresden	
Neue Freiheitsgrade für anspruchsvolle Faserlaserprozesse	12
Thomas Kimme, Dominique Bauch, Jens Dunger, Fabian Güttler, Lutz Hirthe Laservorm GmbH, Altmittweida	
Hochrate-Laserbearbeitung – Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten.....	16
Udo Löschner, Lars Hartwig, Frank Ullmann, Robby Ebert, Horst Exner Lasereinstitut der Hochschule Mittweida	
Hochgeschwindigkeitslaserschneiden dünner Bleche für Anwendungen im Elektroantrieb	23
Daniel Szczepanski, Sven Jüttner, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, IWF	
Nanopartikelbildung bei der Laser-Remote-Bearbeitung von Metallen mit hochbrillanten Strahlquellen	27
Tobias Scholz ¹ , Klaus Dickmann ¹ , Andreas Ostendorf ² ¹ Laserzentrum FH-Münster (LFM), Steinfurt; ² Laseranwendungstechnik, Ruhr-Universität Bochum	
Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsschweißen mit brillanter Laserstrahlung.....	31
Udo Löschner, Sascha Schwind, Lars Hartwig, Frank Ullmann, Horst Exner, Peter Hübner, Andreas Eysert; Lasereinstitut der Hochschule Mittweida	
Werkstoff- und fügetechnische Herausforderungen der Reformersystemfertigung für die Brennstoffzellentechnik	37
Thomas Ebersbach, Jürgen Vester, Sabine Sändig, Simon Jahn Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH Jena	
Mikroproduktion im Laserfokus: Mikrobearbeitung mit UKP-Lasern.....	41
Severin Luzius, Marc Sailer, Jan Wieduwilt, Matthias Busch, Christof Siebert, Birgit Faisst TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH Ditzingen	

Inhaltsverzeichnis

Mikrolaserauftragsschweißen zum Erzeugen von Funktionsflächen mittels Schweißgel	44
Dieter Fischer, SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz	
Erhöhung der Baurate beim Micro Cladding durch gezielte Mikrostrukturierung.....	48
Martin Erler, Robby Ebert, Sascha Klötzer, Horst Exner Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Hochschule Mittweida	
Mikrostrukturierung von Stahl mit Piko- und Femtosekundenlaserpulsen	52
Peter Lickschat, Jörg Schille, Steffen Weißmantel, Hochschule Mittweida	
Simulation der Temperaturfelder in Festkörpern infolge der Bestrahlung mit ultrakurzen Laserpulsen im Piko- und Femtosekundenbereich	56
Andreas Fischer, Peter Lickschat, Hochschule Mittweida	
Erzeugung periodischer Mikro- und Submikrometerstrukturen auf Kunststoffoberflächen	60
Denise Langheinrich ¹ , Sebastian Eckhardt ² , Andrés F. Lasagni ^{1,2} ¹ Fraunhofer IWS, Dresden; ² Institut für Fertigungstechnik, TU Dresden,	
Materialspezifische Effekte und Limitierungen bei der Mikrostrukturierung mit ps-Laserstrahlung und Scanneroptik	64
Jens Hildenhagen, Marco Smarra, Klaus Dickmann Laser Center (LFM), Muenster University of Applied Sciences, Steinfurt	
Untersuchungen zur selektiven Magnetisierung von spintronischen Schichtsystemen mittels Laserstrahlung	68
Isabel Berthold, Mathias Müller, Sascha Klötzer, Robby Ebert, Horst Exner Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Hochschule Mittweida	
Laserpulsabscheidung von metallischen Schichtstapeln	72
Johannes Maus ¹ , Steffen Weißmantel ¹ , Günter Reiß ² ¹ Hochschule Mittweida, ² Laserinstitut Mittelsachsen e.V.	
Anwendung von ta-C Schichten bei der spanenden Bearbeitung	76
Stefan Scholze, Eckhard Wißuwa, Katja Günther, Steffen Weißmantel Hochschule Mittweida	
Gepulster Faserlaser mit einstellbaren zeitlichen Parametern.....	81
Stefan Mauersberger, Bernhard Steiger, Hochschule Mittweida	
Kopplung eines chromatischen Sensors an eine Pikosekundenlaseranlage zur Vermessung generierter Mikrostrukturen	85
Marco Smarra, Jens Hildenhagen, Klaus Dickmann Laserzentrum FH Münster (LFM), Steinfurt	

Inhaltsverzeichnis

Development and Application of Polymer photonic Sensors and Devices..... 88

Patricia Scully^{1,2}, Mohammed Akmez Nabeerasool^{1,2}, Phyllis Fiadzomor^{1,2},
John Vaughan^{1,2}, Nurgie Nurgiyatna³, Christine Brown-Wilson⁴,
Med Benyazzar¹, Bruce Grieve³, Krikor Ozanyan^{1,3}

¹Photon Science Institute,

²School of Chemical Engineering and Analytical Science,

³School of Electrical and Electronic Engineering,

⁴School of Nursing, Midwifery and Social Work

The University of Manchester, UK

Laser patterning of organic LEDs..... 90

Tino Petsch, Jens Hänel, Bernd Keiper, Maurice Clair, Christian Scholz

3D-Micromac AG, Chemnitz

Untersuchung zum Abtragsverhalten von optischen Gläsern mittels UKP-Laserstrahlung 93

Sebastian Wächter¹, Jan Giesecke¹, Maria Friedrich¹, Manuel Harrandt¹,
Christian Schindler², Jens Bliedtner², Volkmar Giggel³

¹ifw - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH, Jena;

²Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, FB SciTec, Jena;

³Carl Zeiss Jena GmbH

3D-Mikrostrukturierung von Quarzglas mittels Femtosekunden-laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen 97

Andy Engel, Manuel Pfeiffer, René Böttcher, Steffen Weißmantel

Hochschule Mittweida

Fluorlasermikrostrukturierung diffraktiver optischer Elemente in Quarzglas 101

Michael Pfeifer, Falko Jahn, Steffen Weißmantel, Bernhard Steiger

Hochschule Mittweida

Numerische Simulationen an realen DOE-Strukturen 105

Markus Olbrich, Andreas Fischer, Bernhard Steiger

Hochschule Mittweida

TWO BEAM ND3+-YAG LASER WITH SIDE QUASI-HOMOGENEOUS DIODE PUMPING FOR WELDING OF HETEROGENEOUS METAL MATERIALS

Oleg A. Abrosimov, Anton V. Gorechiy, Andrey B. Yastrebkov, Mikael M. Zarubin
Ryazan State Radio Engineering University, Gagarin Str. 59/1, 390005, Ryazan

It is offered original design of the two-beam laser with independent control parameters of laser radiation in each beam for welding of heterogeneous metallic materials. In this case it is proposed to use the crystals with a cross-section in the triangular shape with the aim of improving the efficiency of solid-state laser action with side diode pumping on the main mode of the resonator. It is offered also a method for calculation of the optimal concentration of neodymium ions in the active element with a triangular cross-section.

1. Introduction

There are well-known problems at laser welding of dissimilar materials, which are associated with a different of the coefficients of thermal diffusivity and the inability to selecting the parameters of pulse of laser radiation which will melt various materials at different depths. It leads to a poor quality of welding or its total absence.

The depth of heat penetration in during a some time t approximately determined by the expression [1]:

$$D=(4Kt)^{1/2}, \quad (1)$$

where D is the depth of heat penetration and K is the coefficient of thermal diffusivity.

The ratio of (1) leads to the notion of thermal constant time τ , which for the sheet thickness x is equal $\tau=x^2/4K$. The value of this constant characterizes the duration of the laser pulse, necessary in order to ensure the desired depth of heat penetration. In order to ensure the effective melting of metallic samples on the selected depth, the duration of the laser pulse should be approximately equal to of thermal constant time of this sample. The constant is different for various materials and therefore for the laser welding of heterogeneous materials should be used two beam from different lasers with independent control the parameters for each of the laser beam.

However if you will use two parallel located active rods in a single resonator and you will to control independent way the intensity and duration of the pulse pumping of each the active elements, then the output radiation of such laser will has a two near located beams. In this case there is an opportunity of independent control the parameters of each beam.

2. Pricipal scheme two-beam DPSS laser for welding of heterogeneous metallic materials

The principal scheme of such laser with a side diode pumping for welding of dissimilar materials are presented in figure 1.

We are developed the original construction of a two-beam DPSS laser with independent control parameters of two-beam laser radiation.

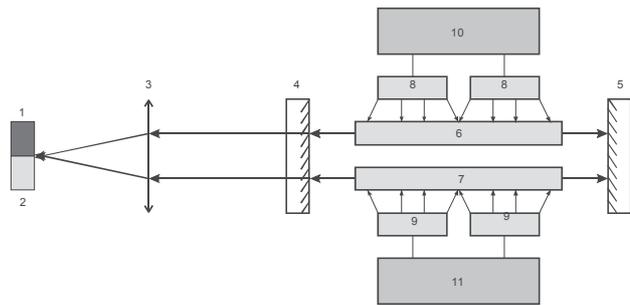


Fig. 1: Principal scheme of action of the two-beam pulse-repetition DPSS laser.

1, 2 - heterogeneous metal samples, 3 - focusing lens, 4,5 - resonator mirrors, 6,7 - active rods, 8,9 - diode bars, 10,11 - power supplies of diode bars.

3. Using of active elements with triangular cross-section

In paper [2] it is suggested to use the effect of full internal reflection for improving the homogeneity of the side diode pumping for a single-beam solid state laser. Here, we propose to use the crystals with a cross-section of a triangular shape with the aim of improving the efficiency of a two-beam solid-state laser with side diode pumping when acting in the lower-order modes of the resonator. In this case, the effect of total internal reflection allows to increase the intensity of the pumping in the middle part of active medium and, therefore, the gain in the central part of the crystal can be practically the same as near of the side surface (at the optimal concentrations of active ions). The results of calculations as well as some experimental results are considered in the present paper.

It is known, that the use of the transverse diode-pumping of solid-state lasers is the most accessible from the point of view of simplicity of the laser device. However, achievement an effective and homogeneous optical pumping in cross-section of such lasers is a big problem because of the high coefficient of absorption of active medium at the wavelengths of pumping. The homogeneity of optical pumping increases when using symmetric double-sided transverse diode pumping, but in this case, the gain in the middle part of the cross-section (along the axis of the resonator) is lower than that on the periphery. This situation leads to inefficient use of the resonator at action on the lower-order modes.

Therefore, the side diode pumping of crystals of traditional form (with rectangular or round cross-

section) is more effective at acting in the multimode regime due to the fact that the gain in the middle part of the crystal is lower than near its lateral surface. Calculations were made for a single-sided optical diode pumping of crystals of the triangular shape with regard for the effect of total internal reflection and the effect of saturation of active medium (a divergence of diode radiation was not considered). Results of calculation presented in Fig. 2 from which the advantages of a triangular cross-section of crystals are obvious.

Figure 2 shows that the distribution of the intensity of the pump radiation for the cross-section of the active element is significantly different for crystals with cross-section of a square (a) and a triangle (b) forms. The calculations were carried out for same the characteristics of the pump radiation and of the parameters of the active medium for correct comparison.

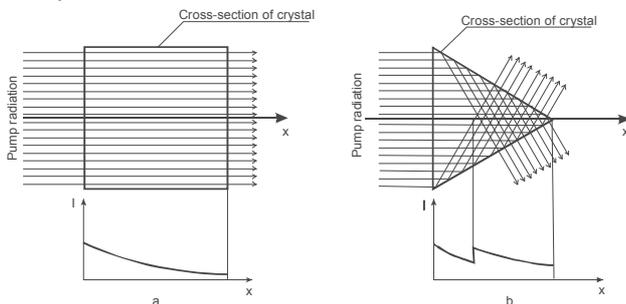


Fig. 2: Comparison of the intensity of pump radiation inside the crystals of various forms.

On the basis of the performed calculations can be made the following conclusions: the using of a crystal of a triangular cross-section together with a side diode pumping allows to

- increase the efficiency of solid-state laser with a side diode pumping at action on the lower-order modes;
- improve the homogeneity of the laser beam in the plane of its cross-section;
- improve the optical efficiency of a diode pumping due to reduction of losses of the pump radiation because of the effect of total internal reflection from the side surface of the active element;
- increase the specific energy output of laser radiation.

4. Definition of the optimal concentration of neodymium ions in the active element with a triangular cross-section

The condition of invariable intensity of optical pumping cannot be performed in the case a single-sided optical diode pumping for the rods of rectangular and round cross-section. However, in the case when the cross-section decreases in the direction of propagation of pump radiation, reducing it can compensate for the decrease in the energy of pump radiation due to absorption, as the intensity of I is determined by the expression:

$$I = E/St. \quad (2)$$

Here E is a pulse energy of pump radiation, t - duration of pulse pumping of the active element, S - cross-sectional area of the beam pumping.

In our case, the cross-sectional area of the beam pumping decreases, and the radiation of pumping not leave of the active element at propagation along OX axis due to the effect of total internal reflection. The radiation of pumping may only be reflected from its lateral sides (Fig. 3), thereby increasing the intensity of the pumping along the OX axis.

Let us suppose that at the initial moment of time at the border of the active element falls pump radiation with power of $P(0) = E(0)/t$. Then, on conditions that the cross-sectional area of pump radiation from a diode stack correspond to the area of the lateral side and this area is equal to $S(0)=bl$, where l is the length of the facets of a crystal, and b is the width, the initial intensity of the pump radiation is equal to $I(0) = P(0)/S(0)$. The cross-sectional area of the crystal will be reduced by the value $dS=2dy/l$ and will be equal to $S(dx) = S(0) - 2dy/l$ at propagation of the pump radiation along the OX axis on the distance dx .

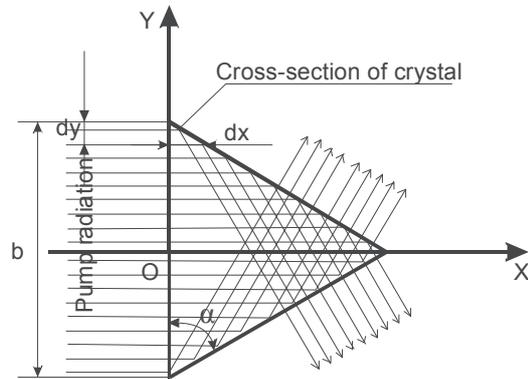


Fig. 3: Illustration of the calculation of the optimal concentration of neodymium ions in the active element with a triangular cross-section.

The power of the pump radiation decreases in this section in accordance with the Bouguer law to the value $dP=\alpha_0 P(0)dx$, where α_0 - linear coefficient of absorption and power will be equal to $P(dx) = P(0) - \alpha_0 P(0)dx$. The condition of constant pump intensity along the OX axis is defined by the expression:

$$I(0) = I(dx). \quad (3)$$

We deduce the following expression if $dy=dx/tg\alpha$:

$$P(0)/S(0)=P(0)(1-\alpha_0 dx)/S(0)(1-2dx/b/tg\alpha) \quad (4)$$

It is clear that, to fulfil the condition (3) it is necessary to comply with a condition

$$\alpha_0=2/b\,tg\alpha. \quad (5)$$

It is known that the activation of neodymium ions yttrium aluminum garnet to the level of 1% (atomic percent) is equivalent to the value of the coefficient of linear absorption equal $\alpha_0 \approx \sigma N_a(1\%)=8...9 \text{ cm}^{-1}$. The coefficient of linear absorption will be equal to $\alpha_0 = 4,8...5,4 \text{ cm}^{-1}$ when the concentration of neodymium atoms is equal to 0.6%. Then, if $\alpha=60^\circ$ and $b=0.25 \text{ cm}$ from the expression (5) it follows, that the coefficient of the linear absorption is equal $\alpha_0 = 4,6 \text{ cm}^{-1}$. Therefore, when the concentration of

neodymium ions close to 0,6% we have a practically homogeneous transverse pumping.

In this simplified calculation we did not take into account the effect of the reflection of pump radiation from the lateral side of the crystal and saturation effect, which somewhat reduces the real value of the absorption coefficient. Both effects increase the intensity of the pump radiation on the axis OX.

The expression for calculation of the optimal concentration of neodymium atoms can be obtained from the following formula taking into consideration the effect of saturation:

$$\alpha_0/(1+I/I_s)=2/b \cdot \text{tg} \alpha, \quad (6)$$

where $I_s = h\nu/2\sigma\tau$ - intensity of saturation of the active medium.

Thus, it can be concluded that the use of the active element with a triangular cross-section significantly improves the homogeneity of diode pumping.

Acknowledgements

Special thanks to the German Research Foundation who supplied financial support for this conference and additional thanks to Ryazan Government for financial support of this project.

References

- [1] J. Redi. Industrial application of lasers: translate with English / M: Mir, 1988 – 456 p.
- [2] O. A. Abrosimov, A.B. Yastrebkov, K.R. Al-lakhverdiev. High power Nd³⁺:YAG laser with side quasi-homogeneous diode pumping // Book Abstracts of XIX International Symposium HPLS&A 2012 (in print).

CORROSION BEHAVIOR OF LASER AND TIG WELDED AUSTENITIC STAINLESS STEELS 316L IN LITHIUM BROMIDE

Ahmed Abd El-Aziz^{1,2}, Ahmed Momtaz¹, Anke Klingner¹, Jan Drechsel³, Horst Exner³

¹German University in Cairo, Materials Engineering Department, 11835 New Cairo, Egypt

²Department of Physical chemistry, National Research Centre (NRC), Giza, Egypt

³Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Es wurde das Korrosionsverhalten der Wärmeeinflusszone (HAZ) von Laserstrahl geschweißtem und mit Wolfram-Inertgas (WIG), mit Lithiumbromid in handelsüblicher Konzentration (9,79 M/850g), geschweißtem Stahl ASS 316L untersucht. Die Auswertung erfolgte mit elektrochemischen Methoden und optischer Mikroskopie. Die optische Mikroskopie zeigte, dass Ferrit in der Austenitmatrix als Austenit-Ferrit-Verfestigung gebildet wurde. Weiterhin wurden Körnerverfeinerungen nach dem Schweißen beobachtet. Das Ruhepotential zeigte, dass Laser geschweißte Proben edlere Potentiale als beim WIG-Schweißen hatten. Daher zeigen Laser geschweißte Proben geringere Korrosionströme und Korrosionsraten als WIG geschweißte. Darüber hinaus zeigten Laser geschweißte Proben eine bessere Beständigkeit gegen Lochfraß als beim WIG-Schweißen. Zusätzlich wurden ausgewählte Hemmstoffe, wie Natriumchromat, Kaliumbromat und Natriummolybdat verwendet. Bromat und Chromat zeigten die effizienteste Hemmwirkung.

The corrosion behavior of ASS 316L heat affected zone (HAZ) of laser beam welding and tungsten inert gas (TIG) welding in lithium bromide commercial concentration (9.79 M/850g) was evaluated using electrochemical methods and optical microscopy. Optical microscopy showed that ferrite was formed in the austenite matrix exhibiting austenite ferrite solidification. Furthermore, grains refinements were observed after welding. Open circuit potential displayed that laser welding had more noble potentials than TIG welding. As well as, laser represented lower corrosion currents and corrosion rates than TIG. Moreover, laser showed better pitting resistance than TIG welding. Additionally, selected inhibitors such as sodium chromate, potassium bromate and sodium molybdate were used. The bromate and chromate approved to be the most efficient inhibitors.

1. Introduction

Aqueous solutions of lithium bromide are widely used for most types of heating and refrigerating absorption systems that use natural gas or steam as energy sources [1–3]. Although the promising thermophysical properties of LiBr, it can cause serious corrosion problems on metallic components in refrigeration systems and on heat exchangers in absorption plants [4].

Therefore, new alloys have been developed in order to increase the corrosion resistance of the materials, with substantially greater amounts of alloying elements, as well as special welding processes were selected. Pitting corrosion of these alloys was the major problem causing a failure in different industrial media [5-7].

Many studies have shown that both, mechanical and corrosion resistance, are dependent on the microstructure of the alloy, which is a function of the composition and heat-treatment used [8-13]. The welding procedure strongly alters the microstructure by the heat-treatment, producing local variations in material composition and structures.

The corrosion resistance of the welded metal is lower than that of the base metal [14-19], because of segregation. In fact, the behaviour of the weld deposit is determined by the minimum content of "passivating" elements at a point within the solidified weld metal, generally the dendrite centers, while precipitates of chromium and molybdenum are found in grain boundaries.

Substantial improvement in their passivity can be achieved by using inhibitors. In practice, inhibitors are employed predominantly for corrosion control in closed systems, such as absorption machines, as a cost-efficient alternative to the use of high corrosion-

resistant materials. The effectiveness of any corrosion inhibitor is dependent on the type of metal and properties of the corrosive environment [20, 21].

It is generally accepted [22, 23] that chromate CrO_4^{2-} is an effective corrosion inhibitor, which can passivate metals by forming a monoatomic, or polyatomic oxide film on the electrode surface, not only for iron and steels but also for many other metals and alloys also. But it is also known that although CrO_4^{2-} may passivate by forming insoluble films, it could also promote corrosion acting as a cathodic reactive. However, the main disadvantage of chromates is the toxicity of chromium (VI) oxidation state. Consequently, this has given impetus to search for less toxic alternatives. A logical alternative can be analogue of hexavalent chromium, i.e. molybdate species. Use of inorganic inhibitors (such as CrO_4^{2-} , MoO_4^{2-} and $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$) as alternative to organic compounds is based on the possibility of degradation presented by the last ones with time and temperature.

The aim of this work is to characterize the effect of lithium bromide commercial concentration on the stainless steel grade 316L in three states: base metal, laser welding and TIG welding and to evaluate the performance and efficiency of corrosion inhibitors which are; sodium chromate, sodium molybdate, and potassium bromate.

2. Experimental procedures

The used sample was AISI 316 L stainless steel in 3 different conditions: base metal and HAZ of laser welded, TIG welded. Table 1 shows the chemical composition. Laser and TIG welding processes were used. Details parameters are mentioned else where [8].

Table 1: Chemical composition of ASS 316L

Elements	C	Cr	Ni	Mo	Fe
Composition%	0.02	17.2	10.1	2.1	70.6

The Microstructure of base and welded region heat affected zone (HAZ) was examined by optical microscopy. The ferrite was also measured throughout the stainless steel regions using magnetic balance method.

For the electrochemical tests the surface of the sample was finish by grinding and polishing up to 1 μm . Electrochemical measurements of base and welded samples have been carried out in 9.79M (850g/L) of LiBr solution with and without inhibitors. Sodium chromate, potassium bromate and sodium molybdate were selected as inhibitors. The concentration of the inhibitors was 0.03 M. All Potentials were measured relative to saturated calomel electrode (SCE).

Open circuit potential (OCP) has been measured up to steady state conditions.

Potentiodynamic polarization (PCV) was carried out using a potential scan rate 2 mV/s, a value of $E = -0.3$ VSCE up to 0.3 VSCE, Tafel's regions were selected.

3. Results and discussion

Microstructure investigation

The optical micrographs of base metal and HAZ resulting from welding by laser and TIG are shown in Fig. 1 (a, b). Large difference between the metallography of the HAZ and base metal, as seen the base metal has a fully austenitic structure, where equi-axed austenite grains are visible. However, it is found after welding the grains in the HAZ have become much smaller and more refined due to the application of very high heat and then rapid solidification. Microcracks were appeared in the TIG welding at the beginning of HAZ with the base metal. No cracks have been observed in laser welding.

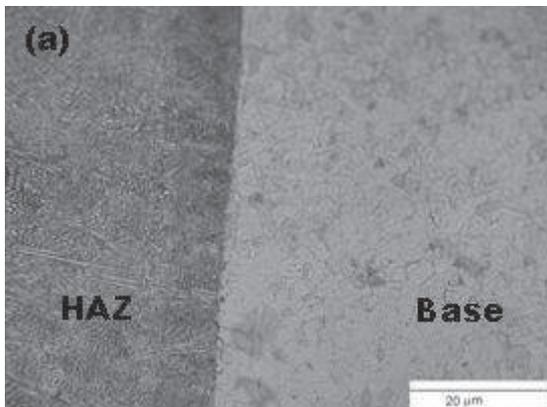


Fig. 1a: Micrograph of laser welding

An interesting phenomenon was noticed in large magnification of HAZ for the laser welding (Fig. 2). Three different sub-grain boundaries are observed:

where an example of each of migrated grain boundary (MGB), solidification grain boundary (SGB) and solidification sub-grain boundary (SSGB) are marked [16-17]. The measurements of ferrite content at HAZ illustrated higher portion of δ Ferrite in laser than in TIG welding probably results from the fast cooling rate in laser process which does not offer sufficient time to complete the phase transformation (δ ferrite to γ austenite). The observation of the microstructure may have an impact on the corrosion behaviour of laser and TIG welding. Cracks are a fresh source for initiation of localized corrosion (pitting corrosion). As well as the presence of boundaries and precipitates will decrease the corrosion resistance.

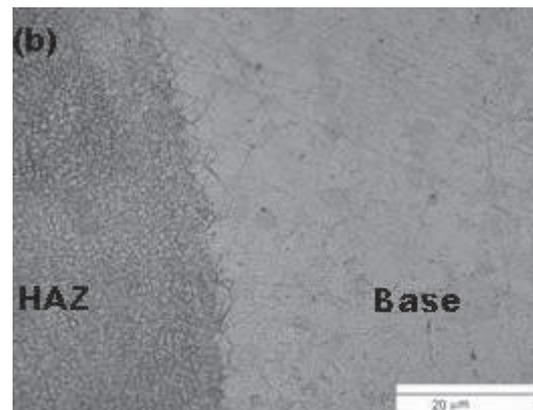


Fig. 1b: Micrograph of TIG welding

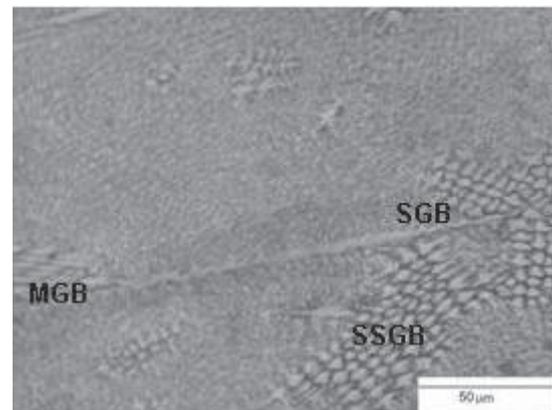


Fig. 2: micrograph of HAZ of laser welding

Electrochemical measurements

The open circuit potential of base metal and HAZ of laser and TIG welding is present in Fig. 3. The open-circuit potential gives us information about the dynamic behavior of the passive oxide layer film, whereas the more positive the value of the OCP, the more noble the specimen becomes. Almost after 90 minute the steady state potentials were reached, where -0.18, -0.16 and -0.21V were obtained for base metal and HAZ of laser and TIG samples respectively. This indicates that the HAZ of laser welding is more passive than base metal and TIG welding. On the other hand, higher tendency for corrosion may occur for base metal and TIG weld. A significant change in the OCP in the presence of inhibitors was obtained. Less negative values of the OCP were recorded, particularly in the presence of

bromate and chromate. The steady state potentials of OCP for base metal and HAZ of laser and TIG welding is shown in Table 2. Again the HAZ of the laser welding sample displayed the less negative (more positive) potential values than base metal and TIG sample, with all inhibitors.

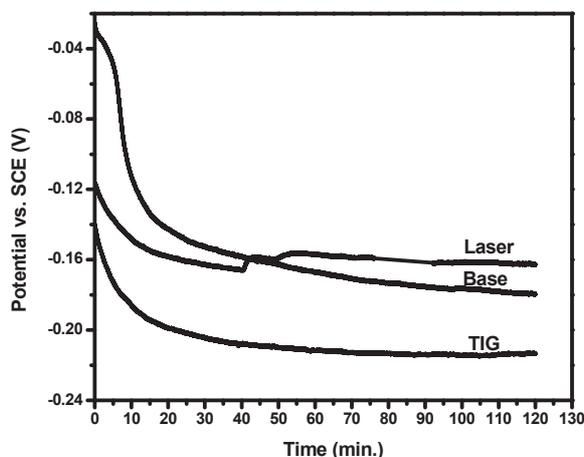


Fig. 3: OCP of base, laser and TIG welding

Table 2: The OCP in presence of inhibitors

Materials	Steady state potentials, V		
	Bromate	Chromate	Molybdate
Base	-0.04	-0.07	-0.1
laser	-0.04	-0.05	-0.06
TIG	-0.09	-0.04	-0.17

The potentiodynamic polarization of base metal and HAZ for laser and TIG welding is present in Fig. 4. From this figure the pitting behaviour can be studied, the most positive potential the highest pitting resistance. As seen the base metal shows the best pitting resistance in comparison to HAZ of laser and TIG welding. Values of 0.25, 0.2 and 0.17V were estimated for base, laser and TIG respectively.

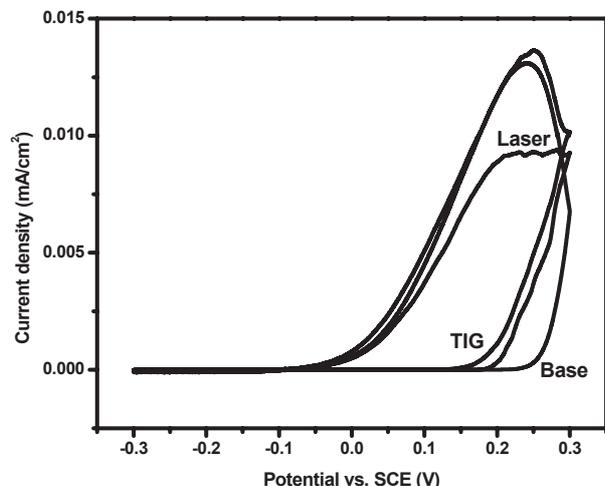


Fig. 4: PCV of base, laser and TIG welding

The corrosion current were also estimated from Tafel's region and then used to calculate the corrosion rates by using the following equation.

$$\text{Corrosion rate (mm/y)} = [i_{\text{corr}} \times M] / [D \times V] \times 3270$$

Where; the corrosion current i_{corr} (A /cm²) is obtained from the Tafel's slope. M is the mass in gram, D is the density in g/cm³, V is the valence of stainless steel.

The corrosion rates of base metal, HAZ of laser and TIG welding are 2.25, 7.75 and 11.17mm/year, respectively.

An improvement is noticed for the corrosion resistance after addition of inhibitors. All inhibitor displayed lower values of corrosion rates for base metal and HAZ for laser and TIG, comparing the case without inhibitors. The corrosion rates are shown in table 3. It is clear that chromate and bromate represent the lowest corrosion rates and therefore highest inhibition efficiency. It was also observed that the presence of inhibitors have increased the size of passivation [8].

Table 3: Corrosion rates in presence of inhibitors

Materials	Corrosion rates, mm/year		
	Bromate	Chromate	Molybdate
Base	0.53	0.28	0.35
laser	0.20	0.35	0.38
TIG	1.20	0.44	1.92

4. Conclusion

1. Optical microscopy reveals that HAZ for laser and TIG welding experience grain refinements. As well as, ferrite became the second phase impeded with fully austenite microstructure. Microcracks were appeared in the TIG welding at the beginning of HAZ with the base metal. No cracks have been observed in laser welding.

2. The open circuit potential tests showed that laser welded samples had more noble potentials than TIG welded sample with and without inhibitors.

3. Bromate and chromate inhibitors have improved the corrosion and pitting resistance for welded and unwelded sample

References

[1] D. Itzhak, T. Greenberg, Corrosion (Houston) 55 (8) (1999) 795–799.
 [2] J.S. Kim, F. Ziegler, H. Lee, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 295–308.
 [3] A.D. Althaus, in: A.D. Althaus, C.H. Turnquist, A.F. Bracciano (Eds.), Modern Refrigeration Air and Air Conditioning, Goodheart-Wilcox, South Holland, 1988, pp. 627–628.
 [4] K. Gilchrist, R. Lorton, R.J. Green, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 847–854.

- [5] A. Igual Muñoz, J. García Antón, S. López Nuévalos, J.L. Guiñón, V. Pérez Herranz, *Corrosion Science* 46 (2004) 2955–2974
- [6] A. Igual- Muñoz, J. García-Antón, J.L. Guiñón, V. Pérez--Herranz, *Corrosion* 59 (7) (2003) 606–615.
- [7] E. Blasco-Tamarit, A. Igual Muñoz, J. García Antón, D. García-García, *Corrosion Science* 48 (2006) 863–886
- [8] A.M. El-Aziz, A.E. el meleigy, N.V. Benohanian, H. Exner, *Egyptian journal of chemistry* 52, 5, (2009)
- [9] A.V. Benedetti, P.L. Cabot, J.A. Garrido, A.H. Moreira, *Electrochimica Acta* 45 (2000) 2187–2195.
- [10] E.A. Abd El Meguid, *Corrosion* 53 (8) (1997) 623–630.
- [11] N. Hara, K. Hirabayashi, Y. Sugawara and I. Muto, *International Journal of Corrosion*, Volume 2012, (2012) 1-6
- [12] D. Tromans and A. Sato, *Corrosion*, 57, (2) (2001) 126-133
- [13] K.H. Lo, C.H. Shek, J.K.L. Lai, *Materials Science and Engineering R* 65 (2009) 39–104
- [14] P.I. Marshall, T.G. Gooch, *Corrosion* 49 (6) (1993) 514–526
- [15] G. Madhusudhan Reddy, A.A. Gokhale, N. Narendra Janaki Ram, K. Prasad Rao, *British Corrosion Journal* 36 (4) (2001) 304–309.
- [16] A.A. Aziz, A.M. Momtaz, A. El Warraky, 15th All-Polish Corrosion Symposium (APCS-2010) “New Achievements in Corrosion Research and Engineering” Poraj, Poland, 24th-26th Nov., 2010
- [17] N.V. Benohanian, A.M. El-Aziz, J. Drechsel, H. Exner, *Journal of the University applied science Mittweida*, 4, (2009), 13-20
- [18] R. Sánchez-Tovar, M.T. Montañés, J. García-Antón, *Corrosion science*, 53, (8) (2011) 2598-2610
- [19] E. Blasco-Tamarit, D.M. García-García, J. García Antón, *Corrosion science*, 53, (2) (2011) 784-795
- [20] D.W. DeBarry, in: A. Raman, P. Labine (Eds.), *Reviews on Corrosion Inhibitor Science and Technology*, NACE, Houston, TX, 1993, p. II-19-1.
- [21] E. Stupnisek-Lisac, A. Gazivoda, M. Madzarac, *Electrochim. Acta* 47 (2002) 4189
- [22] G.O. Ilevbare , G.T. Burstein, *Corrosion Science* 45 (2003) 1545–1569
- [23] A. Igual Muñoz, J. García Antón, J.L. Guiñón, V. Pérez Herranz, *Corrosion science*, 49, (8) (2007) 3200-3225
- [24] M.J. Muñoz-Portero, J. García-Antón , J.L. Guiñón, V. Pérez-Herranz, *Corrosion Science* 51 (2009) 807–819

Corresponding author: Dr. Ahmed Abd El-Aziz
ahmed.aziz@guc.edu.eg

STATUS AND PROGRESS OF EUROPEAN FP7 PROJECT OF LIFT – LEADERSHIP IN FIBRE LASER TECHNOLOGY

Udo Klotzbach

Fraunhofer Institute Material and Beam Technology Dresden, Winterbergstr. 28, D-01277 Dresden

The LIFT project will establish international leadership for Europe in the science, application and production technologies for material processing by fibre lasers through the development of innovative laser sources. Major advances beyond the state of the art are planned: The cold-ablation fibre laser, based on ultra-short pulses, for laser processing of ceramics or photovoltaic application. The high-reliability laser for large-scale manufacturing with High Speed Laser Remote Processing - means a new level of performance for kWatt materials-processing lasers.

The Horizontal integration and networking in Europe's high brilliance laser industry in this project will enable a greater market share for existing applications, create new areas of exploitation for manufacturing, and build a European network of component suppliers, laser manufacturers, universities and research institutes.

1. Introduction

Fibre lasers are a disruptive technology for materials processing. Originating from the low power world of information and communications technology (ICT), these lasers have been developed to meet the most challenging applications in the high power world of material processing. In industrial markets, the fibre laser has many advantages over the conventional CO₂ or solid-state laser. They are smaller, more efficient, have a high beam quality and a lower cost of ownership. The lasers are also resistant against vibrations and dust, and because of their high wall-plug efficiency, air cooling rather than water cooling is often sufficient. Over the typical lifetime of a source, the total cost of ownership of a fibre laser is estimated to be approximately half the cost of a CO₂ laser and a third of the cost of a YAG or disc laser.

In addition to the intrinsic geometry of the optical fibre, innovations in the internal structure of the fibre have been exploited that point the way toward both higher brilliance and higher beam quality. Laser amplifiers using optical fibres with a photonic crystal structure (so-called holey fibres) have unique advantages. Photonic crystal fibres can be designed to support only single mode propagation which gives a diffraction-limited optical beam.

The ability to increase the diameter of the optical fibre while maintaining single-mode propagation can lead to unprecedented levels of optical power, while maintaining near ideal beam quality.

"Laser brilliance" is measured by exactly this combination of high power and high beam quality.

2. Progress beyond the state-of-the-art

A **fibre laser** is a laser in which the active gain medium is an optical fibre doped with rare-earth elements.

Key Performance Challenges:

- CW power greater than 3 000 watts with a mean time between service longer than 50 000 hours

- CW fibre laser sources at visible wavelengths
- Pulsed femtosecond laser sources with peak power greater than 100 kWatt
- Pulsed nanosecond laser sources with pulse energy greater than 10 mJoules
- Pulsed laser source with continuously variable pulse-length and duty cycle or with average power greater than 200 watts
- Diode pump laser package delivering more than 200 watts at 980nm
- Reduction in photo darkening threshold energy by 50%

The state-of-the-art includes 20W average power pulsed lasers, with 0.8mJ per pulse and with an $M^2 < 2$. However, customer demands for increased productivity necessitate higher average powers and higher pulse energies. The output power of single-mode CW lasers reached the 2kW barrier in 2005. The LIFT proposal presents a plan to break through this barrier by disruptive improvements in both reliability performance and beam handing/delivery innovations.

Reliability and Performance

LIFT has emphasized throughout that the pathway to higher brilliance is to design components that can handle higher levels of optical power. However managing the total optical power so that individual components and systems do not suffer damage requires R&D to improve reliability.

- Thermal management
- Degradation reactions provoked by photon energy
- Degradation provoked by the intensity of the optical beam

Higher system reliability increases brilliance.

This topic develops higher reliability by raising the thresholds for optical damage and degradation from optical and thermal effects. This leads directly to higher brilliance, because the laser can generate greater levels of useful optical power without suffering degradation.

To reach this goal, the consortium has defined several objectives:

- Definition for Photo-Darkening & Benchmark study Photo-Darkening in fibres and preforms
- Development of reliable fibre components for high-power; Thermal management of high-power laser diode, power-induced damage Fibre coupling, with attention to thermal stress deformation Reflection protection, including isolators
- The development of fibre components at high-power; high-power failure mechanisms in fibre components, packaging, heat dissipation and thermal stability, Non-linear effects Improved high-power fibre fused components
- Reliability at system level

3. Main objectives for different fibre laser source

Inside the LIFT project we will develop several types of laser sources.

CW fibre laser

Develop CW fibre lasers of high brilliance (near diffraction-limited) in the infrared with output powers in the multi-kW regime for industrial applications:

Develop CW fibre lasers of high brilliance in the visible at new wavelengths with output powers up to 20W for medical applications:

- Wavelengths for specific medical treatments (532nm, 577nm, ~640nm)

Pulsed fibre laser

Develop high-brightness fibre module sub-systems based on common pump laser and fibres, capable of supporting peak powers >200 kW and average powers >200W

Develop three different systems based around these modules

- 10 ns Q-switched system scalable to 1 kW
- Femtosecond (<1 ps) MOPA (master-oscillator amplified system), 200W average power for cold-ablation micro/nano-machining
- Flexible, "all-in-fibre" nanosecond systems with peak power >100 kW for flat-panel and solar cell production

4. Application - optical power on the work piece

The first objective of this work package is to increase the useful optical power at the work piece by at least 150% compared to the state of the art. This will be achieved by innovative beam handling inside the laser so that higher levels of power can be generated, and by innovation in the beam delivery that combines the laser output so that much higher power is delivered to the work piece.

The second objective is to dramatically decrease processing time by harnessing the higher beam brilliance and using this to implement remote high speed laser processing. Remote processing means a much higher laser spot velocity at the work piece by the use of scanning mirrors in combination with long focal lengths. This technology can enable the increase of processing speeds by a factor of 10 – 100 compared to conventional laser processing systems using robotic arms.

The demonstrations evaluate the performance of laser sources and processing systems in highly relevant new applications fields:

- Laser and Process implementation into solar cell production
- Laser medical applications
- Remote cutting of metal sheets
- High speed remote welding

The Evaluation of achievable qualities for different materials, especially high reflective materials and material combinations (photovoltaic, medical automotive) are in the time line of LIFT.

The main goal of the R&D work in beam propagation and scanning head, determinate of possible processing speeds and qualities on the basis of application examples using the laser source demonstrator.

5. Conclusion

The combination of five very complex fibre laser source's with specific components like fibre, diodes, pump combiner, coupler, wavelength doubling, CW and pulse- generation it is a big challenge for all the partners of LIFT. To add this R&D work with new ideas for beam handling systems like "Remote" or "On the fly" for the wide range of application starting with medical application, laser in photo voltaic and on the end welding, cutting of steel is more than a CHALLENGE.

Acknowledgments

Thanks to all partners of LIFT project and the EC for funding this outstanding project.

NEUE FREIHEITSGRADE FÜR ANSPRUCHSVOLLE FASERLASERPROZESSE

Thomas Kimme, Dominique Bauch, Jens Dunger, Fabian Güttler, Lutz Hirthe
Laservorm GmbH, Südstraße 8, 09648 Altmittweida

Moderne Faserlaser bieten Strahlqualitäten "höchster Güte". Für die Laserquelle ist damit üblicherweise eine Fokussierbarkeit bis nahe an das theoretisch erreichbare Minimum gemeint. In praktischen Anwendungen mit toleranzbehafteten Bauteilen, Lagefehlern, dem Bedarf moderater Temperaturgradienten im Bauteil oder ähnlichen Randbedingungen ist diese "höchste Güte" oftmals nicht das Optimum. In der vorgestellten Arbeit wird ein System zur bedarfsgerechten Anpassung der Strahlqualität vorgestellt. Über die Wirkungsansätze der vorschubbewegungssynchronen Beeinflussung von Strahllagemodulation / Fokuslagemodulation, Laserleistungsmodulation und Strahlqualitätsmodulation werden praktische Verbesserungen in verschiedenen Materialbearbeitungsprozessen verfolgt und an Beispielen dargestellt.

1. Einleitung

Die Leistungsdichteverteilung des Laserstrahles auf dem zu bearbeitenden Werkstück stellt eine der wichtigsten Eingangsparameter für Materialbearbeitungsprozesse dar. Soll ein Materialbearbeitungssystem in weiten Bereichen parametrierbar sein, dann sind Lösungen zur räumlichen und zeitlichen Beeinflussung der entsprechend zugeordneten Kennwerte gefragt. Es sind zum Beispiel die Lösungen mit Doppelmantelfasern [1], Optikverschiebungen [2] oder auch Strahlauslenkungslösungen [3] bekannt. Im Hause Laservorm wurde ein allgemeiner Lösungsansatz erarbeitet und beispielhafte Lösungen aufgebaut und getestet. Das System wurde dahingehend konzipiert, dass die Wirkungsansätze

- vorschubbewegungssynchrones Beeinflussen von Strahllagemodulation / Fokuslagemodulation in X, Y, und Z
- Laserleistungsmodulation und
- Strahlqualitätsmodulation

verfolgt wurden.

2. Ziele

Mit dem genannten Lösungsansatz wurden folgende technologischen Ziele verfolgt.

Schweißanwendungen

- Spaltüberbrückung
- Schweißraupengeometriebeeinflussung
- Vorwärmung / Nachwärmung
- Erhöhung des tragenden Nahtquerschnittes bei Durchschweißungen

Härteanwendungen

- veränderliche Härtespurbreite
- Ausgleichen veränderlicher Wärmeableitungsbedingungen

Auftragschweißanwendungen

- veränderliche Spurbreite
- Beeinflussung der Spur-Querschnittsgeometrie
- Steigerung der Produktivität bei gepulsten Auftragschweißungen

3. Lösungen

Strahlformungstechnik

Prinzipiell können zur Strahlmodulation alle bekann-

ten, marktüblichen Systeme oder auch Sonderaufbauten genutzt werden. Dazu zählen z. B. Ein- und Mehrspiegelsysteme mit ein- oder mehreren Freiheitsgraden in der Bewegung, schwingende bzw. linear verschobene Fokussierelemente und rotierende Bauelemente (Keilplatten, Spiegel, ...) und Kombinationen vorgenannter Anordnungen. Solange der Energieeintrag als quasistationär angenommen werden soll, müssen die Bewegungen entsprechend hochfrequent ausgeführt werden. Hier entstehen neben mechanischen Herausforderungen auch Steuerungsanforderungen, die weit über die Möglichkeiten kommerziell erhältlicher NC- und SPS-Technik hinaus gehen - darauf wird im weiteren Verlauf näher eingegangen.

Viele der folgend vorgestellten Bearbeitungsbeispiele wurden mit einem robusten, vor eine typische Bearbeitungsoptik eines Festkörperlasers zu montierenden, Einachsscanner "LV LineScan" realisiert. Beim Entwurf des Systems mit einem klassischen Scannerantrieb wurde auf die Anwendereigenschaften

- leichte Montage
- robuste Handhabung hinsichtlich Optikverschmutzung
- kompakter Aufbau geachtet.

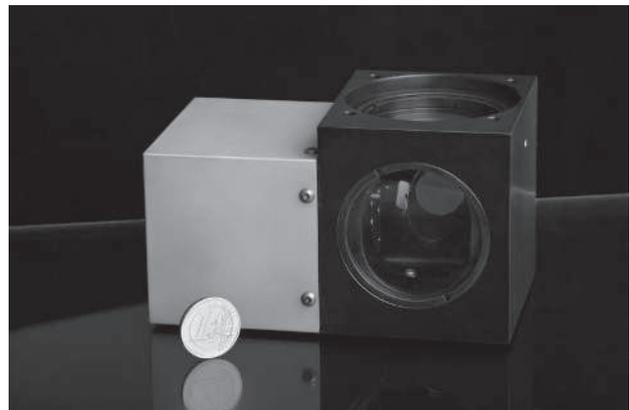


Abb. 1: LV LineScan

Das System ist bis zu mittleren Leistungen von 3 kW bei 100 % Einschaltdauer nutzbar und wurde bisher mit verschiedenen Festkörperlasern in Versuchen aber auch unter harten Industriebedingungen genutzt.

Steuerungstechnik

Die Steuerungstechnik an hochfrequent arbeitenden Strahlformungskomponenten wird heute typischerweise mit Sonderelektronik realisiert. In einer realen Laser-Maschinenlösung wird damit immer öfter ein System aus mehreren Steuerungen genutzt. Begründet wird diese Tatsache darin, dass typische NC- und SPS-Steuerungen in Zyklen von 1 ms "denken" und "handeln", Strahlformungsprozesse aber um den Faktor 10 (oder deutlich höher) schneller arbeiten müssen.

Für optimale technologische Bedingungen sind jedoch langsame Maschinenbewegungen (gesteuert durch die NC), schnelle Strahlformungsbewegungen (heute typischerweise separate Steuerungen) und die Beeinflussung von Laserleistung und Strahlqualität im Lasergerät selbst synchronisiert zu steuern. An dieser Stelle kommt in den bekannten Lösungen der große Nachteil zum Tragen, dass die jeweiligen Steuerungssysteme mit eigenen - nicht synchronisierten - Zykluszeiten arbeiten und es daraus folgend zu nicht beherrschtem Jitter zwischen der Ansteuerung verschiedener prozessbeteiligter Komponenten kommt. Am Markt ist bisher ein System bekannt [4], welches die Scannersteuerung in ein CNC-System integriert.

Der von dem Entwicklungspartner IMM Elektronik und Laservorm im Rahmen eines FuE-Projektes verfolgte und erfolgreich zum Ziel geführte Lösungsansatz ist jedoch etwas anders gelagert:

Es wurde ein offen dokumentiertes und genormtes Echtzeit-Ethernetbasiertes Bussystem [5] mit Jitter unter 1 μ s gewählt und darauf basierend die Möglichkeit geschaffen, verschiedenste Komponenten einer Laseranlage synchronisiert zu betreiben.

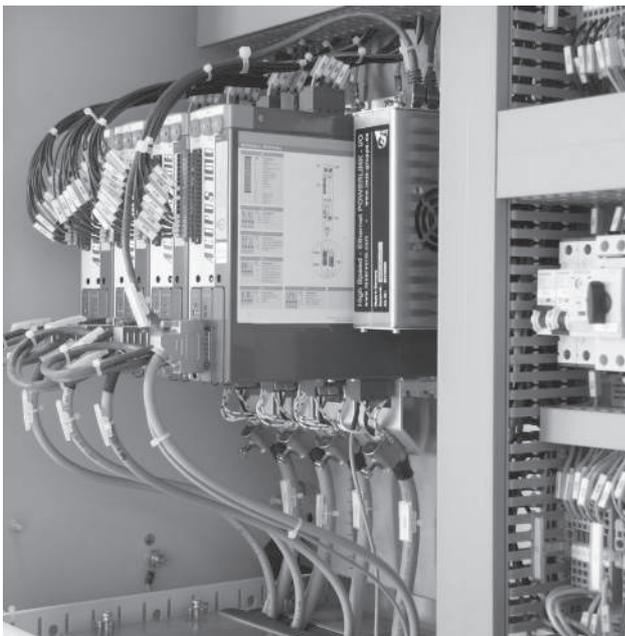


Abb. 2: EPL-HS-MIO im Steuerschrank

Zur Erzielung von Steuerauflösungen bis in den Kiloherzbereich wurde eine FPGA-basierte Elektronikbaugruppe (EthernetPowerlink-HighSpeed-

Multi-IO – EPL-HS-MIO) geschaffen, die Zeitscheiben als Bruchteil des Bustaktes (Teiler 1 bis 32) verarbeiten kann [6]. So können bei einem typischen Bustakt von 0,8 ms Datenpakete (analog und digital) für Steuerfrequenzen bis 40 kHz übertragen und an verschiedenen Busteilnehmern μ s-genau ein- und ausgegeben werden. Eine Synchronisation von z. B. motorischen Achsen, Laserparametern, Scannerparametern und Prozessmesswerten in einer Präzision von 1 μ s ist damit möglich.

4. Ergebnisse aus dem praktischen Einsatz

Das streng synchron betriebene System aus Strahlformungssteuerung (realisiert am Beispiel Einachs-scanner LV LineScan) und Laserparametervorgabe (realisiert am Beispiel Laserleistungsvorgabe) wurde in verschiedenen Technologien genutzt. Nachfolgend werden einige Ergebnisse vorgestellt:

Schweißanwendungen - Spaltüberbrückung

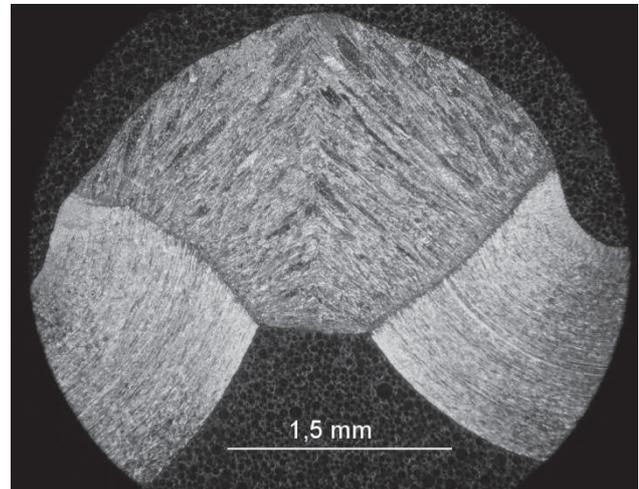


Abb. 3: Bördelnaht – Spalt durch Strahlmodulation quer zur Vorschubrichtung überbrückt

Schweißanwendungen - Schweißraupengeometriebeeinflussung

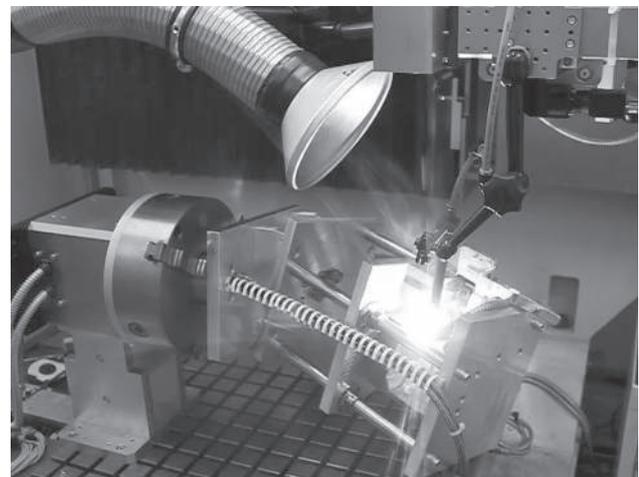


Abb. 4: Schweißvorgang; Energieeintrag und Schmelzbadausbildung werden quer zur Vorschubrichtung beeinflusst

Schweißanwendungen - Vorwärmung / Nachwärmung

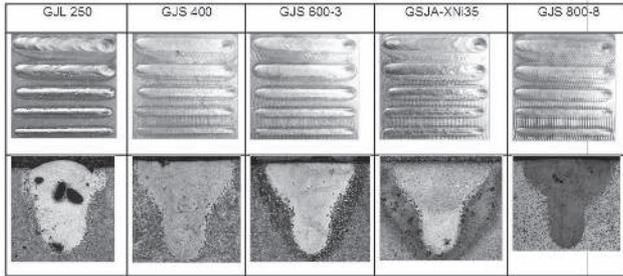


Abb. 5: Gusswerkstoffe mit Strahlmodulation in Vorschubrichtung geschweißt

Schweißanwendungen - Erhöhung des tragenden Nahtquerschnittes bei Durchschweißungen

Bei mit Lasern hoher Strahlgüte ausgeführten Überlappverbindungen wirkt nur die schlanke Nahtbreite als tragender Querschnitt. Eine langsame Modulation quer zur Vorschubrichtung kann dann den tragenden Querschnitt deutlich erhöhen.

Härteanwendungen - veränderliche Härtespurbreite

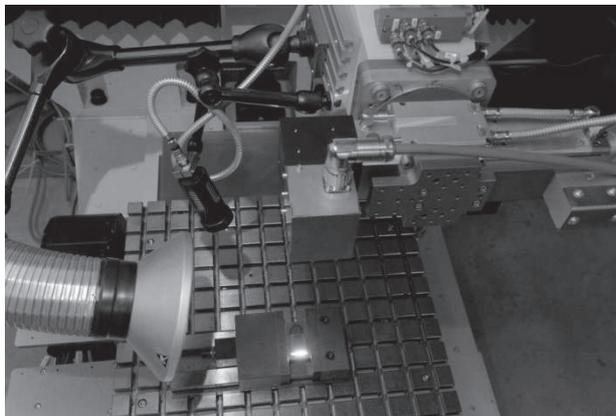


Abb. 6: Prozess Breitspürhärten

Härteanwendungen - Ausgleichen veränderlicher Wärmeableitungsbedingungen

Auftragschweißanwendungen - veränderliche Spurbreite

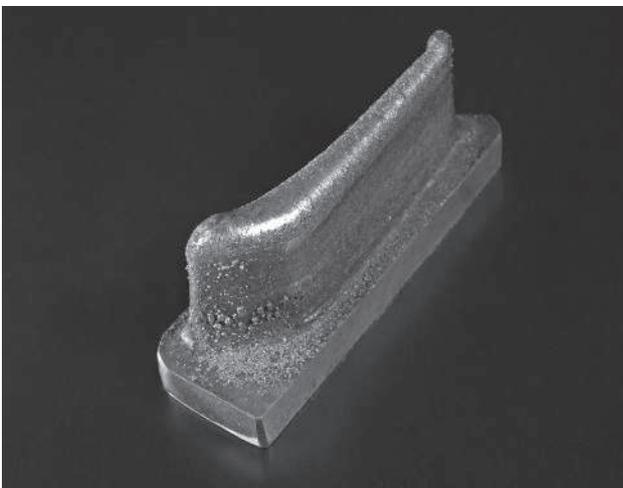


Abb. 7: Pulverauftragschweißen mit veränderlichen Spurbreiten - Turbinenschauflerprofil

Auftragschweißanwendungen - Beeinflussung der Spur-Querschnittsgeometrie



Abb. 8: Prozess Laserauftragschweißen – mehrere Spuren werden gleichzeitig erzeugt

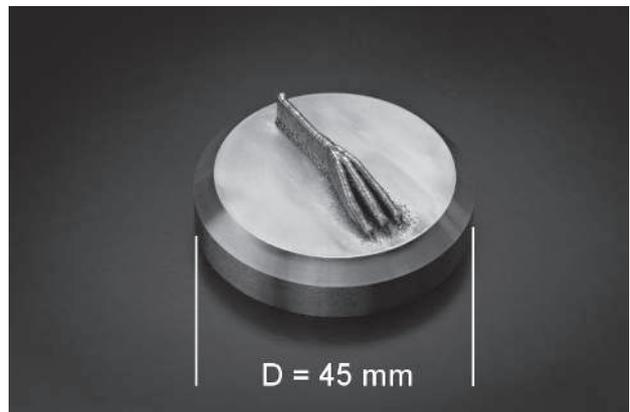


Abb. 9: Laserauftragschweißen mehrerer gleichzeitig erzeugter Spuren mit LV LineScan



Abb. 10: Laserauftragschweißen mehrerer gleichzeitig erzeugter Spuren mit LV LineScan

Auftragschweißanwendungen - Steigerung der Produktivität bei gepulsten Auftragschweißungen

Bei gepulsten Auftragschweißungen an thermisch sensiblen Bauteilen muss die Wärme zwischen den einzelnen Schweißpulsen abströmen können – in diesen Pausenzeiten kann an anderer Stelle des gleichen Bauteils gepulst geschweißt werden.

Beispiele für Produkte, in denen die vorgestellte Technik zum Einsatz kommt:

Die vorgestellten Lösungen sind bisher in verschiedenen Strahlformungs- und Leistungsmodulations-

anwendungen eingesetzt worden. Die besten technologischen Freiheitsgrade sind dann gegeben, wenn das Steuerungssystem aus Laserquelle, motorischen Antrieben, Strahlformungskomponenten und Sicherheitstechnik über ein synchron betriebenes Steuerungssystem bedient werden. Dieses ist in den beiden folgend aufgezeigten Serienmaschinen realisiert.



Abb. 11: 4-Achs-NC-Anlage LV Mini



Abb. 12: 5-Achs-NC-Anlage LV Midi

Die Lösungen könnten auch auf andere Technologien übertragen werden (wie z. B. Elektronenstrahltechnik).

5. Ausblick

Die Möglichkeiten der EPL-HS-MIO können nur mit geeigneter Software in der übergeordneten NC bzw. SPS voll erschlossen werden. So sind z. B. Softwareverbesserungen in Richtung kombinierter Bedienung digitale/analoge Signale z. B. für die Hybridsteuerung Leistungsmodulation über Pulsweitenmodulation und Analogmodulation in Arbeit.

Höhere Frequenzen (Faktor 2 bis 8) sind technisch vorstellbar, würden aber eine Hardwareüberarbeitung der EPL-HS-MIO erfordern.

Danksagung

Teile der hier vorgestellten Lösungen wurden in nachfolgend aufgeführten Förderprojekten erarbeitet:

Wachstumskern FASKAN – Verbundprojekt 3 – Laserfeinschweißmaschine mit Materialzufuhr: Teilprojekt: Entwicklung einer faserlaserbasierten, skalierbaren 3D-Laserfeinschweißmaschine mit Zusatzmaterialzufuhr - Förderkennzeichen 03WKB3A – gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Projekt Laserstrahl-Mehrspot- und Hybridschweißen – Förderkennzeichen KF2211801LL9 - gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Für die Förderung bedanken wir uns.

Literaturverzeichnis

- [1] Trumpf Laser- und Systemtechnik GmbH: Lasersysteme: Jeder Aufgabe gewachsen, Firmenschrift 0376230-40-04-12-St, 04/2012
- [2] Neumann, Günter: VarioClad - Laserauftragschweißen mit variabler Spurbreite, Firmenschrift, 02/2011
- [3] HAFEZ, Moustapha: Compact Fast-Steering Tip/Tilt Scanner For High Power Material Processing Applications, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2000
- [4] Aerotech Inc.: NMark SSaM, Firmenprospekt, 08/2012
- [5] Kirchmayer, Stephan u. a., EPSG - Ethernet POWERLINK Standardisation Group: EPSG Draft Standard 301, Ethernet POWERLINK, Communication Profile Specification, Version 1.1.0, 2008
- [6] LASERVORM GmbH: Integrations- und Betriebsanleitung High Speed - Ethernet POWERLINK -I/O, LV-Dok. Nr.: 1109-90-0001 Rev. 0, 05/2011

HOCHRATE-LASERBEARBEITUNG – POTENTIALE UND ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Udo Löschner, Lars Hartwig, Frank Ullmann, Robby Ebert, Horst Exner
Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Am Laserinstitut der Hochschule Mittweida gelang es 2008 weltweit erstmals, die Lasermikrobearbeitung und die Applikation hoher Laserleistungen durch die Anwendung ultraschneller Strahlablenkungssysteme miteinander zur Hochrate-Laserbearbeitung zu vereinen. Voraussetzung dafür waren die seit kurzer Zeit verfügbaren brillanten Hochleistungslaserquellen sowohl im cw- als auch im Ultrakurzpuls laserbereich. Als Strahlablenkungssysteme kamen neben schnellen Galvanometerscannern auch Resonanz- und Polygonspiegelscanner zum Einsatz.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse zu einem breit gefächerten Spektrum von Hochrate-Laserprozessen, wie dem 2D-Hochgeschwindigkeits-Laserschneiden, dem Hochrate-Laserabtrag und dem Hochrate-Lasermikrosintern vorgestellt, die mit einer Monomode-Faserlaserquelle mit einer Laserleistung von bis zu 3 kW in Verbindung mit schnellen Strahlablenkungssystemen mit höchsten Ablenkgeschwindigkeiten von bis zu 36.000 m/min erzielt wurden. An ausgewählten Bearbeitungsbeispielen werden Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie gezeigt, die sich bereits in naher Zukunft in konkrete industrielle Applikationen umsetzen lassen.

1. Einleitung

Unter dem Begriff „Hochrate-Laserbearbeitung“ sollen Lasermaterialbearbeitungsprozesse verstanden werden, die sich durch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten (m/s), hohe Abtragraten (cm^3/s) oder hohe Flächenraten (cm^2/s) auszeichnen.

Erste Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits-schneiden reichen in die 90er Jahre zurück [1,2]. Feinbleche in Bandform mit Dicken kleiner 0,5 mm wurden mit CO_2 -Lasern mit Geschwindigkeiten von bis zu 300 m/min getrennt. Bei bis zu 0,35 mm dicken Elektroblechen betrug die Schneidgeschwindigkeit 140 m/min. Allerdings ist diese Technologie auf eindimensionale gerade Schnitte begrenzt. Zum schnellen Schneiden von Konturen sind jedoch hochdynamische Systeme erforderlich, die eine schnelle Richtungsänderung bei der Schnittführung ermöglichen. Zunehmend setzt man dafür Laserscansysteme ein, weil durch die vergleichsweise sehr geringen zu bewegenden Massen entsprechend kleinere Beschleunigungs- und Bremskräfte und -wege notwendig und dadurch wesentlich höhere Geschwindigkeiten möglich sind. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes Abtragschneiden, eine Kombinationsvariante aus Sublimierschneiden und Schmelzschneiden. Die Schnittfuge wird durch mehrmaliges Überfahren der Schnittkontur erzeugt, wobei bei jeder Überfahrt nur ein relativ geringer Materialabtrag erfolgt. Als Laserquelle dienen im kontinuierlichen Betrieb emittierende Monomode-Faserlaser, die im Strahlfokus Intensitätswerte von mehr als $10^8 \text{ W}/\text{cm}^2$ liefern können. Beispielsweise lässt sich mit einem Einsatz von 3 kW Laserleistung ein 0,5 mm dickes Edelstahlblech mit 8 Überfahrten mit einer Scangeschwindigkeit von 420 m/min respektive einer effektiven Schneidgeschwindigkeit von 52,5 m/min trennen [3]. Die Schnittspaltbreite beträgt dabei ca. 1/3 der Materialdicke. Ähnliche Ergebnisse werden in [4] gezeigt.

Zur Erzielung einer höheren Resistenz gegen abra-

siven Verschleiß bringt man auf der Oberfläche großer Stahlwalzen eine Texturierung in Form von napfförmigen Vertiefungen von ca. 140 μm mit einem CO_2 -Laser auf [5]. Mit Hilfe eines Polygonspiegel-scanners werden Scangeschwindigkeiten von bis zu 4,7 m/s erreicht.

Von großem Interesse ist auch die oberflächennahe Hochgeschwindigkeits-Strukturierung für die Photovoltaik. An Solarzellen aus kristallinem Silizium wurde mit Hilfe eines Slab-Lasers mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von 10 ns in Verbindung mit einem Galvanometerscanner die Oxidschicht entlang der Fingerstruktur mit einer Scangeschwindigkeit von 7 m/s flächenhaft entfernt [6]. Die prozessierte Fläche betrug 50% der Gesamtgröße eines 5"-Wafers, womit sich eine Flächenrate von 5,6 cm^2/s ergab.

In diesem Artikel werden Ergebnisse zu verschiedenen Hochrate-Laserprozessen im Überblick vorgestellt. Zu den einzelnen Verfahren 2D-Hochgeschwindigkeitslaserschneiden, Hochrate-Lasermikrobearbeitung und -oberflächenstrukturierung sowie Hochrate-Lasermikrosintern wird der aktuelle Forschungsstand aufgezeigt und anhand von Demonstrationsbeispielen verdeutlicht.

2. Experimentelle Details

In den Untersuchungen kam eine im kontinuierlichen Betrieb bei einer mittleren Wellenlänge von 1070 nm arbeitende Monomode-Faserlaserquelle mit einer Laserstrahlausgangsleistung von bis zu 3 kW zum Einsatz. Als schnelle Strahlablenkungs- und Fokussiereinheiten dienten wahlweise ein speziell auf hohe Scangeschwindigkeiten ausgelegter Galvanometerscanner mit leichten SiC-Spiegeln zur schnellen Konturbearbeitung und ein Polygonspiegelscanner mit selbst entwickelter zweiter Ablenkeinrichtung für eine rasternde flächige Bearbeitung, die beide mit f-theta-Objektiven zur Fokussierung ausgestattet werden können. Ausgewählte Kennwerte des optischen Systems sind in Tab.1 aufgeführt.

Brennweite [mm]	230	330
Fokusbrenndurchmesser [µm]	21	30
Scangeschwindigkeit [m/s, m/min]	20 (G) 400 (P)	35 (G) 750 (P)
	1.200(G) 24.000(P)	1.740(G) 34.400(P)
Spitzenintensität (2,5 kW) [10^8 W/cm ²]	14,4	7,1

Tab.1: Kennwerte des optischen Systems:
(G)=Galvanometerscanner, (P)=Polygonspiegelscanner

Die laserintern limitierte Schaltfrequenz von maximal 2 kHz war jedoch nicht ausreichend, um die hohen Laserleistungen und schnellen Scangeschwindigkeiten im Bearbeitungsprozess umsetzen zu können. Um dennoch wesentlich höhere Schaltfrequenzen zu erzielen, wurde eine selbst entwickelte laserexterne schnelle optische Strahlschaltung mit akustooptischen Modulatoren aufgebaut. Aktuell kann das System bis zu 2 kW Laserleistung mit einer Frequenz von 750 kHz schalten. Die Pulslängen reichen bis hinunter zu 500 ns. Dabei lässt die ständige Weiterentwicklung zukünftig höhere Schaltfrequenzen und Laserleistungen erwarten. Zur Ansteuerung der optischen Strahlschaltung wurde eine schnelle Schaltelektronik entwickelt, die Schaltgeschwindigkeiten im MHz-Bereich ermöglicht und zusätzlich eine Synchronisation der Laseraktivität zur Polygonspiegeldrehbewegung bzw. zur Polygonspiegelsegmentposition realisiert. Darüber hinaus kann über ein analoges Spannungssignal die in Richtung Bearbeitungsstelle transmittierte Laserleistung stufenlos eingestellt werden.

Für das Hochrate-Lasersintern wurde die eigenentwickelte Sinterplattform mit Ringrakel verwendet [7].

3. Ergebnisse

2D-Hochgeschwindigkeitsschneiden

Das 2D-Hochgeschwindigkeitsschneiden ist vom Prozess aus gesehen dem Abtragschneiden zuzuordnen und unterscheidet sich damit grundlegend von den klassischen Laserschneidverfahren Laserschmelzschnitten und Laserbrennschnitten. Das Material wird in mehreren Überfahrten sukzessive abgetragen, bis das Material durchtrennt ist. Zunächst wurden Untersuchungen zur Ermittlung geeigneter Parameterbereiche an Edelstahlblech durchgeführt. Abb.1 zeigt stellvertretend die Abtragtiefe in Abhängigkeit der Anzahl an Überfahrten und der Scangeschwindigkeit für eine applizierte Laserleistung von 1,3 kW. Bei allen Scangeschwindigkeiten ist ein nahezu linearer Anstieg der Abtragtiefe mit zunehmender Anzahl an wiederholten Bestrahlungen zu beobachten. Dabei werden die größten Abtragtiefen mit der kleinsten Scangeschwindigkeit erreicht. Höhere Scangeschwindigkeiten bewirken eine sukzessive Abnahme der Abtragtiefe. Stellt man den Bezug zur jeweils wirkenden Strecken-

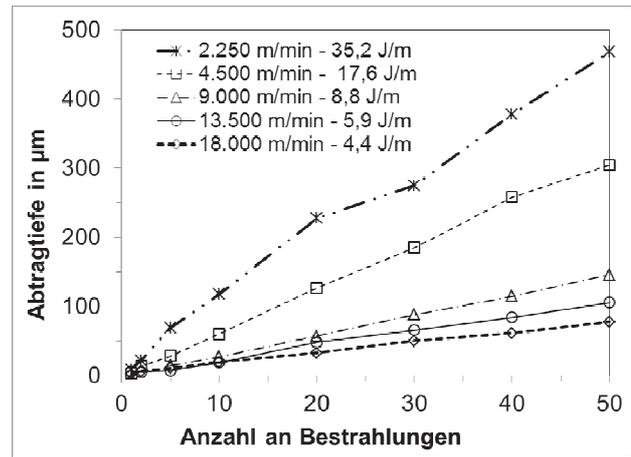


Abb.1: erzielte Abtragtiefen in Edelstahl in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit und der Anzahl wiederholter Bestrahlungen (Parameter: $P_{cw} = 1,3$ kW; $2w_0 = 21$ µm)

energie her, die sich aus dem Quotienten der applizierten Laserleistung und der Scangeschwindigkeit ergibt (vgl. Legende im Diagramm in Abb.1), dann wird deutlich, dass mit steigender Scangeschwindigkeit der Energieeintrag pro Weglänge stetig abnimmt, dadurch weniger Material geschmolzen und verdampft wird und somit geringere Abtragtiefen

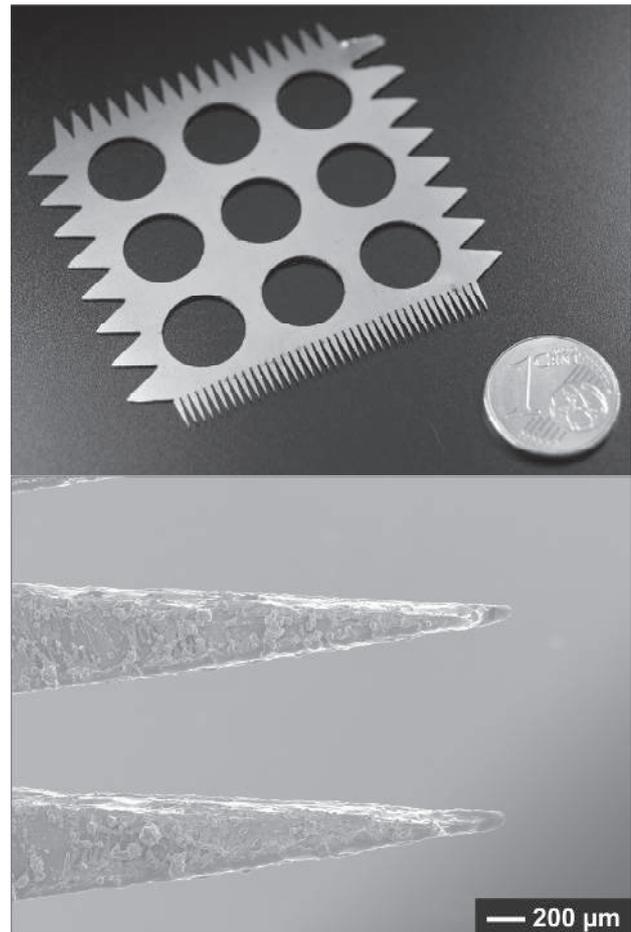


Abb.2: ausgeschnittene Demonstratorkontur aus 0,3 mm dickem Edelstahlblech 1.4301, oben: lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme, unten: REM-Detailaufnahme zweier Mikro-Spitzen mit 11° Spitzenwinkel (Parameter: $P_{cw} = 1,8$ kW; $v = 600$ m/min; $2w_0 = 21$ µm; 10 Bestrahlungen)

entstehen müssen. Dabei sinkt die Abtragtiefe mit zunehmender Scangeschwindigkeit proportional ab, d.h. eine Verdoppelung der Scangeschwindigkeit bedeutet eine Halbierung der Abtragtiefe.

Ausgehend von diesen Ergebnissen sind zunächst Untersuchungen zum 2D-Hochgeschwindigkeits-schneiden von Konturen mit dem Galvanometerscanner durchgeführt worden. Abb.2 zeigt eine Demonstrator-Kontur mit verschiedenen spitzwinkligen Detailkonturen. Die gesamte zu schneidende Konturlänge betrug mehr als 560 mm. Der Demonstrator aus 0,3 mm dickem Blech konnte mit 10 Bestrahlungen in nur 3 s ausgeschnitten werden. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Schneidgeschwindigkeit von 112 m/min, ein Wert, der ungefähr um eine Größenordnung höher liegt, als mit konventionellen hochdynamischen 2D Schneidanlagen bei dieser Kontur möglich gewesen wäre.

Durch eine Optimierung des Schneidregimes konnte der bekannte Effekt des erhöhten Energieeintrags bei Schneidrichtungsänderung an Ecken und die damit verbundenen Qualitätseinbußen durch vermehrte Schmelzbildung und Verrundung der Kontur nahezu kompensiert werden. Dazu wurden dem Bestrahlungspfad an Eckpunkten zusätzliche

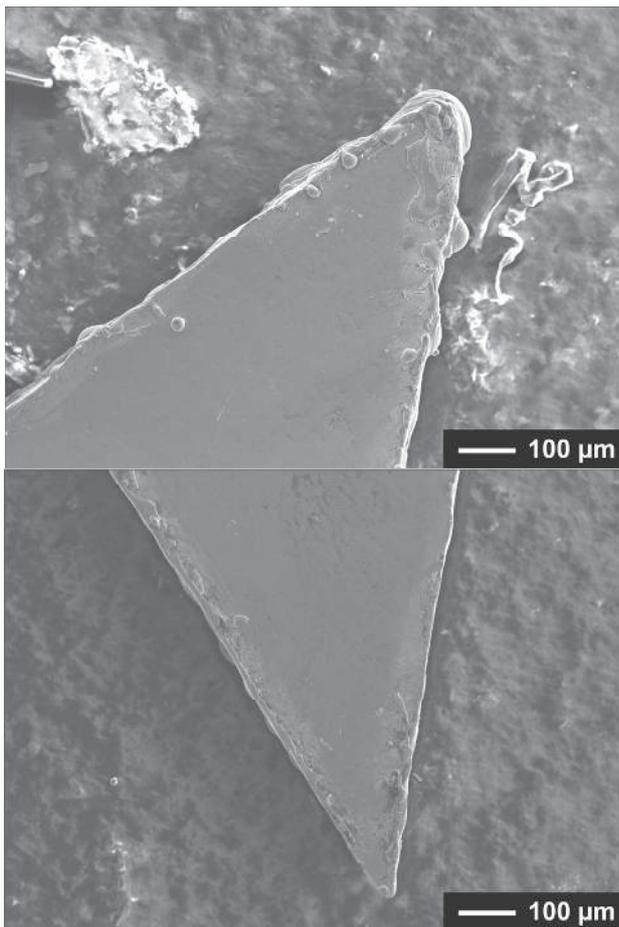


Abb.3: REM-Aufnahme Unterseite einer 40°-Ecke, oben: ohne Beschleunigungsstrecke, unten: mit Beschleunigungs- und Bremsstrecke

Brems- und Beschleunigungsstrecken hinzugefügt, die außerhalb der zu schneidenden Kontur lagen,

s. Abb.3. Der Energieeintrag auf der Nutzkontur blieb somit stets konstant.

Die Schnittkantenqualität beim Abtragschneiden mit schnellem Galvanometerscanner erscheint qualitativ hochwertig s. Abb.4. Die Schmelze wurde zum großen Teil verdampft und der Rest durch den Plasma- druck ausgetragen.

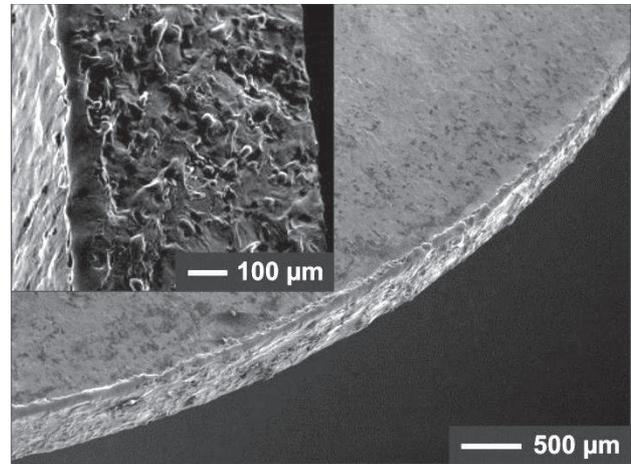


Abb.4: REM-Aufnahme einer mit Galvanometerscanner erzeugten Schnittkante in 0,4 mm dickem Edelstahlblech 1.4301 (Parameter: $P_{cw} = 1,8$ kW; $v = 1.200$ m/min; $2w_0 = 21$ µm; 200 Bestrahlungen)

Bei Anwendung des ultraschnellen Polygonspiegel-scanners 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, vgl. Abb.5.

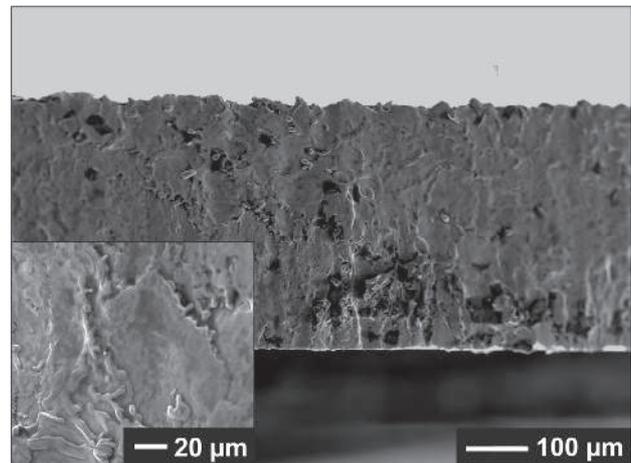


Abb.5: REM-Aufnahme einer mit Polygonscanner erzeugten Schnittkante in 0,4 mm dickem Edelstahlblech 1.4301 (Parameter: $P_{cw} = 1,3$ kW; $v = 9.000$ m/min; $2w_0 = 21$ µm; 200 Bestrahlungen)

Hochrate-Mikro- und Oberflächenstrukturierung

Durch die hohe Brillanz der Laserquelle sind auch bei hohen Laserleistungen sehr kleine Fokusradien möglich, die für die Erzeugung und die erforderliche hohe Auflösung bei Mikrostrukturen Grundvoraussetzung sind. Aus grundlegenden Untersuchungen

zur Charakterisierung des Abtragverhaltens von Edelstahl 1.4301 sind optimale Prozessparameterbereiche für die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und das Bestrahlungsregime identifiziert worden. Als Strahlablenkungssystem wurde der Galvanometerscanner eingesetzt. Um zu demonstrieren, dass man auch mit kontinuierlicher Laserstrahlung kleine Ausdehnungen der Wärmeeinflusszone und damit verbunden Mikrostrukturen mit Abmessungen von wenigen zehn Mikrometern auch bei höheren Laserleistungen erzielen kann, wurde eine Anordnung von Mikrogräben mit einer Tiefe von $70\ \mu\text{m}$ mit 5 wiederholten Bestrahlungen generiert. Der Abstand der Gräben betrug $72\ \mu\text{m}$, die Stegbreiten zwischen den Gräben $57\ \mu\text{m}$, s. Abb.6. Damit ergibt sich ein Aspektverhältnis von 1:4,7. Mit den applizierten Parametern wurde eine Flächenrate von $2,7\ \text{cm}^2/\text{s}$ erreicht.

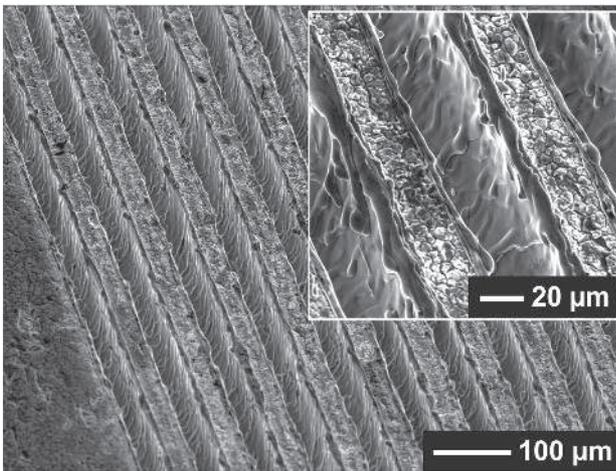


Abb.6: REM-Aufnahme einer Anordnung von Mikrogräben in Edelstahl 1.4301 (Parameter: $P_{\text{cw}} = 880\ \text{W}$; $v = 1.200\ \text{m/min}$; $2w_0 = 21\ \mu\text{m}$; Grabenabstand $72\ \mu\text{m}$; 5 Bestrahlungen)

Untersuchungen mit dem Polygonspiegelscanner mit noch schnelleren Scangeschwindigkeiten bei höheren Laserleistungen bis $2\ \text{kW}$ zeigten, dass der Abtragprozess von starker Plasmabildung begleitet wird. Die Abtragbreite lag dadurch bei $50\ \mu\text{m}$, obwohl der Strahlfokussdurchmesser nur $21\ \mu\text{m}$ betrug, s. Abb.7. Es konnte ein regelmäßiges linienartiges Muster erzeugt werden, das an der Oberfläche eine in Scanrichtung bevorzugt verlaufende Schuppenstruktur ähnlich einer Fischhaut aufwies, wie Abb.7 unten zeigt. Eine solche Fischhauttextur kann strömungsphysikalisch entscheidende Vorteile bringen, wie Studien zur Reduzierung des Strömungswiderstands an haifischhaut-strukturierten Oberflächen belegen [8,9]. Interessanterweise entstanden zwischen den Abtragspuren zusätzlich regelmäßige linienförmige Substrukturen mit einer Breite von nur $5\ \mu\text{m}$. Die Ursachen für beiden Phänomene konnten bis jetzt noch nicht geklärt werden. Die erzielte Flächenrate lag bei $36\ \text{cm}^2/\text{min}$.

Gezielte Untersuchungen zur oberflächennahen Strukturierung wurden durchgängig mit dem Polygonspiegelscanner durchgeführt. Mit optimierten Parametern, d.h. einer Laserleistung von $880\ \text{W}$

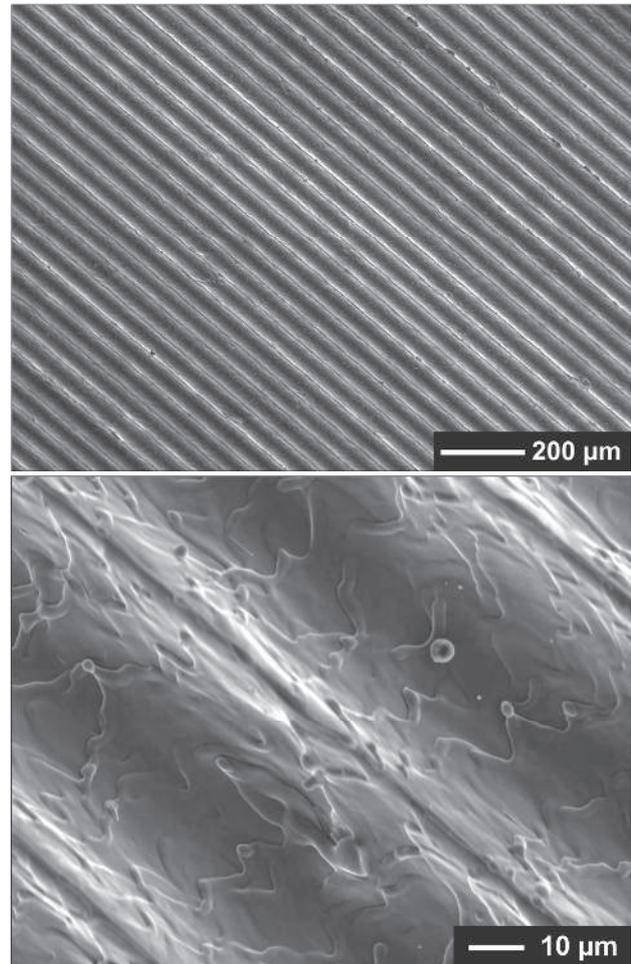


Abb.7: REM-Aufnahmen einer aus einzelnen Spuren bestehenden Textur auf einer Edelstahloberfläche, oben: Übersicht, unten: Detail (Parameter: $P_{\text{cw}} = 1,3\ \text{kW}$; $v = 13.500\ \text{m/min}$; $2w_0 = 21\ \mu\text{m}$; Spurbabstand $50\ \mu\text{m}$; 5 Bestrahlungen)

und einer Scangeschwindigkeit von $9.000\ \text{m/min}$ konnte eine $2\ \mu\text{m}$ dicke NiCr-Schicht mit 2 Bestrahlungen rückstandsfrei selektiv vom Glassubstrat entfernt werden, s. Abb.8.

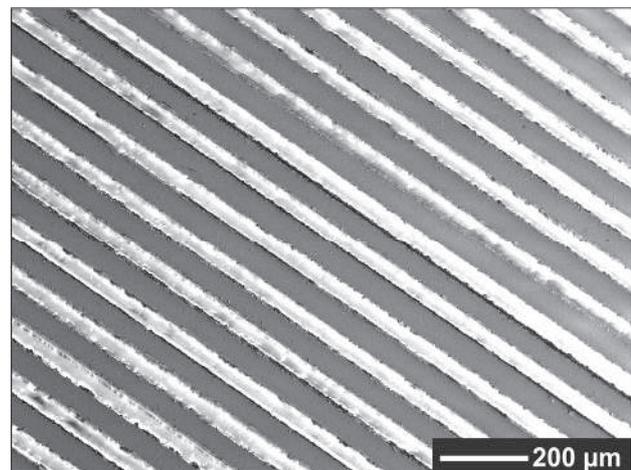


Abb.8: REM-Aufnahme einer selektiv abgetragenen NiCr-Schicht auf Glassubstrat (Parameter: $2w_0 = 21\ \mu\text{m}$; $P_{\text{cw}} = 880\ \text{W}$; $v = 9.000\ \text{m/min}$; Linienabstand $100\ \mu\text{m}$; 2 Bestrahlungen)

Die Schicht wurde auf einer Breite von 60 μm durchgängig abgetragen, so dass das Substrat an den freigelegten Streifen vollständige Transparenz aufwies. Die verbliebenen NiCr-Mikrostege mit einer Breite von 40 μm zeigten nur eine geringe Randbeeinflussung. Die Haftfestigkeit der verbliebenen NiCr-Schicht auf dem Substratmaterial wurde nicht beeinflusst. Die hier unter Laborbedingungen erzielten Flächenraten von 2.500-5.000 cm^2/min für großflächige Mikrostrukturierung sind als extrem hoch einzustufen.

Zur Demonstration einer noch höheren Flächenbearbeitungsrate wurde ein f-theta-Objektiv mit einer größeren Brennweite 330 mm eingesetzt. Die Scangeschwindigkeit ließ sich dadurch auf 36.000 m/min steigern, wobei sich der Strahlfokussdurchmesser nur moderat auf 30 μm vergrößerte. Selbst mit dieser extremen Geschwindigkeit war es möglich, die Passivierungsschicht aus Siliziumnitrid auf einem 6" (156 mm x 156 mm) großen polykristallinen Siliziumwafer, wie er in der Solarindustrie eingesetzt wird, mit einer applizierten Laserleistung von 800 W selektiv abzutragen. Unter Ausnutzung von Prozess-Schwellwerten konnte auch mit dem größeren Fokussdurchmesser eine Spurbreite von ca. 15 μm erzeugt werden, s. Abb.9. Mit dem gewählten Spurbstand von 100 μm wurde eine Flächenrate von 300 cm^2/s bzw. 18.000 cm^2/min demonstriert. Für die industrielle Anwendung müsste eine schnelle und präzise Zu- und Abführung des Werkstückes gewährleistet werden, dann wäre mit dem Verfahren eine hochproduktive Technologie zur Laser-Oberflächenmikro-strukturierung realisierbar.

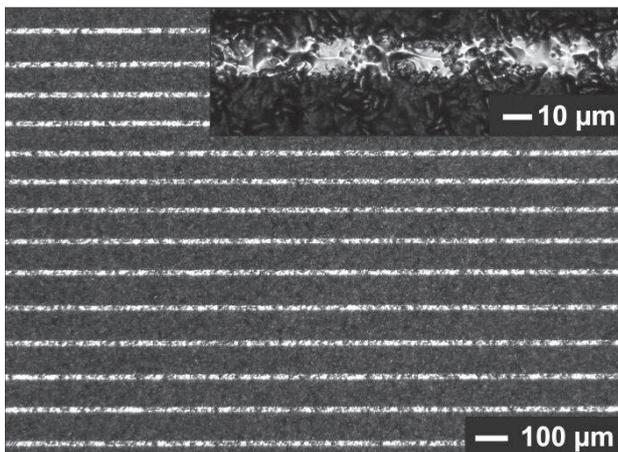


Abb.9: lichtmikroskopische Aufnahme der selektiv abgetragenen Passivierungsschicht auf einem Silizium-Wafer (Parameter: $P_{\text{cw}} = 800 \text{ W}$; $v = 36.000 \text{ m/min}$; $2w_0 = 30 \mu\text{m}$; Linienabstand 100 μm ; 1 Bestrahlung)

Mit ultraschneller Strahlablenkung und schneller Strahlschaltung kann der Laserstrahl innerhalb einer Polygonspiegelsegmentabmessung exakt zu- und abgeschaltet und damit Liniensegmente variabler Länge auf dem Material bestrahlt werden. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Systems wurde ein 3,8 mm langer und 0,6 mm hoher Schriftzug erstellt, dessen Buchstaben mit 32 einzelnen Linien mit einem definierten Linienabstand von 20 μm gefüllt wurden. Der mit einer Scangeschwin-

digkeit von 4.500 m/min in nur 12 ms generierte Schriftzug weist an den Buchstabenkonturen Unschärfen in Bezug auf Beginn und Ende der einzelnen Bearbeitungsspuren in einer Größenordnung von 30 μm auf, die den Schriftzug in Scanrichtung ausgefranst erscheinen lässt, s. Abb.10. Diese Fluktuationen können auf eine zeitliche Unsicherheit von 400 ns in der Ansteuerelektronik als Folge von Diskretisierungsfehlern zurückgeführt werden. Derzeitig laufende Anstrengungen zur Weiterentwicklung der Elektronik lassen eine Reduktion der zeitlichen Unsicherheit auf nur noch 10 ns erwarten.

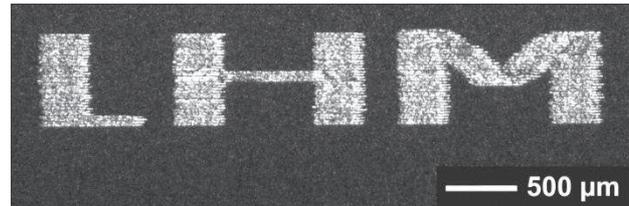


Abb.10: lichtmikroskopische Aufnahme eines Schriftzugs durch selektives Abtragen der Passivierungsschicht auf einem Silizium-Wafer (Parameter: $P_{\text{cw}} = 200 \text{ W}$; $v = 4.500 \text{ m/min}$; $2w_0 = 21 \mu\text{m}$; Linienabstand 20 μm ; 1 Bestrahlung)

Hochrate-Lasermikrosintern

Bei Bestrahlung einer Pulverschicht aus Molybdänpulver der Körnung 3-7 μm wurde beobachtet, dass selbst mit hoher Intensität bei gleichzeitig hohen Scangeschwindigkeiten ein Verschmelzen der Pul-

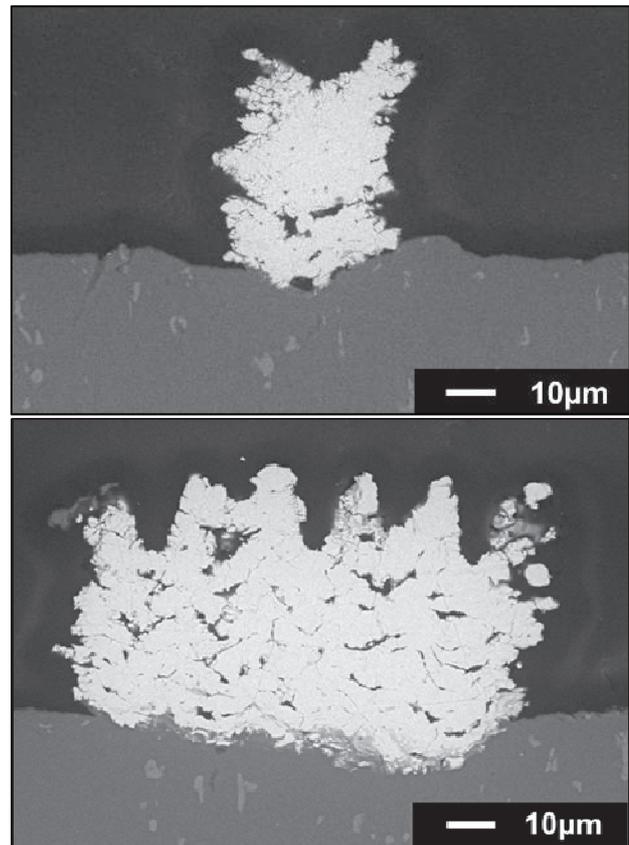


Abb.11: REM-Aufnahmen von Querschliffen; oben: Sinterspur hergestellt mit einer bestrahlten Linie; unten: Sinterspur hergestellt mit 5 bestrahlten Linien im Abstand von 20 μm , (Parameter: $P_{\text{cw}} = 330 \text{ W}$, $v = 9.000 \text{ m/min}$)

verkörner erfolgte. Aufbauend auf diesen Resultaten wurde ein geeignetes Bestrahlungs- und Pulveraufzugregime ermittelt, das einen schichtweisen 3D-Strukturaufbau ermöglichen. Nach jedem Raket- und Sinterzyklus wurde die Bauplattform um 2 μm abgesenkt. Dieser Vorgang wurde insgesamt 50-fach wiederholt. Das Bestrahlungsregime bestand entweder aus einer Einzellinie oder einer Linienanordnung von 5 Linien mit 20 μm Abstand zueinander, vgl. Abb.11.

Mit diesem Regime konnten erste Sinterkörper generiert werden. Erfolgte die Bearbeitung in der Fo-

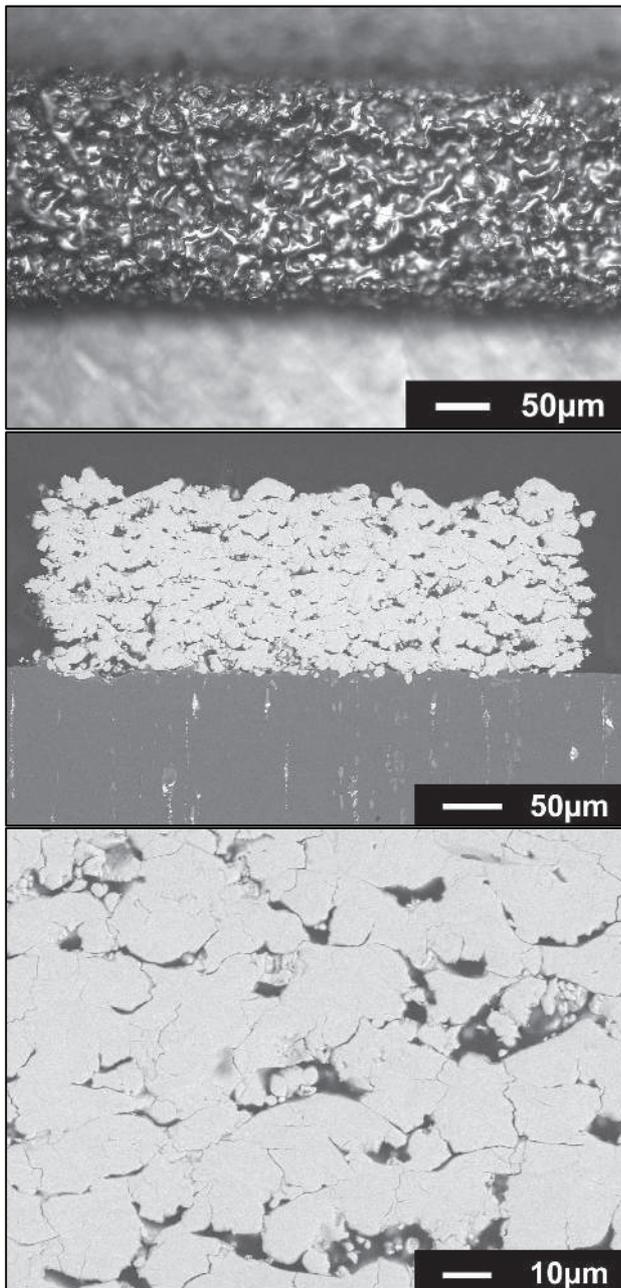


Abb.12: erzeugte Sinterstrukturen aus Molybdän, oben: lichtmikroskopische Aufnahme (Parameter: $P_{\text{cw}} = 1 \text{ kW}$, $v = 9.000 \text{ m/min}$, jeweils 10 Linien mit Linienabstand 20 μm pro Bestrahlung und 1,0 mm Defokussierung); Mitte und unten: REM-Aufnahmen eines Schliffes (Parameter: $P_{\text{cw}} = 665 \text{ W}$, $v = 4.500 \text{ m/min}$, jeweils 25 Linien mit Linienabstand 20 μm pro Bestrahlung und 1,0 mm Defokussierung)

kusebene der Optik mit 230 mm Brennweite mit einem Fokusedurchmesser von 21 μm , bildete sich infolge der hohen Intensität schon bei einer Leistung von 330 W ein deutlicher Einfall auf der Oberfläche in der Mitte der Sinterspur aus (vgl. Abb.11 oben), der durch verdampftes Material entsteht. Bei 5 nebeneinander bestrahlten Linien sind in der Spur an den jeweiligen Linienpositionen Kerben entstanden (Abb.11 unten). Oberhalb einer Laserleistung von 500 W erfolgte kein vollständiger bzw. überhaupt kein Strukturaufbau mehr.

Die schmalste vollständig aufgebaute Einzelspur wurde bei einer Leistung von 330 W bei einer Scangeschwindigkeit von 9000 m/min erreicht und betrug 38 μm . Sie stellt die bisher erreichte Auflösungsgrenze dar.

Mit defokussiertem Laserstrahl wurde der Einfall der Sinterspur deutlich reduziert, bedingt aber eine Vergrößerung des Strahlfleckdurchmessers auf 73 μm bei einem Defokussierungswert von 1 mm. Mit diesen Parametern konnten mit Leistungen oberhalb von 665 W (entspricht einer Intensität von $0,3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$) Strukturen aus Molybdän gesintert werden. In der lichtmikroskopischen Aufnahme in Abb. 12 oben ist die aufgeschmolzene Oberfläche einer Sinterstruktur zu erkennen. Die Querschliffe in Abb.12 Mitte und unten zeigen neben den verbundenen Körnern eine Restporosität. Aus der starken Plasmabildung, die während des Prozesses beobachtet wurde, kann von einem hohen Druck bei der Materialverdampfung ausgegangen werden, der sehr wahrscheinlich zur Verdichtung 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.

Insgesamt bestätigen die ersten Untersuchungsergebnisse, dass mit Hochrate-Lasermikrosinterprozessen dreidimensionale Strukturen mit hohen Baugeschwindigkeiten generiert werden können.

4. Zusammenfassung

Dieser Artikel gibt einen Überblick zu Potenzialen und Anwendungsmöglichkeiten der Hochrate-Laserbearbeitung. Zu Beginn wurden die lasertechnischen Bedingungen und Voraussetzungen kurz umrissen. Die vorgestellte Technologie erlaubt sowohl das Trennen und Abtragen von Material als auch das Generieren von 3D-Körpern aus pulverförmigem Grundwerkstoff.

Beim 2D Hochgeschwindigkeitsschneiden mit Galvanometerscanner können filigrane spitzwinklige Konturen trotz vieler Schneidrichtungswechsel mit hohen Geschwindigkeiten ausgeschnitten werden. Mit Einsatz des Polygonspiegelscanners ließ sich die effektive Schneidgeschwindigkeit für das Trennen deutlich steigern.

Auch Mikrostrukturen mit Abmessungen von einigen zehn Mikrometern können auf diese Weise hergestellt werden. Die Ergebnisse zur ultraschnellen flächenhaften Oberflächenstrukturierung lassen eine

Vielzahl verschiedenster Anwendungsmöglichkeiten erwarten.

Nicht zuletzt wird mit einer Weiterentwicklung des Hochrate-Sinterprozesses auf der Basis der präsentierten Ergebnisse eine schnelle Bautechnologie für dreidimensionale Körper aus Pulvermaterial in naher Zukunft anwendungsbereit sein.

Perspektivisch stehen auch Ultrakurzpulslaserquellen mit entsprechend hohen mittleren Leistungen für Hochrate-Prozesse zur Verfügung, mit denen das Anwendungsfeld in Richtung Hochrate-Mikro- und Nanobearbeitung noch weiter erschlossen werden kann.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem BMBF für die Förderung der Technologieentwicklung (Förderkennzeichen 03IP506 und 03IPT506X).

Literaturverzeichnis

- [1] Preißig, K.U.; Albrecht, J.: „Hochgeschwindigkeitsschneiden von Feinstblechen mit Lasern. Qualitätsverbesserung/High-speed cutting of finest sheet by lasers. Quality improvement“, Zeitschrift Bänder, Bleche, Rohre 33 (1992), No.10, pp.79-88
- [2] Preissig, K.U.; Petring, D.; Herziger, G.: „High speed laser cutting of thin metal sheets“, Laser Materials Processing - Industrial and Microelectronics Applications: 5-8 April 1994, Vienna, Austria. Proceedings of SPIE series 2207, (1994), pp. 96-110
- [3] Zaeh, M.F.; Moesl, J.; Musiol, J.; Oefele, F.: „Material Processing with Remote Technology - Revolution or Evolution?“, Physics Procedia 5, (2010), pp. 19–33
- [4] 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
- [5] Luo, X.; Wangn, Y.; Chen, P; Zhou, L.: „Investigation of CO2 laser beam modulation by rotating polygon“, Optics and Lasers in Engineering 49, (2011), pp.132-136
- [6] Eidelloth, S.; Neubert, T.; Brendemuhl, T.; Hermann, S.; Giesel, P.; Brendel, R.: „High speed laser structuring of crystalline silicon solar cells“, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE, 7-12 June 2009, Philadelphia, PA, USA, pp. 2389-2394
- [7] Regenfuß, P.; Petsch, T.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, Th.; Ebert, R.; Exner, H.: „microSINTERING - Ein Verfahren zur Herstellung metallischer und keramischer Mikrobauteile“, Rapid.Tech, Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid Technologien, Messe Erfurt, 25./26.5.2004, Tagungsband auf CD
- [8] Bechert, D.W.; Bartenwerfer, M.; Hoppe, G.; Reif, W.-E.: „Drag Reduction Mechanisms Derived from Shark Skin“, AIAA'86 15th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences ICAS-86-1.8.3, 1986, pp.1044-1068
- [9] Bechert, D.W.; Bruse, M.; Hage, W.; Meyer, R.: „Biological Surfaces and their Technological Application - Laboratory and Flight Experiments on Drag Reduction and Separation Control“, Naturwissenschaften (2000) 87 pp.157-171

HOCHGESCHWINDIGKEITSLASERSCHNEIDEN DÜNNER BLECHE FÜR ANWENDUNGEN IM ELEKTROANTRIEB

Daniel Szczepanski, Sven Jüttner

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, IWF, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Nicht nur im Bereich des Automobilbaus, sondern in allen Produktionsbetrieben, besteht die starke Nachfrage nach immer dynamischeren, energieeffizienteren und produktiveren Prozessen. Um einerseits immer geringer werdende Taktzeitvorgaben einhalten zu können und andererseits Energie einzusparen, bedarf es neuer Fertigungstechnologien. Durch die Weiterentwicklung der Laserstrahlquellen hin zu höheren Intensitäten und einem höheren Energiewirkungsgrad eröffnen sich neue Prozessfenster bei bereits eingesetzten Schneidverfahren. Als Beispiele können dazu die durch neue Strahltechnologien und die Erfindung der Remote-Technik heraus entwickelten Verfahren Abtrags- (HSC) und Schmelzdruckschneiden (RFC) verstanden werden. Ablenkgeschwindigkeiten von bis zu 2000 m/min versprechen eine Steigerung der bisher bekannten Produktivitätsgrenzen. Am Beispiel der Automobilindustrie eröffnen sich dazu zahlreiche Möglichkeiten im Karosserie- und Elektromotorenbau.

Not only in the range of the automobile manufacture, but in all manufacturing enterprises, the strong demand for increasingly more dynamic, more energy-efficient and more productive processes exists. On the one hand there is a strong demand for shorter cycle times, on the other hand we need to save energy, so it needs new fabrication techniques. Through the development of the laser beam sources there to higher intensity and a higher energy efficiency, this opens new process possibilities of already established joining techniques.

As examples the High Speed Cutting (HSC) and the Remote Fusion Cutting (RFC) developed through new beam technologies and the invention of the Remote-technology can be understood for this purpose. Speeds of up to 2000 m/min promise an increase of the up to now known productivity limits. At the example of the automotive industry numerous possibilities open up for the car body and electric motor construction.

1 Motivation

Zum Trennen dünner Bleche für die Herstellung von Rotoren und Statoren hat sich der konventionelle Stanzprozess aufgrund seiner hohen Ausbringungsmenge etabliert. Die etablierten Laserschneidprozesse sind derzeit nicht in der Lage wirtschaftlich gleichwertige Taktzeiten zu erreichen. Da der Laser jedoch verschleißfrei arbeitet, während beim Stanzprozess teure Werkzeugwechsel nötig sind, entsteht hier ein möglicher wirtschaftlicher Vorteil. Im Blechdickenbereich bis 0,5 mm Dicke werden aktuell auf konventionellen 5-Achs-Laserschneidanlagen Schneidgeschwindigkeiten von rund 8 m/min erreicht. Durch den Einsatz der Remote-Technik sind weit höhere Schneidgeschwindigkeiten erreichbar, zudem entfallen zeitaufwändige Positionierungsanfahrten. Die beiden Verfahren Abtrags- (HSC, High Speed Cutting) und Schmelzdruckschneiden (RFC, Remote Fusion Cutting) verzichten zudem auf die Zuführung von Prozessgasen und erreichen Schneidgeschwindigkeiten von derzeit bis zu 2000 m/min pro Überfahrt beim Abtrags- bzw. 15 m/min pro Schnitt beim Schmelzdruckschneiden.

2 Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau beider Verfahren ähnelt sich, lediglich die Art der Laserquelle und damit die erreichbare Strahlqualität sind wichtige Prozesskenngrößen. Für das Abtragsschneiden werden Single-Mode Laser höchster Strahlgüten bis derzeit 5 kW Leistung eingesetzt. Aus Vorversuchen mit dickeren Blechwerkstoffen hat sich gezeigt, dass die Fokusbildung nicht größer als 50 μm sein sollten, um eine möglichst hohe Intensität auf dem Werkstück zu erhalten.

Beim Schmelzdruckschneiden dagegen werden Multi-Mode Strahlquellen eingesetzt. Für das Verfahren reichen Strahlquellen bis 10 kW aus. Für die hier verwendeten dünnen Blechwerkstoffe liegt die sinnvolle Grenze bei ca. 5 kW, da ein zu hoher Wärmeeintrag zu einem hohen Verzug des Werkstücks führt. Die Multi-Mode Strahlquellen haben den Vorteil, dass sie verbreiteter und damit günstiger in der Anschaffung sind.

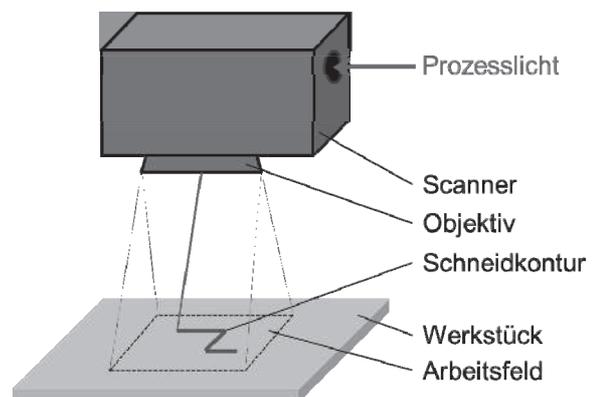


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau

Das Prozesslicht aus der Faser beider Strahlquellen wird kollimiert und anschließend im Scankopf über Ablenkspiegel und ein Objektiv auf das Werkstück fokussiert. Das aufgespannte Arbeitsfeld resultiert aus der Brennweite und dem verwendeten Objektiv. Um eine maximale Intensität auf dem Werkstück zu erreichen, werden beim Abtragsschneiden kleine Fokusbildungen bevorzugt. Dies lässt sich zumeist nur über sehr kurze Brennweiten und daraus resultierend kleine Arbeitsfelder erreichen.

Beim Schmelzdruckschneiden dagegen gibt es erste Erfahrungen aus Versuchen mit dickeren Werkstoffen, wie groß der Fokusbereich im Vergleich zur Einschweißtiefe sein muss (sog. Schachtverhältnis). Für das Schmelzdruckschneiden ist jedoch die Einschweißtiefe mit der Blechdicke vergleichbar, da der Werkstoff in einer Überfahrt vollständig aufgeschmolzen werden muss, um ein Austreiben der Schmelze zu ermöglichen.

Bei 1,75 mm dicken feuerverzinkten Blechen beträgt dieses Schachtverhältnis beispielsweise 1 zu 3. Demnach müsste ein 0,3 mm dickes Blech der gleichen Güte und Beschichtung mit einem 100 µm Fokus trennbar sein. Da jedoch das dünnste verzinkte Karosserieblech 0,7 mm dick ist, wurde zu Versuchszwecken auf Elektrobleche zurückgegriffen. Diese verfügen jedoch über eine andere Zusammensetzung und Beschichtung. [1]

3 Versuchsdurchführung

Als Versuchswerkstoffe dienen Elektroblech der Firma CDW aus einer Charge, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander gewährleisten zu können.

Werkstoffbezeichnung	Nennstärke [mm]	Werkstoffnummer	R_m [N/mm ²]	Locierung
M250-35A	0,35	1.0800	510	C5-Lack der Klasse
M270-35A	0,35	1.0801	500	AN8 (anorganisch/organisch), beidseitig je
M270-50A	0,5	1.0806	510	max. 5 µm Schichtdicke
NC30	0,3	-	-	

Abbildung 2: Übersicht über verwendete Werkstoffe

Die Versuche wurden in den Laboren der Volkswagen AG und des IWS Dresden durchgeführt.

Parameter für Laserschneidversuche		
Verfahren	HSC	RFC
Fokusbereich	21; 50 µm	70; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600 µm
Laserstrahlquelle	5 kW SM Faserlaser	4 kW MM Faserlaser
Scanner	Raylase	Scanlab

Abbildung 3: Übersicht über verwendetes Equipment

4 Ergebnisse

4.1 Abtragsschneiden

Das Verfahren Abtragsschneiden zeigt deutliche Wirtschaftlichkeitsvorteile mit sinkender Blechdicke, da somit auch die Anzahl der notwendigen Überfahrten abnimmt. Dies begünstigt eine niedrigere Gesamtschneiddauer. Pro zehn Überfahrten werden bei geraden 40 mm langen Schnitten ca. 0,4 s Prozesszeit benötigt. Dies resultiert mit aus notwendigen Pausenzeiten zwischen den Überfahrten, da die Elektronik nicht so

schnelle Daten verarbeiten zu vermag, wie der Scanner für die Neupositionierung benötigt.

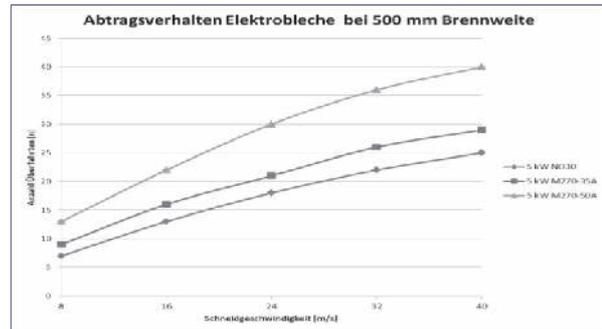


Abbildung 4: Abtragsverhalten HSC bei $d_{fok}=50 \mu m$

Aus Abbildung 4 wird ersichtlich, dass mit zunehmender Blechdicke die Anzahl der Überfahrten steigt, da der Abtrag pro Überfahrt aufgrund thermischer Wechselwirkungen nicht konstant ist. Es zeigt sich jedoch im Vergleich zur nachfolgenden Abbildung, dass beim Abtragsschneiden generell höhere Intensitäten zu höheren Abtragungsmengen führen. Der hier eintretende höhere Verdampfungsanteil bewirkt, dass pro Überfahrt mehr Material abgetragen wird. [2] [3]

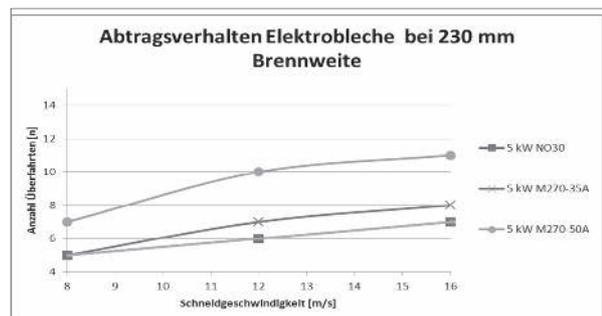


Abbildung 5: Abtragsverhalten HSC bei $d_{fok}=21 \mu m$

Vergleicht man z.B. die Kurven beider Brennweiten bei 12 m/min miteinander, so wird deutlich, dass die höhere Intensität eine Reduzierung der notwendigen Überfahrten von ca. 25% bewirkt.

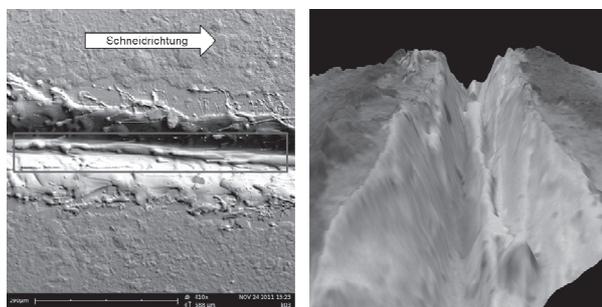


Abbildung 6: Gratentstehung an Lasereintrittsseite

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, entsteht jedoch an der Lasereintrittsseite ein stark anhaftender Grat. Schnittkantenqualität und Grat sind jedoch nicht nach der DIN 2310 klassifizierbar. Zur Entstehung des Grats gibt es unterschiedliche Theorien. Eine davon besagt, dass die aus der Fuge herausgeschleuderten Schmelztröpfchen an der

Schnittkante haften bleiben. [4] Im linken Teil der Abbildung 6 sieht man deutlich, dass Schmelztröpfchen auch auf dem Bereich der Werkstückoberfläche anhaften, der nicht vom Laserfokus berührt wird und nicht direkt mit dem Schmelzaufwurf verbunden ist. Dies könnten Schmelzspritzer sein, die nicht an der Kante anhaften und die Fuge verlassen könnten.

Falls der Grat für bestimmte Anwendungsfälle unzulässig ist, so bedeutet dies zusätzliche Arbeitsschritte, was die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verschlechtern würde. [4] [5]

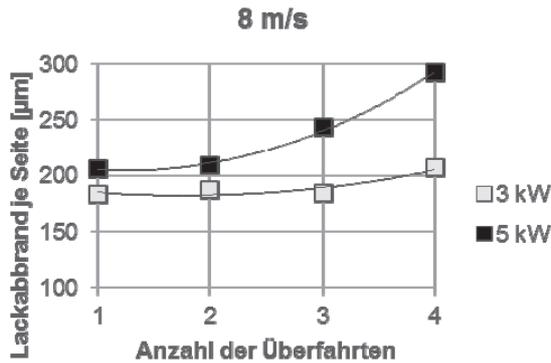


Abbildung 7: Lackabbrand NO30 bei $d_{fok}=21 \mu m$

Durch die kleinen Fokusbereiche und gleichzeitig hohen Überfahrsgeschwindigkeiten findet nur eine sehr geringe Wärmebeeinflussung des Werkstoffs statt, was sich dadurch auch in einem verhältnismäßig geringem Lackabbrand auf den Elektroblechen zeigt.

4.2 Schmelzdruckschneiden

Die Idee, die bereits bekannten Schachtverhältnisse von Karosserieblechen auf Elektrobleche übertragen zu können, konnte nicht verwirklicht werden.

Es hat sich gezeigt, dass Werkstoffe unter 0,5 mm Blechdicke nicht mit dem Verfahren trennbar sind, da die Schnittfuge immer wieder verschließt.

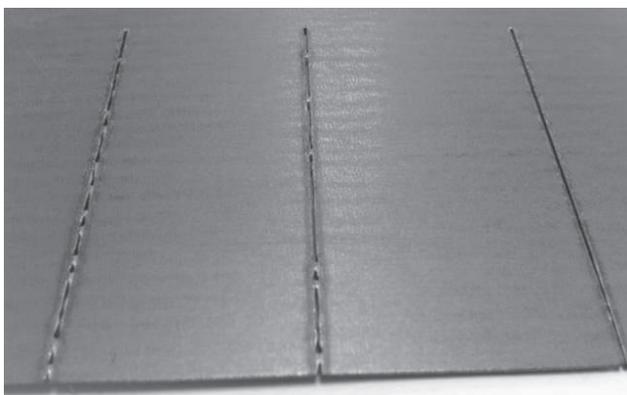


Abbildung 8: Wiederverschlossene Schnittfugen

Der Druck, der die Schmelze aus der Fuge austreibt, konnte nicht aufgebracht werden. Das Verhalten der Schmelze ist also ein entscheidender Faktor für einen erfolgreichen Schnitt. Da diese auch durch die Beschichtung beeinflusst wird, sind hier weitergehende Untersuchungen anzustreben, um ein genaueres Prozessverständnis zu erlangen.

Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass bei den Blechwerkstoffen mit 0,3 und 0,35 mm schon bei 4 kW Laserleistung ein erheblicher thermischer Verzug einsetzt. Für den M270-50A empfiehlt sich noch eine Steigerung über 4 kW hinaus, da hier das Parameterfeld sich gerade erst zu öffnen scheint.

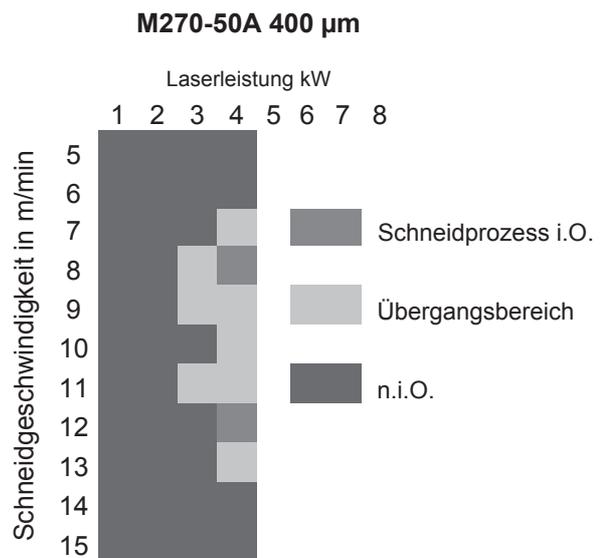


Abbildung 9: Parameterfeld M270-50A RFC

Als weitere wichtige Erkenntnis wurde festgestellt, dass unabhängig der Blechdicke kein Schmelzschneidprozess bei Elektroblechen mit Laserfoki unter 400 µm durchgeführt werden konnte. Basierend auf diesen Erkenntnissen besteht der Verdacht, dass die Schmelze eine bestimmte Fugenbreite benötigt, damit sie zum Einen nach unten ausgetrieben werden kann, zum Anderen, damit sie nicht von selbst hinter dem Laserstrahl wieder zusammenlaufen kann.

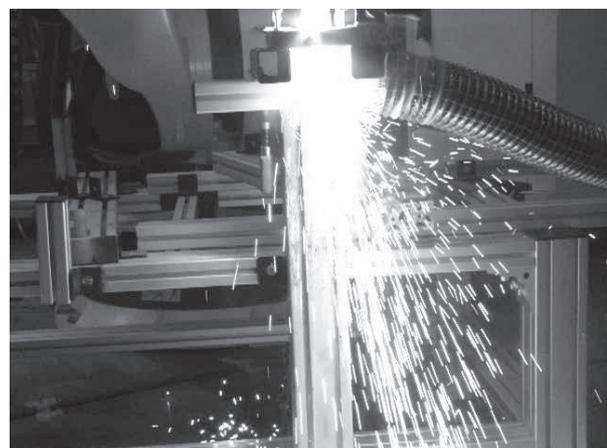


Abbildung 10: Schmelzaustrieb beim RFC

In Abbildung 10 sehr gut ersichtlich ist die nach unten ausgetriebene Schmelze, die nicht nur das Material, sondern auch die Wärme mit aus dem Bauteil nimmt. Dadurch entsteht nahezu kein Verzug. Es entsteht auch kein Grat am Bauteil, was einen erheblichen Verfahrensvorteil gegenüber dem Abtragsschneiden darstellt. Charakteristisch für das Schmelzdruckschneiden ist dagegen eine abgerundete Schnittkante, die durch die abwärtsgerichtet fließende Schmelze hervorgerufen wird.

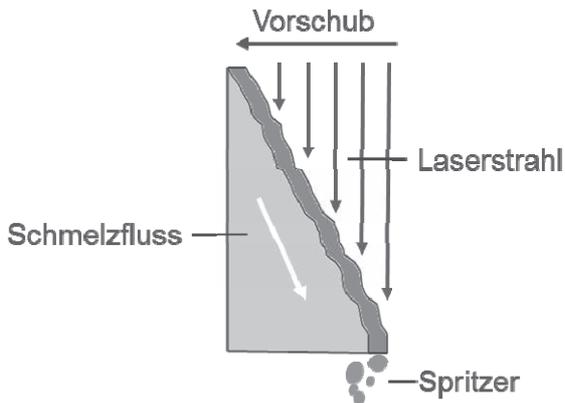


Abbildung 11: Verfahrensablauf beim RFC [6]

Bedingt durch die größeren Fokusdurchmesser entstehen auf den Elektroblechen höhere Lackabbrände, so dass die isolierende Schutzschicht an der Schnittkante deutlich mehr beschädigt wird als im Vergleich zum Abtragsschneidprozess. Während die Breite der Schnittfuge dem Fokusdurchmesser (400 µm) entspricht, so beträgt die Breite des abgebrannten Lackes rund 500 µm (siehe auch Abb. 8).

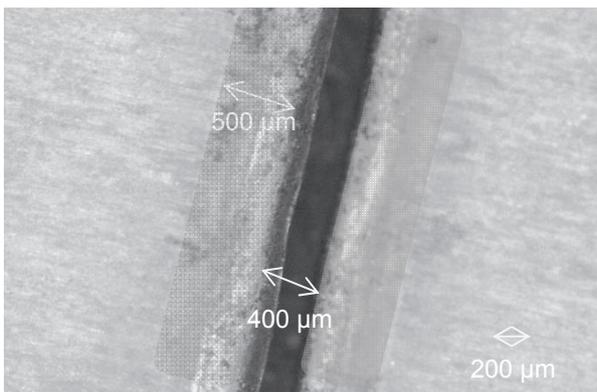


Abbildung 12: Lackabbrand am M270-50A beim RFC

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das neuartige Schneidverfahren Schmelzdruckschneiden ist für Blechdicken ab 0,5 mm einsetzbar. Für dünnere Bleche war kein gültiger und reproduzierbarer Schneidparameter ermittelbar. Die Nutzung von Strahlquellen höherer Leistung erscheint nicht sinnvoll, da dies zu einem hohen Verzug des Werkstücks und thermischen Eigenspannungen führen würde. Gerade auch im

Hinblick auf die magnetischen Eigenschaften ist eine noch höhere Wärmeeinbringung jedoch unbedingt zu vermeiden. Ebenso hat sich gezeigt, dass der minimale Fokusdurchmesser zum Schneiden bei ca. 400 µm liegt, so dass das minimale und gleichzeitig maximale Schachtverhältnis bei 0,5 mm dicken Blechen bei ca. 1 zu 1,25 liegt. Damit verhält sich der Prozess anders als bei den Versuchen mit verzinkten Blechen (Schachtverhältnis 1 zu 3).

Mit sinkender Blechdicke hat sich jedoch das Abtragsschneiden als wirtschaftlich sinnvolle Alternative dargestellt. Das Verfahren ist wirtschaftlich bei geraden Schnitten bis 0,5 mm Blechdicke einsetzbar, da dann auch die Summe aller Überfahrten nicht mehr Zeit benötigt, als bei herkömmlichen Trennverfahren mit nur einer Überfahrt. Bei komplexen Konturen sind Schneidstrategie und Komplexitätsgrad entscheidende Faktoren, da die hohen Überfahrteschwindigkeiten durch ständiges Abbremsen und Beschleunigen nicht mehr erreicht werden können. Gerade bei kurzen Stegen und kleinen Radien besteht dann die Notwendigkeit einer optimalen Schnittstrategie, um Abtrag und Prozessgesamtzeit wirtschaftlich in Einklang bringen zu können.

Als nachteilig ist beim Abtragsschneiden die Gratbildung an der Lasereintrittsseite zu vermerken, da dieser Grat unter Umständen aufwändig entfernt werden muss. Als Vorteile des Verfahrens können dagegen der nur minimale Verzug und der geringe Lackabbrand der Blechbeschichtung genannt werden. Aufgrund der geringen Verbreitung von Single-Mode Laserstrahlquellen ist jedoch die Technik zum Teil noch vergleichsweise kostenintensiv.

Literaturverzeichnis

- [1] Wuppermann, C.D.: Merkblatt 401: Elektroband und -blech, Stahl-Informations-Zentrum, 2005
- [2] Hartwig, L. et al.: Hochleistungs - Lasermikrobearbeitung mit brillanter cw-Laserstrahlung, Vortrag, 20th International Scientific Conference Mittweida, Scientific Reports Nr. 4, 2009, S. 57-64, Oktober 2009
- [3] Musiol, J et al.: Remote-Laserstrahlschneiden - Eine flexible Lösung neben der Stanztechnik, Forum Stanztechnik, Ettlingen, 20.10.2009
- [4] Lütke, M.: Entwicklung des Remote-Laserstrahlschneidens metallischer Werkstoffe, Dissertation, 2011
- [5] Lütke, M., Himmer, T., Wetzig, A. & Beyer, E. (2009). "Opportunities to enlarge the application area of remote-cutting." Proceedings of 28th ICALEO, Paper 608
- [6] Musiol, J.: Remote-Laserstrahl-Schmelzschneiden, unveröffentlichter Vortrag, München, 18.10.2011

NANOPARTIKELBILDUNG BEI DER LASER-REMOTE-BEARBEITUNG VON METALLEN MIT HOCHBRILLANTEN STRAHLQUELLEN

Tobias Scholz¹, Klaus Dickmann¹, Andreas Ostendorf²

¹Laserzentrum FH-Münster (LFM), Stegerwaldstr. 39, D-48565 Steinfurt

²Laseranwendungstechnik, Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum

Die charakteristischen Eigenschaften von hochbrillanten Strahlquellen haben dazu geführt, dass die Laser-Remote-Bearbeitung in den letzten Jahren entscheidend weiterentwickelt wurde. Jedoch treten Verlustprozesse auf, die bei konventionellen und in der Vergangenheit etablierten Laserbearbeitungsverfahren abgeschwächt werden können. Besonders die Nanopartikelbildung kann den jeweiligen Bearbeitungsprozess durch Absorption und Streuung beeinflussen. Für eine detaillierte Analyse wird der Laserschweißprozess von Edelstahl mittels Faserlaser (2 kW, Multi-Mode) untersucht. Ergebnisse von zeitaufgelösten Analysen der Plasmastrahlung, Entwicklungen der Partikeldichte und -größen werden vorgestellt. Dafür werden die Abschwächung dreier Messlaserstrahlen verschiedener Wellenlängen durch den Metalldampf, Photodiodensignale der Plasmastrahlung und Spektren ausgewertet.

1. Einleitung

Neuartige und effiziente Fertigungsstrategien können bestehende Laserbearbeitungskonzepte weiter optimieren und neue Anwendungsfelder erschließen. Eine Möglichkeit bietet hierbei die Laser-Remote-Bearbeitung. Aufgrund des großen Arbeitsabstandes führen schon kleine Bewegungen des strahlführenden Systems zu großen Ablenkungen auf der Werkstückoberfläche. Somit kann die Dynamik im Vergleich zu konventionellen Bearbeitungsverfahren erhöht werden.

Jedoch können bei der Laser-Remotebearbeitung Wechselwirkungs- und Verlustmechanismen auftreten, die die jeweilige Prozessgeschwindigkeit oder -qualität beeinflussen. Bei konventionellen Bearbeitungsverfahren kann auf sie z.B. durch die Zufuhr von Prozessgasen eingewirkt werden. Durch den großen Arbeitsabstand zwischen der strahlführenden Optik und dem Werkstück lässt sich dies bei der Remote-Bearbeitung nur eingeschränkt durchführen [1].

Verlust- und Wechselwirkungsmechanismen sind dabei unter anderem auf die Wechselwirkung zwischen der einfallenden Strahlung und dem entstehenden Materialdampf auf der Werkstückoberfläche zurückzuführen. Dazu gehören Brechungsindexschwankungen, die zu einer Umverteilung der Intensität auf der Materialoberfläche führen können [2]. Die Ursache hierfür liegt in der dynamischen Ausbreitung des verdampften Materials und den damit verbundenen Dichte- und Temperaturschwankungen. Photoionisation und inverse Bremsstrahlung sind weitere Prozesse, die den jeweiligen Laserbearbeitungsprozess beeinflussen können [3, 4]. Weiterhin kann es bei hohen Intensitäten aufgrund von steigenden Verdampfungsraten zu einer signifikanten Übersättigung im Materialdampf kommen [5]. Die Ausbreitung des Materialdampfes in Form einer Schockwelle und der Wärmeaustausch mit der kalten Umgebung führen zu einer schnellen Abkühlung des Dampfes [6]. Dadurch wird eine Phasenumwandlung durch Keimbildung eingeleitet, bei der unter bestimmten Bedingungen stabile so genannte Cluster oder Nanopartikel entstehen können [7]. Aufgrund der hohen Intensitäten bei Kurz- und Ultrakurz-

pulslasern und den damit verbundenen Vorteilen für die Partikelbildung, beziehen sich viele bisherige Untersuchungen auf die zielgerichtete Herstellung von Nanopartikeln beim Abtragen mit diesen Strahlquellen [8-9]. Eine signifikante Wechselwirkung zwischen der einfallenden Strahlung und den Nanopartikeln ist jedoch in den meisten Fällen aufgrund der kurzen Pulsdauern nicht zu erkennen. Nur bei hohen Pulswiederholraten kann es zu einer Wechselwirkung der einfallenden Strahlung mit durch vorhergehende Pulse entstandenem Materialdampf kommen [10].

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Wechselwirkung der einfallenden Strahlung an Partikeln und dem Einfluss auf die Lasermaterialbearbeitung im kontinuierlichen Betrieb wird von Matsunawa et al. hergestellt [11]. Scholz et al. zeigen, dass es beim Abtragen von Edelstahl zu einer Absenkung der Abtragsgeschwindigkeit durch die Wechselwirkung zwischen der einfallenden Strahlung und Nanopartikeln kommen kann [12]. Hansen et al. beschäftigen sich mit der qualitativen Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Nanopartikeln und Laserstrahlung während des Laserstrahlschweißprozesses und beschreiben durch einen theoretischen Ansatz mögliche Auswirkungen der Wechselwirkung zwischen Partikeln und der Laserstrahlung auf die Lasermaterialbearbeitung [13]. Tu et al. beziehen sich auf den Laserstrahlschweißprozess von Baustahl mit einem 20 kW CO₂-Laser [14]. Die Ergebnisse zeigen, dass es innerhalb des Metalldampfes zu einer verstärkten Bildung von größeren Partikelstrukturen durch einen Agglomerationsprozess kommt, der besonders bei Schweißprozessen ohne Prozessgasunterstützung auftritt. Versuche mit Strahlung eines Testlasers, die durch den Metalldampf geführt wird, verdeutlichen eine Abschwächung der Intensität durch Streuung und Absorption. Die Auswirkungen der Wechselwirkung auf den Laserstrahlschweißprozess werden hierbei jedoch nur qualitativ beschrieben. Michalowski et al. stellen fest, dass besonders bei der Materialbearbeitung mit hochbrillanten Strahlquellen die Wechselwirkung der einfallenden Strahlung mit Partikeln nicht vernachlässigt werden darf [15]. Sie führen auf, dass die Wechselwirkung zwischen einer starken

Partikelentwicklung und Laserstrahlung die Ursache für eine Verbreiterung des Fokusbereichs und einer damit verbundenen Reduzierung der Intensität einhergeht. Jedoch wirkt im Bezug zur Laser-Remotebearbeitung nicht nur die gleichmäßige Verbreiterung der Wechselwirkungszone durch den Streuprozess auf die Bearbeitung ein, sondern vielmehr hat auch die Dynamik der Partikelbildung einen starken Einfluss auf die Prozessstabilität. Aufgrund abweichender Voraussetzungen und Randbedingungen kann somit ein direkter Bezug zu praxisrelevanten Problemstellungen bei der Laser-Remotebearbeitung anhand bisheriger Erkenntnisse nur eingeschränkt qualitativ hergestellt werden.

Um das Verständnis des Einflusses der Partikelbildung auf die Laser-Remote-Bearbeitung zu erweitern, beziehen sich die vorgestellten experimentellen Arbeiten auf den Laser-Remoteschweißprozess bei Edelstahl. Dafür wird ein 2-kW-Faserlaser YLS-2000-CT verwendet.

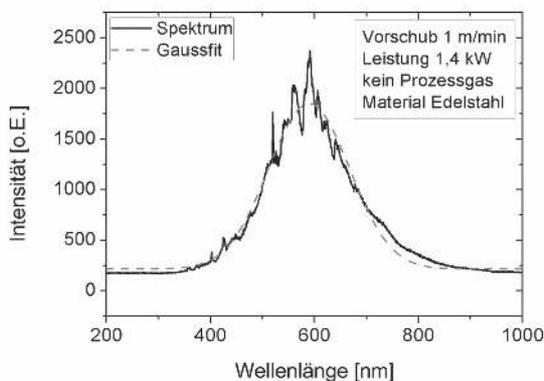


Bild 1: Emissionsspektrum der Plasmastrahlung beim Laserschweißen von Edelstahl.

2. Experimenteller Aufbau

2.1 Analyse der Plasmastrahlung

Der Ionisationsgrad des Metaldampfes beeinflusst die Partikelbildung [5]. Die Ursache ist darauf zurückzuführen, dass ionisierte Teilchen im Metaldampf polarisierbare Dampfpartikel anziehen. Es entstehen lokale Zustände minimaler Energien und die Energiebarriere zur Bildung stabiler Nanopartikel wird herabgesenkt. Dies führt zu einer Steigerung der Keimbildungsrate. Unter der Annahme einer dominierenden einfachen Ionisation kann durch Messung der Plasmatemperatur auf den Ionisationsgrad zurückgeschlossen werden [16]. Zur Bestimmung der Metaldampftemperatur wurde das Spektrum mittels Spektrometer aufgenommen. Aus dem Maximum des Spektrums konnte anschließend die Metaldampftemperatur ermittelt werden. Es wurde die Metaldampftemperatur oberhalb der Werkstückoberfläche untersucht. Um eine höhere zeitliche Auflösung zu erhalten, wurde daran anschließend die Plasmatemperatur mittels Photodiodensignalen bestimmt. Dafür wurden vier spektrale Filter (543 nm, 590 nm, 630 nm und 700 nm) verwendet, so dass die Si-Photodioden wellenlängenselektiv die Plasmastrahlung detektie-

ren konnten.

Bei der Analyse der Ergebnisse wurde dabei der Schwerpunkt auf Veränderungen der Metaldampftemperatur und damit des Ionisationsgrades im Metaldampf gelegt. Starke Schwankungen bei der Metaldampfbildung haben ebenfalls Änderungen der Metaldampftemperatur zur Folge, womit sich ebenfalls das Spektrum der Plasmastrahlung ändert. Diese Schwankungen weisen auf eine Veränderung der Partikelbildungsrate hin.

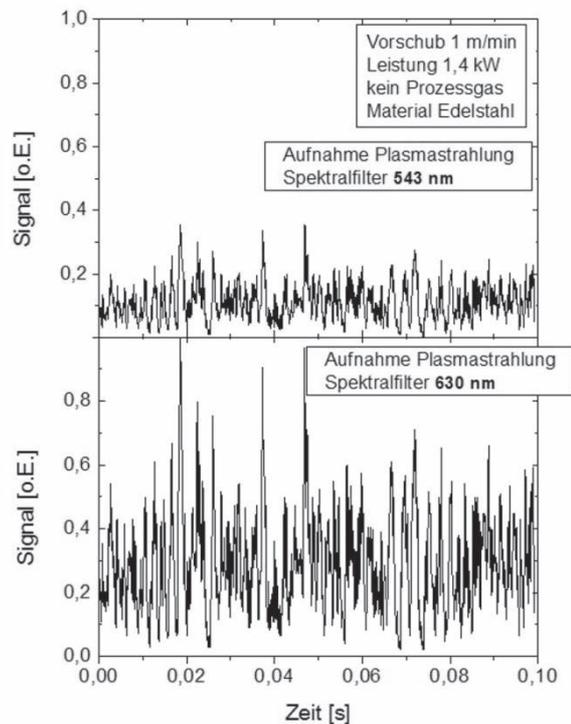


Bild 2: Genormte Photodiodensignale der Plasmastrahlung in Abhängigkeit der Zeit beim Laserschweißen von Edelstahl. Es wurden zwei Spektralfilter verwendet (oben 543 nm und unten 630 nm).

2.2 In-situ-Analyse mittels „Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren“

Um die Wechselwirkung zwischen der einfallenden Strahlung und Nanopartikel tiefergehender zu untersuchen, wurde die Entwicklung der Partikeldichte und des mittleren Partikeldurchmessers analysiert. Dafür wurde das „Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren“ verwendet. Das Prinzip basiert auf der Abschwächung von drei monochromatischen Lichtstrahlen beim Durchstrahlen einer Ansammlung von Partikeln [17]. Dafür wurden die Strahlen von drei HeNe-Lasern (Wellenlängen 543 nm, 590 nm und 630 nm) durch den entstehenden Metaldampf geleitet und die transmittierten Signale aufgenommen. Aufbauend auf der Mie-Theorie in Kombination mit dem Lambert-Beerschen Gesetz wurde über die Quotientenbildung der jeweiligen transmittierten Intensitäten auf die entsprechenden Parameter zurückgeschlossen.

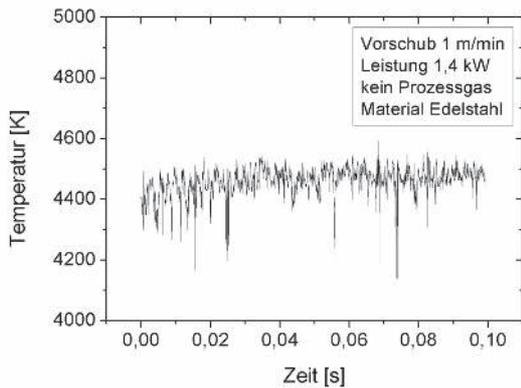


Bild 3: Plasmatemperatur in Abhängigkeit der Zeit.

3. Ergebnisse und Diskussion

Für eine Analyse der Partikelentwicklung beim Remote-Schweißen konzentrierten sich die experimentellen Arbeiten auf eine Ausgangsleistung von 1,4 kW ohne Prozessgasunterstützung. Bild 1 stellt das Emissionsspektrum der Plasmastrahlung dar. Der kontinuierliche Anteil des Emissionsspektrums zeigt dabei ein Maximum bei einer Wellenlänge von 600 nm. Über das Wiensche Verschiebungsgesetz wird auf eine Temperatur des Plasmas von 4820 K zurückgeschlossen.

Aufgrund der hohen Integrationszeit des Spektrometers wurde für die zeitaufgelöste Bestimmung der Plasmatemperatur die Plasmastrahlung mittels Photodioden detektiert (s. Kap. 2.1). Bild 2 zeigt beispielhaft zwei Photodiodensignale der Plasmastrahlung, wobei die Spektralfilter 543 nm und 630 nm verwendet wurden. Bei der Auswertung der Signale und dem Rückschluss auf die Plasmatemperatur wurden vier Photodiodensignale verwendet. Somit konnte eine Gaußfunktion durch die vier Werte gefittet und aus dem Maximum auf die Temperatur zurückgeschlossen werden. Bei der Auswertung der Signale wurden die Transmissionseigenschaften der Spektralfilter und die Empfindlichkeit der Photodioden berücksichtigt. Der daraus ermittelte Verlauf der Plasmatemperatur wird von Bild 3 dargestellt. Es wird deutlich, dass es zu starken Schwankungen kommt. Aufgrund des direkten Zusammenhangs zwischen der Plasmatemperatur, dem Ionisationsgrad des Plasmas sowie der Partikelbildungsrate, lässt eine hohe Temperatur auf einen hohen Ionisationsgrad innerhalb des Metaldampfes und damit einer Steigerung der Partikelbildungsrate zurückzuführen.

Für die Bestimmung des mittleren Partikeldurchmessers wurde das Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren verwendet (s. Kap. 2.2). Dabei wurde über die Abschwächung dreier Testlaserstrahlen auf die Partikeldurchmesser zurückgeschlossen. Bild 4 zeigt den Verlauf des Partikeldurchmessers in Abhängigkeit der Zeit. Es wird eine starke Fluktuation des Partikeldurchmessers deutlich. So schwankt der mittlere Durchmesser um eine Größe von 120 nm.

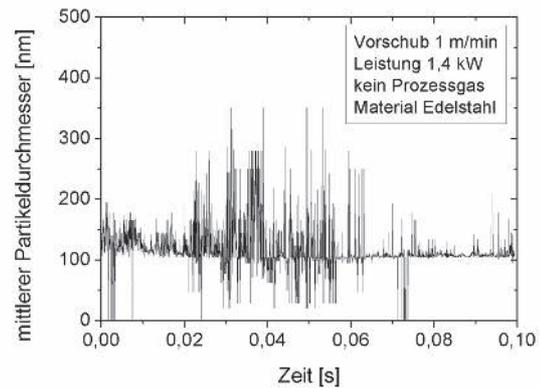


Bild 4: Verlauf des mittleren Partikeldurchmessers beim Laserschweißen von Edelstahl.

Dabei wird in dem betrachteten Zeitraum ein maximaler Partikeldurchmesser von 350 nm erreicht.

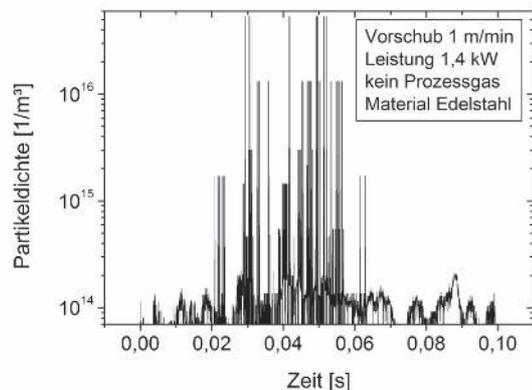


Bild 5: Partikeldichte in Abhängigkeit der Zeit.

Da bei der Auswertung der Partikeldurchmesser angenommen wurde, dass die Partikel näherungsweise eine Kugelform aufweisen, werden mögliche Abweichungen zu der Kugelform sowie Strukturen, die durch Agglomerationsprozesse entstanden sind, nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurde keine Verbreiterung der Partikelgrößenverteilung angenommen. Auch wurden die Gasabsorption sowie Brechungsindexschwankungen nicht in die Auswertung eingebunden. Somit können Abweichungen zu der tatsächlichen Partikelgrößenverteilung im Metaldampf auftreten. Jedoch wird die Dynamik des Partikelbildungsprozesses wiedergegeben. Durch die ermittelten Partikeldurchmesser konnte auf die Partikeldichte zurückgeschlossen werden, Bild 5. Es zeigt sich, dass es auch hier zu erheblichen Schwankungen kommt. Dies lässt ebenfalls auf einen dynamischen Einflussfaktor zurückschließen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Experimentelle Arbeiten zur Partikelentwicklung im Metaldampf wurden präsentiert. Die Ergebnisse zeigen eine hochdynamische Entwicklung der Partikelbildung im Metaldampf. Die fehlende Prozessgasunterstützung führt zu einer erhöhten Partikelbildungsrate. Somit kommt es besonders beim Remote-Laserschweißprozess nicht nur zu

einem gleichmäßigen Einfluss der Wechselwirkung zwischen der einfallenden Laserstrahlung und Partikeln. Vielmehr resultiert ein fluktuierender Einflussfaktor auf den Prozess, der durchaus Prozessinstabilitäten nach sich ziehen kann.

Im Rahmen des FHprofUNT-Vorhabens „LaRemo“ (FKZ 03FH043PX2) soll auf den Ergebnissen der vorgestellten Arbeiten aufbauend für eine tiefere Analyse der Zusammenhang zwischen der Partikelbildung und möglichen Prozessinstabilitäten hergestellt werden. Über die gleichzeitige Aufnahme des Prozesses mittels Hochgeschwindigkeitskamera, Analyse des Emissionsspektrums und dem Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren sollen mögliche Zusammenhänge zwischen der Partikelbildung, der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Partikeln sowie der Fehlstellenbildung beim Remote-Schweißprozess analysiert werden. Die Auswertung der Schweißnaht, Analysen der Partikelgrößenverteilung mittels Rasterelektronenmikroskop- und Transmissionselektronenmikroskopaufnahmen sowie theoretische Modellierungen des Remote-Schweißprozesses mit dem Schwerpunkt der Partikelbildung und der Wechselwirkung zwischen Partikeln und Laserstrahlung sollen weitere Rückschlüsse zulassen. Dabei sollen sich die Arbeiten nicht nur auf die Bearbeitung von Edelstahl konzentrieren. Aufgrund der in der industriellen Fertigung steigenden Nachfrage nach der Laser-Remote-Bearbeitung von Aluminium sollen hier ebenfalls vergleichende Arbeiten durchgeführt werden. Eine höhere Wärmeleitung in Kombination mit einer hohen Reflexion und niedrigerer Viskosität der Schmelze führen zu erheblichen Unterschieden bei dem Laser-Remote-Schweißprozess.

Literaturverzeichnis

- [1] M. F. Zaeh, J. Moesl, J. Musiol, F. Oefele: Material processing with remote technology revolution or evolution? *Physics Procedia*, 5, Part A (2010), 19-33.
- [2] M. Beck, P. Berger, H. Hügel: The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO₂ lasers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 28 (1995), 2430-2442.
- [3] H. Schittenhelm, G. Callies, P. Berger, H. Hügel: Investigations of extinction coefficients during excimer laser ablation and their interpretation in terms of Rayleigh scattering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29 (1996), 1564-1575.
- [4] J. Hoffman, T. Moscicki, and Z. Szymanski: The effect of laser wavelength on heating of ablated carbon plume. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 104 (2011), 815-819.
- [5] M. S. Tillack, D. Blair, S. S. Harilal: The effect of ionization on cluster formation in laser ablation plumes. *Nanotechnology*, 15 (2004), 309-403.
- [6] Y. B. Zel'dovich, Y. P. Raizer: *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. Dover Publications (2002).
- [7] B. M. Smirnov: *Cluster Processes in Gases and Plasmas*. Wiley-VCH Verlag (2010).
- [8] A. V. Kabashin, M. Meunier: Synthesis of colloidal nanoparticles during femtosecond laser ablation of gold in water. *Journal of Applied Physics*, 94 (2003), 7941-7943.
- [9] A. A. Ruth, J. A. Young: Generation of CdSe and CdTe nanoparticles by laser ablation in liquids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 279 (2006), 121-127.
- [10] S. M. Klimentov, T. V. Kononenko, P. A. Pivovarov, V. I. Konov, A. M. Prokhorov: Effect of nonlinear light scattering in air on ablation of materials produced by femtosecond laser pulses. *Quantum Electronics*, 32 (2002), 433-436.
- [11] A. Matsunawa, H. Emminger, A. Kar: *Physical Phenomena and Their Interpretation in Laser Materials Processing*. In: *Proceedings of ICALEO (1990)*.
- [12] T. Scholz, K. Dickmann, H. Uphoff, L. Lammers: Influence of the interaction between nanoparticles and high brilliant laser radiation during μ s-pulses on the ablation process of metals. *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (2012), 717-726.
- [13] F. Hansen, W. W. Duley: Attenuation of laser radiation by particles during laser material processing. *Journal of Laser Applications*, 6 (1994), 137-143.
- [14] J. Tu, I. Miyamoto, T. Inoue: Characterizing keyhole plasma light emission and plasma plume scattering for monitoring 20 kW class CO₂ laser welding processes. *Journal of Laser Applications*, 14 (2002), 146-153.
- [15] A. Michalowski, A. Heß, A. Ruß, F. Dausinger: Plume attenuation under high power Yb:YAG laser material processing. In: *Proceedings of LIM (2007)*.
- [16] L. A. Artsimowitsch, R. S. Sagdejew: *Plasma-physik für Physiker*. B. G. Teubner (1983).
- [17] K. Schaber, A. Schenkel, R. Zahoransky: Drei-Wellenlängen-Extinktionsverfahren zur Charakterisierung von Aerosolen unter industriellen Bedingungen. *tm - technisches Messen*, 61 (1994), 295-300.

UNTERSUCHUNGEN ZUM HOCHGESCHWINDIGKEITSSCHWEIßEN MIT BRILLANTER LASERSTRAHLUNG

Udo Löschner, Sascha Schwind, Lars Hartwig, Frank Ullmann,
Horst Exner, Peter Hübner, Andreas Eysert

Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

In neuester Zeit gewinnen brillante Laserstrahlquellen als Werkzeug für die Materialbearbeitung zunehmend an Interesse. Am Laserinstitut wurde bereits 2008 weltweit erstmalig die Kombination von hoher applizierter Laserleistung einer solchen Strahlquelle und ultraschneller Strahlablenkung im Bereich der Lasermikrobearbeitung demonstriert. Beim Laserstrahlschweißen nutzt man brillante Laserstrahlquellen bisher meist für Mikroschweißanwendungen, ihr Einsatzpotenzial für das Hochgeschwindigkeitsschweißen im Makrobereich hingegen ist noch nicht tiefgreifend erforscht.

In diesem Artikel wird von detaillierten Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsschweißen zweier verschiedener Stähle mit brillanter Laserstrahlung bis zu einer Laserleistung von 3 kW berichtet. Die schnelle Strahlablenkung erfolgte mit einem Galvanometerscanner. Mit zwei signifikant unterschiedlichen Brennweiten der f-theta-Objektive konnte die Strahlfleckgröße auf dem Material gezielt variiert werden. Die prozessbeeinflussenden Faktoren wie Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Materialdicke und Laserstrahlfleckgröße wurden in weiten Bereichen untersucht. Die erzeugten Schweißnähte sind hinsichtlich ihrer Geometrie, der Schweißnahtqualität und metallografischer Merkmale analysiert worden. Anhand dieser Ergebnisse konnten optimale Prozessparameter und -grenzen identifiziert werden.

1. Einleitung

Für den Laserstrahl-tiefschweißprozess sind hohe Intensitäten von 10^6 W/cm² erforderlich. Der Werkstoff wird nicht nur aufgeschmolzen, sondern teilweise verdampft, sodass sich eine Dampfkapillare (engl. Keyhole) in der Schmelze bildet, die dem Laserstrahl über Mehrfachreflexion an der Kapillarwand ein tieferes Vordringen im Material ermöglicht. Gleichzeitig absorbiert die Schmelze die mehrfach auftreffenden Laserstrahlanteile fast vollständig. Damit wird beim Tiefschweißen ein hoher Wirkungsgrad bei gleichzeitig großen Schweißgeschwindigkeiten erreicht.

Das Ergebnis eines Lasertiefschweißprozesses sind sehr schlanke Schweißnähte mit Einschweißstiefen von über 15 mm. In der grundlegenden Arbeit von Weberpals [1] wird gezeigt, dass sich hohe Strahlqualitäten grundsätzlich positiv auf den Schweißprozess auswirken. Eine hohe applizierte Intensität führt zu einer steilen Dampfkapillare und die wiederum zu einer großen Einschweißtiefe. Monomode-Hochleistungsfaserlaserquellen bieten die für den Hochgeschwindigkeits-Laserschweißprozess im makroskopischen Bereich erforderliche hohe Strahlleistung bei gleichzeitig sehr guter Strahlqualität und überwinden damit die existierenden Limits bei Festkörperlaserquellen. Mit Brennweiten von 500 mm sind Fokusdurchmesser von 50 µm und Rayleigh-Längen von einigen Millimetern bei Laserleistungen von mehreren Kilowatt und damit Intensitäten von 10^8 W/cm² möglich.

Je nach Art der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche unterscheidet man zwei grundlegende Technologien: Beim Remote-Schweißen wird der Laserstrahl mittels eines geeigneten Ablensystems, z.B. eines Scanners, in die gewünschte Vorschubrichtung gelenkt [2]. Alternativ ist der Schweißprozess mit einem ruhenden Strahl möglich, unter dem das Werkstück über ein Handlingsystem bewegt wird. Die für das Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen erforderlichen Ge-

schwindigkeiten von ca. 100 m/min können grundsätzlich mit beiden Technologien realisiert werden. Das Remote-Schweißen mit Scanner ermöglicht dabei eine größere Dynamik.

Das größte Problem beim Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen stellt das Humping dar [3]. Humping entsteht nicht an der aktuellen Bestrahlungsstelle, sondern am Ende des Schmelzbades durch Schmelzrückfluss in Verbindung mit der laserinduzierten Dampffackel und einer höheren Oberflächenspannung infolge der schmalen Schmelzbadbreite. Hauptursache ist eine periodisch auftretende starke Bewegung des Schmelzbades. Durch den sogenannten Pincheffekt wird ein ungleichmäßiges Verflüssigen von Metall begünstigt, wodurch ein unruhiges Schmelzbad entsteht. Der schmale Dampfkanaal verursacht eine hohe Oberflächennormalspannung und verhindert so das weitere Auffüllen aus dem hinteren Nahtbereich. Das geschmolzene Material sammelt sich dort in Tropfenform. Die so gebildeten Tropfen erstarren aufgrund des hohen thermischen Gradienten und der hohen Prozessgeschwindigkeit. Das Material wird sozusagen „eingefroren“ [4,5]. Außerdem kann die inkonstant ausgebildete Plasmafackel zur Ausbildung von Humping beitragen. Die Laserstrahlung wird in einem dichteren Plasma stärker absorbiert, wodurch nur noch ein geringerer Leistungsanteil bis zum Werkstück vordringt. Dadurch wird weniger Werkstoff verdampft bzw. in den Plasmazustand überführt, die Absorption im Plasma sinkt und es kann wieder stärker eingeschweißt werden. Der Prozess beginnt nun von neuem.

Das Auftreten des Effekts hängt vom Strahlfleckdurchmesser, der applizierten Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit ab. Kleinere Strahlfleckdurchmesser, höhere Laserleistungen und größere Schweißgeschwindigkeiten begünstigen die Entstehung von Humping. Dies muss bei der Verfahrensentwicklung beachtet werden. In [6,7] wird berichtet, dass mit einem kleinen Fokusdurchmesser von

24 μm zwar Schweißgeschwindigkeiten von 100 m/min bei großen Aspektverhältnissen von $> 1:15$ erreicht werden können, die Qualität der Schweißnähte aber durch zunehmende Kerbwirkung und Auftreten von Humping eingeschränkt ist. Mit der Applikation von kleineren Fokaldurchmessern kann die Schweißgeschwindigkeit um den gleichen Faktor gesteigert werden wie sich der Fokaldurchmesser verkleinert, ohne Einbußen der Schweißnahtqualität hinnehmen zu müssen [8].

Das Schweißen mit hochbrillanter Laserstrahlung wurde bisher vorrangig im Mikrobereich untersucht. Diese Untersuchungen sollen auf den Makrobereich erweitert werden, z.B. bei Schweißverbindungen an Getriebeteilen im Fahrzeugbau. Das Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen setzt gerade an den bisher bekannten technologischen Grenzen an. Dieser Artikel berichtet über Ergebnisse zum Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen mit einer Monomode-Faserlaserquelle. Durch eine breite Variation der Prozessparameter wurden geeignete Parameterbereiche identifiziert und die Verfahrensgrenzen ausgelotet.

2. Experimentelle Details

Die Untersuchungen wurden mit einer im kontinuierlichen Betrieb bei einer mittleren Wellenlänge von 1070 nm arbeitenden Monomode-Faserlaserquelle mit einer Laserleistung von bis zu 3 kW am Laserangabe durchgeführt. Zur schnellen Strahlablenkung und -fokussierung diente ein speziell auf hohe Scangeschwindigkeiten ausgelegter Galvanometer-scanner mit leichten SiC-Spiegeln in Verbindung mit zwei f-theta-Objektiven verschiedener Brennweiten. Ausgewählte Kennwerte des optischen Systems sind in Tab.1 aufgeführt.

Brennweite [mm]	230	500
Strahlfleckdurchmesser [μm]	21	65
Scangeschwindigkeit [m/s, m/min]	20	43
	1.200	2.580
Spitzenintensität (2,5 kW) [10^8 W/cm^2]	14,4	1,5

Tab.1: Kennwerte des optischen Systems:

Als Probenmaterial dienten ein vollständig austenitischer Edelstahl X5CrNi18-10 (1.4301) und ein kaltgewalzter, verzinkter mangan- und borlegierter vollständig martensitischer Vergütungsstahl 22MnB5 mit Dicken von 1 bis 3 mm. In den Untersuchungen wurde die Abhängigkeit des Schweißprozess unter Variation wichtiger Prozessparameter, wie applizierte Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Strahlfleckgröße und Materialdicke und -art detailliert mit der Maßgabe untersucht, stets eine Durchschweißung zu erzielen. Um ein Minimum an statistischer Sicherheit zu gewährleisten, sind mit jedem Parametersatz 4 Schweißnähte hergestellt worden. Die Schweißnähte wurden im Anschluss

hinsichtlich Nahtgeometrie und Schweißnahtunregelmäßigkeiten beurteilt.

3. Ergebnisse und Diskussion

In einer ersten Untersuchungsreihe wurde die Laserleistung beginnend bei 920 W schrittweise erhöht und dabei die jeweils größtmögliche Schweißgeschwindigkeit ermittelt, die noch eine durchgängige Naht mit homogener Wurzelbildung über die gesamte bestrahlte Länge gewährleistete. Dabei fiel auf, dass bei bestimmten Parameterbereichen die Wurzelbildung unstetig erfolgte und das Material nur teilweise durchgeschweißt war, vgl. Abb.1.

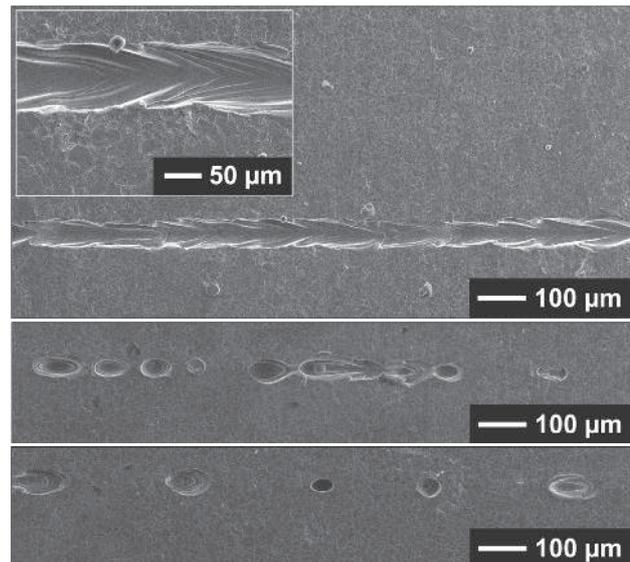


Abb.1: Schweißnahtrückseiten an Edelstahlblech Dicke 1,5 mm, oben: homogen ausgebildete Wurzel, Mitte: unstetig ausgebildete Wurzel - beginnendes Spiking, unten: ausschließlich Spiking

Dieses Verhalten wird als Spiking bezeichnet. In [9] wird berichtet, dass das Auftreten des Spiking-Effekts von der applizierten Strahlspitzenintensität und -leistung bestimmt wird. Beim Schweißen mit hohen Strahlspitzenintensitäten ist das Einsetzen des Spikings von der Lage der Strahlfokusebene bezüglich des parabolisch ausgebildeten Bodens der Dampfkapillare abhängig [10]. Durch unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsverhältnisse an den Wänden und am Boden der Kapillare infolge einer Relativbewegung zwischen Fokusebene und Kapillarboden kann es zu verstärkter und periodischer Schmelzausbildung kommen. Damit variiert die Schweißtiefe entlang der Naht – es tritt Spiking auf. Solche teilweise durchgeschweißten Nähte wurden deshalb als nicht durchgeschweißt gewertet. Abb.2 zeigt für Edelstahlblech der Dicke 1 mm und 3 mm größtmöglich erzielte Schweißgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der applizierten Strahlleistung bei einer Strahlfleckgröße von 65 μm . Die Schweißnahtqualität blieb dabei unberücksichtigt.

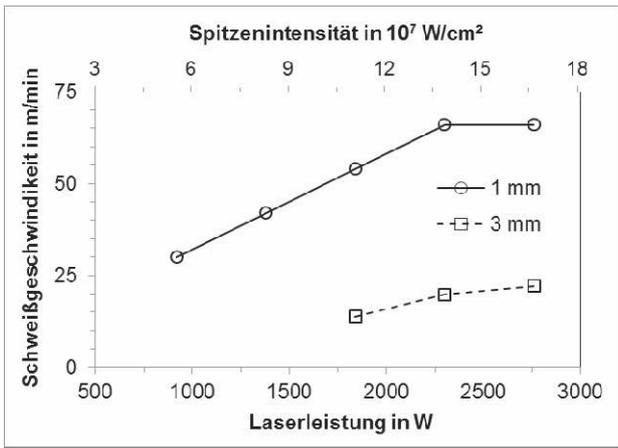


Abb.2: erzielte maximale Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der applizierten Laserleistung beim Schweißen von Edelstahlblech (Parameter: Blechdicke 1 mm und 3 mm, Strahlfleckdurchmesser 65 μm)

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass beträchtlich höhere Laserleistungen von mindestens 1,8 kW und damit Strahlspitzenintensitäten größer $1,1 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ notwendig waren, um das dickere Blech durchschweißen zu können. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Schweißgeschwindigkeit bei gleicher Blechdicke mit zunehmender Laserleistung erhöht werden kann. So ließ sich die Schweißgeschwindigkeit beim 1 mm dicken Blech auf 66 m/min bei einem Leistungseinsatz von 2,3 kW steigern. Für das 3 mm dicke Blech konnte mit der am Bearbeitungsort maximal zu Verfügung stehenden Laserleistung von 2,8 kW eine maximale Schweißgeschwindigkeit von 24 m/min erzielt werden. Für beide Blechdicken deutet sich in der grafischen Darstellung an, dass die Zunahme der maximal erzielbaren Schweißgeschwindigkeit bei größeren Laserleistungen geringer ausfällt und im weiteren Verlauf eine Stagnation zu erwarten ist. Einen Überblick zu den erreichten maximalen Schweißgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Blechdicken und Stählen in

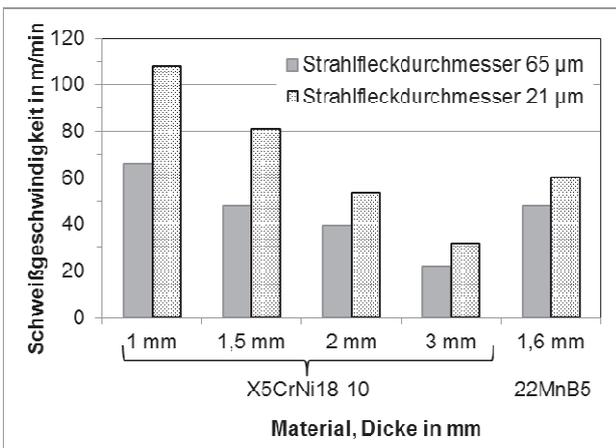


Abb.3: erreichte maximale Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Blechdicke, Material und Strahlfleckdurchmesser

Abhängigkeit vom Strahlfleckdurchmesser zeigt Abb.3. Die grafische Darstellung verdeutlicht erwartungsgemäß, dass bei beiden Strahlfleckdurchmes-

sern mit dünneren Blechdicken größere Schweißgeschwindigkeiten möglich sind. Eine detailliertere Analyse der Werte bestätigte den bekannten hyperbolischen Zusammenhang zwischen Materialdicke bzw. Einschweißtiefe und Schweißgeschwindigkeit. Die Ergebnisse zum größeren Strahlfleckdurchmesser wurden durchweg mit einer Laserleistung von 2,8 kW respektive einer Spitzenintensität von $1,7 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ generiert, die zum kleineren Strahlfleckdurchmesser für Blechdicken bis 1,5 mm mit 2,3 kW bzw. $1,3 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ und die größeren Blechdicken mit 2,8 kW bzw. $1,6 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$.

Nachdem geeignete Parameterbereiche für das Durchschweißen identifiziert werden konnten, erfolgte eine Beurteilung der erzeugten Schweißnähte. Zunächst sind die Nähte hinsichtlich aufgetretenen Humpings, eine die Schweißnahteigenschaften negativ beeinflussende Begleiterscheinung, analysiert worden.

Humping tritt bei Veränderung der Parameterbereiche nicht abrupt, sondern allmählich auf. Es wurde ein Übergangsbereich von gewohnter Nahtüberhöhung zu vereinzelt, unregelmäßig und sehr schwach ausgebildeten Humps beobachtet, vgl. Abb.4 oben und Mitte. Mit steigender Schweißge-

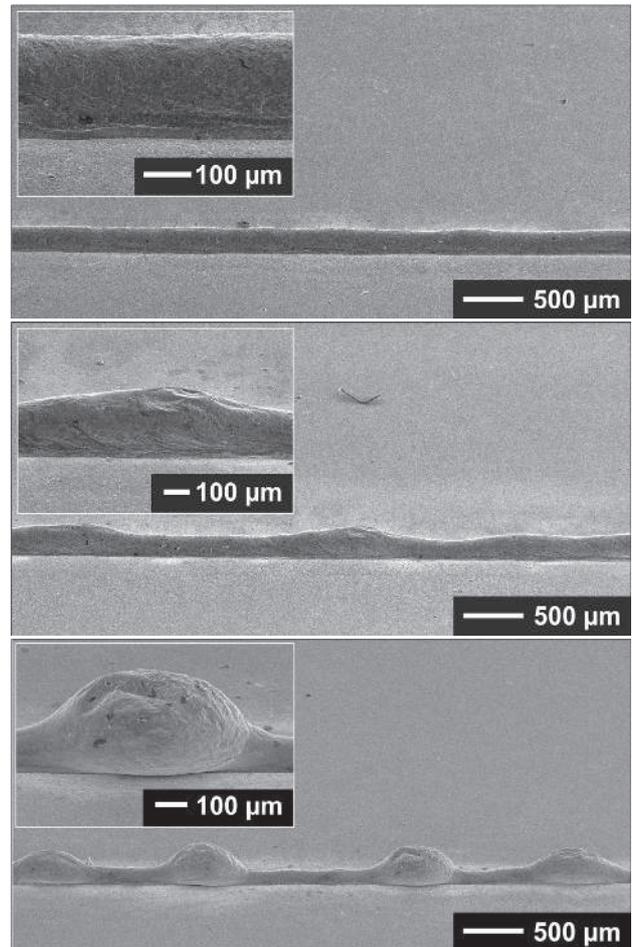


Abb.4: Schweißnahtvorderseiten an Edelstahlblech der Dicke 1,5 mm, oben: homogene Naht mit normaler Nahtüberhöhung, Mitte: beginnendes Humping, unten: ausgeprägtes homogenes Humping mit regelmäßigem periodischen Abstand der einzelnen Humps

schwindigkeit und applizierter Intensität entwickelt sich zunehmend homogenes Humping. Die Humping-Buckel entstehen in einem regelmäßigen periodischen Abstand von ca. 1,3 mm, s. Abb.4 unten. Eine weitere Erhöhung dieser beiden Parameter führt jedoch zu ungleichmäßigem Humping bis hin zu massiver Spritzerbildung.

Das Auftreten von Humping kann Prozessparameterbereichen zugeordnet werden. Abb.5 zeigt die Abhängigkeit des Humping-Effekts von den Prozessparametern Laserleistung bzw. Spitzenintensität

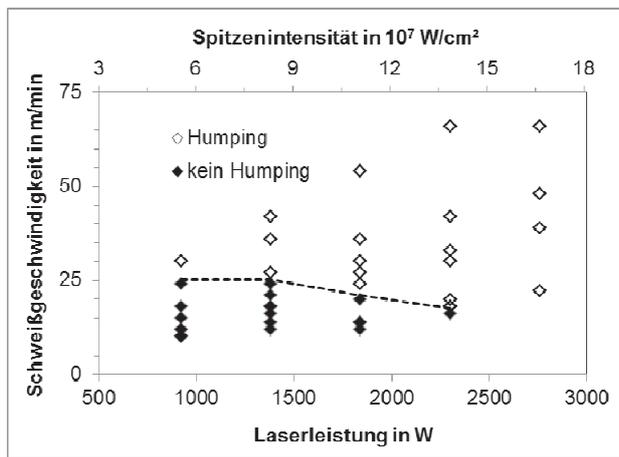


Abb.5: in Abhängigkeit von Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit auftretender Humping-Effekt bei Edelstahlblech (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$)

und Schweißgeschwindigkeit für Edelstahlblech unabhängig von der Blechdicke bei einer Strahlfleckgröße von $65 \mu\text{m}$. Das Auftreten von Humping wird von der applizierten Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit beeinflusst. Beispielsweise wurde Humping in den Untersuchungsergebnissen in Abb.5 bei einer Laserleistung von 920 W und einer Schweißgeschwindigkeit oberhalb von 24 m/min beobachtet. Bei größeren Laserleistungen von z.B. 2,3 kW sank die für humpingfreies Schweißen nutzbare Schweißgeschwindigkeit auf 16,2 m/min. Zusätzlich ergibt sich eine Abhängigkeit des Humpings in Verbindung mit der applizierten Laserleistung bzw. Spitzenintensität für verschiedene Einschweißstiefen, repräsentiert durch die Blechdicken, vgl. Abb.6. Von der Schweißgeschwindigkeit unabhängig setzt Humping für eine bestimmte Blechdicke respektive Einschweißtiefe oberhalb einer gewissen Laserleistung bzw. Spitzenintensität ein. Beispielsweise konnte ein 1,5 mm dickes Edelstahlblech bis zu einer Leistung von knapp 1,4 kW humpingfrei geschweißt werden. Im untersuchten Parameterbereich besteht in guter Näherung eine lineare Abhängigkeit für die Humping-Grenze. Im Vergleich weist der niedriglegierte Mangan-Borstahl eine stärkere Neigung zum Humping auf. Die größtmögliche Schweißgeschwindigkeit ohne Humping-Effekt betrug 15 m/min bei einer Laserleistung von 1,4 kW respektive einer Spitzenintensität von $8,3 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ und passt bezüglich der Blechdicke zu den Werten in Abb.6. Die Schweißgeschwindigkeit liegt jedoch unter jener von Edelstahl bei

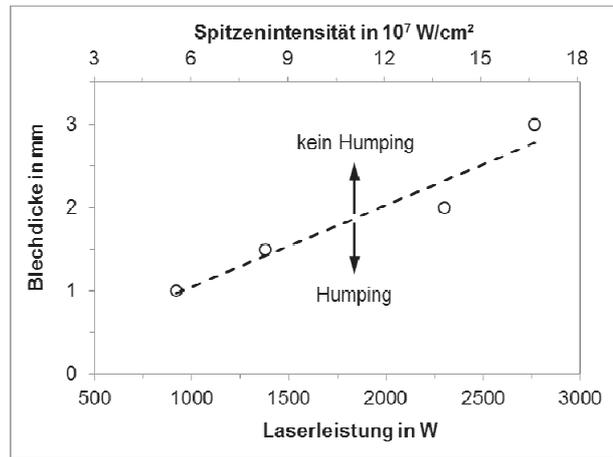


Abb.6: Humping in Abhängigkeit von Blechdicke und Laserleistung (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Material Edelstahl)

vergleichbaren Parametern. Das Humping hängt demnach, wie in [4] berichtet, auch von den Werkstoffeigenschaften, wie thermische Eigenschaften oder Viskosität und von den Legierungselementen ab, die entscheidenden Einfluss auf das Schmelzbad und seine Dynamik haben.

Untersuchungen mit der Brennweite 230 mm führten immer zu humpingbehafteten Schweißnähten. Bei der niedrigsten applizierten Leistung von 920 W betrug die Strahlspitzenintensität bereits $5,3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ und lag um knapp eine Größenordnung über den Werten, die bei einer Brennweite von 500 mm entstanden. Offensichtlich hängt das Auftreten von Humping ebenfalls noch von der applizierten Spitzenintensität der Laserstrahlung ab. Dabei steigt die Humping-Neigung bei höheren Spitzenintensitäten an.

An den geschweißten Proben wurde anschließend die Nahtgeometrie beurteilt. Prinzipiell wiesen alle Nähte eine Nadelform auf, s. Abb.7. Für beide Materialien in gleicher Weise zutreffend war das Gefüge in der Naht homogen und unterscheidet sich hin-

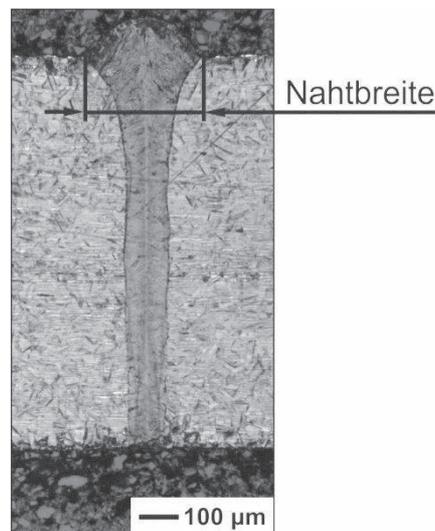


Abb.7: Querschliffpräparation einer Schweißnaht in 1 mm dickem Edelstahlblech (Parameter: $P_{\text{cw}} = 920 \text{ W}$, $v = 18 \text{ m/min}$, $2w_0 = 65 \mu\text{m}$)

sichtlich Korngröße und -form nicht vom Grundmaterial.

Aufgrund der Vorgabe, das Material durchzuschweißen, entsprach die Einschweißtiefe der Blechdicke. Die Nahtbreite wurde an der Blechoberfläche gemessen, vgl. Abb.7. In Abb.8 ist der Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit und Nahtbreite in Abhängigkeit von der applizierten Laserleistung für

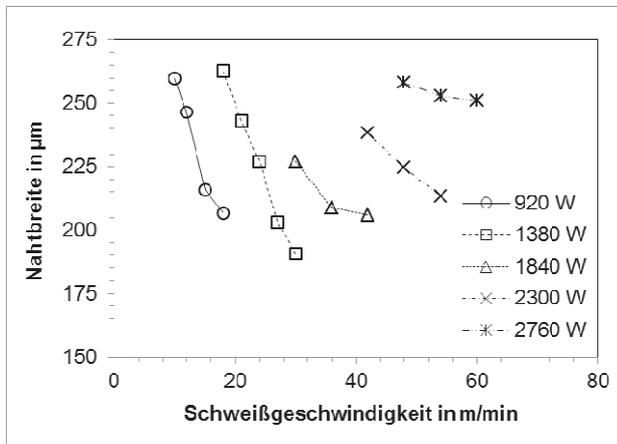


Abb.8: Nahtbreite in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit für verschiedene Laserleistungen (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl Dicke 1,5 mm)

Edelstahlblech der Dicke 1,5 mm grafisch dargestellt. Generell sank die Nahtbreite mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung. Mit zunehmender Laserleistung fiel die Abnahme der Nahtbreite jedoch sukzessive geringer aus. Tendenziell waren mit steigender Laserleistung und damit höherer Spitzenintensität bei gleicher Schweißgeschwindigkeit größere Nahtbreiten zu verzeichnen. Ursache dafür ist in erster Linie der zunehmende wirkende Strahlradius für die Intensitätsschwelle zum Schmelzen infolge erhöhter Laserleistung bzw. Spitzenintensität. Die Nahtbreiten betragen für diese Versuchsreihe ca. 260 μm im Maximum. Daraus ergibt sich ein Aspektverhältnis von



Abb.9: Schweißnaht mit Nahtüberhöhung und Wurzelrückfall (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl)

1:6. Bei 3 mm Blechdicke stieg die Nahtbreite bis auf maximal 400 μm an. Der 1,6 mm dicke Mangan-Borstahl zeigte ähnliche Nahtbreiten. Mit dem kleineren Strahlfleckdurchmesser der kurzbrennweitigeren Optik entstanden erwartungsgemäß geringere Nahtbreiten von weniger als 300 μm bei einer Blechdicke von 3 mm.

Weiterhin wurden die Schweißnähte hinsichtlich Nahtunregelmäßigkeiten nach ausgewählten Kriterien, wie Nahtüberhöhung und Wurzelüberhöhung/-rückfall gemäß DIN EN ISO 13919-1 analysiert, s. Abb.9. Die Bestimmung der Nahtüberhöhung erfolgte ausschließlich an humpungsfreien Schweißnähten. Abb.10 zeigt den Zusammenhang zwischen Nahtüberhöhung und Materialdicke für Schweißnähten

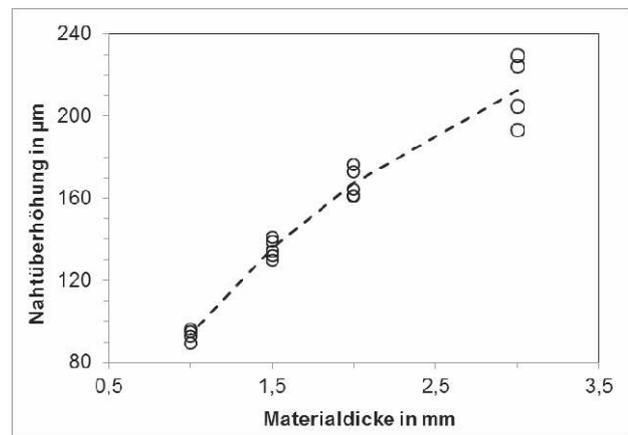


Abb.10: Nahtüberhöhung in Abhängigkeit von der Materialdicke (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl)

te, die mit einem Strahlfleckdurchmesser von 65 μm erzeugt wurden. Unabhängig von der applizierten Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit nahm die Nahtüberhöhung beginnend von knapp 100 μm bei 1 mm Blechdicke stetig bis zu ca. 200 μm bei 3 mm Blechdicke zu. Das Material, das die Nahtüberhöhung ausbildet, muss der Schweißnaht entstammen, wie man aus Abb.7 entnehmen kann. Weil sich das Gefüge durch den Schweißprozess nicht verändert hat, muss das Material aus Gründen der Volumenkonstanz demzufolge quer zur Schweißnaht eine Kontraktion erfahren haben. Dieser Kontraktionseffekt dürfte bei größeren Materialdicken sukzessive schwächer ausfallen, weil der Widerstand der umgebenden kälteren Materialbereiche ansteigt. Infolgedessen ist der Kurventrend leicht degressiv. Für die mit dem kleineren Strahlfleckdurchmesser von 21 μm generierten Schweißnähte konnten aufgrund des durchgängigen Auftretens von Humping keine Nahtüberhöhungen ermittelt werden.

Für die Ausbildung von Wurzelüberhöhung bzw.-rückfall mit dem größeren Strahlfleckdurchmesser von 65 μm ergab sich eine tendenzielle Abhängigkeit zur applizierten Spitzenintensität, s. Abb.11. Mit zunehmender Spitzenintensität schlug die Wurzelüberhöhung bei allen Dicken in einen Wurzelrückfall um, d.h. die Wurzel lag rückwärtig im Material. Dabei neigte der Mangan-Borstahl 22MnB5 am stärksten zum Wurzelrückfall. Grund für den Wurzelrück-

fall dürfte die heißere und damit niedrigviskosere Schmelze sein, die durch den Druck in der Dampf-

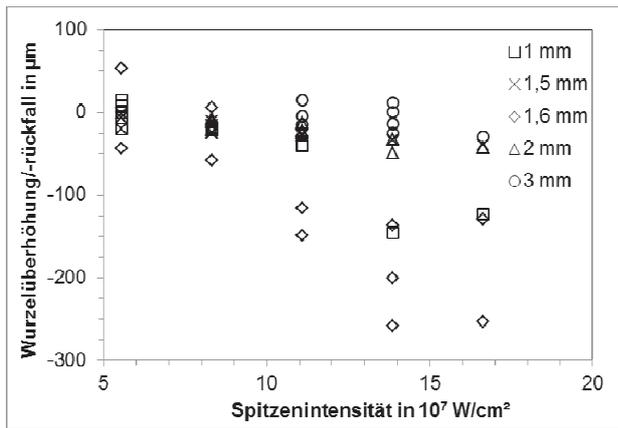


Abb.11: Wurzelüberhöhung/-rückfall in Abhängigkeit von der Spitzenintensität (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl Dicke 1-3 mm und 22MnB5 Dicke 1,6 mm)

kapillare zum Teil nach unten ausgetrieben wird und somit in der Naht fehlt. Dies äußerte sich in den Experimenten durch stärkeren Funkenflug an der Nahrückseite bei höheren Laserleistungen und damit Spitzenintensitäten.

Für die Untersuchungen mit dem kleineren Strahlfleckdurchmesser von $21 \mu\text{m}$ ergaben sich für die Wurzel Ausbildung ähnliche Tendenzen.

4. Zusammenfassung

Dieser Artikel berichtet über detaillierte Ergebnisse zum Hochgeschwindigkeitsschweißen von Stahl mit Laserscanner und hochbrillanter Laserstrahlung. Unter der Maßgabe, die jeweilige Blechdicke durchzuschweißen, wurden die Prozessparameter Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit in weiten Bereichen variiert und die größtmöglichen Schweißgeschwindigkeiten ermittelt. In Abhängigkeit der Blechdicke konnten für 1 mm dickes Material Schweißgeschwindigkeiten von mehr als 60 m/min (Strahlfleckgröße $65 \mu\text{m}$) bzw. 100 m/min (Strahlfleckgröße $21 \mu\text{m}$) mit Laserleistungen von 920 W bis 2,8 kW umgesetzt werden. In Abhängigkeit von den gewählten Prozessparametern stellte sich jedoch insbesondere bei hohen Spitzenintensitäten und Schweißgeschwindigkeiten Humping ein. Damit reduzierte sich die maximal erzielbare Schweißgeschwindigkeit für humpingfreie Nähte auf 25 m/min. Die Schweißnähte wurden nach verschiedenen Qualitätskriterien beurteilt. Das Gefüge in der Schweißzone zeigte für beide Stähle keinerlei Veränderungen gegenüber dem Grundwerkstoff. Die Nahtbreite betrug maximal $400 \mu\text{m}$ für das 3 mm dicke Blech, die Nahtüberhöhung variierte zwischen $100 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ für das 1 mm bzw. 3 mm dicke Blech. Für beide Strahlfleckdurchmesser konnte für

Edelstahl eine zunehmende Tendenz zum Wurzelrückfall bei höheren Intensitäten festgestellt werden. Der Mangan-Bor-Stahl neigt stärker zum Wurzelrückfall.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem BMBF für die Förderung der Technologieentwicklung (Förderkennzeichen 03IP506 und 03IPT506X).

Literaturverzeichnis

- [1] Weberpals, J.-P.: „Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen“, deutsche Dissertation, Universität Stuttgart (2010), ISBN 978-3-8316-0995-6
- [2] Klotzbach, A.; Hartmann, A.; Morgenthal, L.: „Laserstrahlschweißen im kW-Leistungsbereich durch schnelle Strahlablenkung“, 13. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, Scientific reports: Journal of the Mittweida University of Technology and Economics (1998), Nr.9 - Lasertechnik, S. 149-156
- [3] Berger, P.; Hügel, H.; Hess, A.; Weber, R.; Graf, T.: „Understanding of Humping Based on Conservation of Volume Flow“, Physics Procedia 12 (2011), pp. 232-240
- [4] Wie, P. S.; Chuang, K.C.; Ku, J.S.; DebRoy, T.: „Mechanisms of Spiking and Humping in Keyhole welding“, IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, vol. 2, no.3 (2012), pp. 383-394
- [5] Kawahito, Y.; Mizutani, M.; Katayama, S.: „Investigation of High Power Fiber Laser Welding Phenomena of Stainless Steel“, Transactions of Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Vol.36 No.2 (2007), pp. 11-15
- [6] Kittel, S.: „Welding with brilliant lasers - prospects and limitations for industrial applications“, 4th International Workshop on Fiber Lasers, November 5-6 (2008), Dresden, Germany
- [7] Kittel, S.; Dausinger, F.: „Welding with Brilliant Lasers: Prospects and Limitations“, Proceedings of SPIE, Vol. 7585 (2010), 758502
- [8] Berger, P.: „Modellierung des Laserstrahlschweißens - Ein Weg zum Prozessverständnis“, Laser Technik Journal April 2007, Nr.2 (2007), S. 31-34
- [9] Armstrong, R.E.: „Control of spiking in partial penetration electron beam welds“, Weld. J., vol. 49, no. 8, Oct. 1970, pp. 382-388
- [10] Wei, P.S.; Ho, C.Y.: „Beam focusing characteristics effect on energy reflection and absorption in a drilling or welding cavity of paraboloid of revolution“, Int. J. Heat Mass Transf., vol. 41, no. 21 (1998), pp. 3299-3308

WERKSTOFF- UND FÜGETECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN DER REFORMER-SYSTEMFERTIGUNG FÜR DIE BRENNSTOFFZELLENTÉCHNIK

Thomas Ebersbach, Jürgen Vester, Sabine Sändig, Simon Jahn

Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH, Otto-Schott-Straße 13, 07745 Jena

Die in der Brennstoffzellentechnik zur Anwendung kommenden Reformersysteme unterliegen starken korrosiven und thermischen Beanspruchungen. Um die geforderten hohen Standzeiten zu realisieren, ist eine Qualifizierung der Konstruktion und des Werkstoffes sowie der Fügetechnologie und der Prozessführung notwendig. Mit der systematischen Betrachtung des Reformersystems in Bezug auf Prozessgasatmosphäre, Temperaturverteilung und -wechselbelastung, sowie einer durchgeführten Schadensfallanalyse wurden mögliche Parameter im Hinblick auf eine Systemoptimierung ermittelt. Die dafür betrachteten hochlegierten Cr-Ni-Stähle umfassen die Werkstoffe X6CrNiTi18-10 (1.4541) und X5NiCrAlTi31-20 (1.4958). Zusätzlich wurde die Nickelbasislegierung NiCr23Fe (2.4851) ausgewählt. Die mittels Laserstrahlschweißen hergestellten Verbindungen wurden auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften vor und nach Hochtemperaturkorrosionstests unter simulierten Prozessbedingungen geprüft. Des Weiteren erfolgte eine Simulation der im Reformersystem auftretenden stationären Wärmespannungen. Die durchgeführten Optimierungen und deren Einfluss auf die Erhöhung der Standzeit wurden anhand eines exemplarischen Systems im Langzeitversuch bewertet.

1 Einleitung

Die steigende Nachfrage nach alternativen Energiequellen führt zu neuen Anforderungen in der Energietechnik. Innovative Technologien für die Energieerzeugung, wie zum Beispiel die Brennstoffzellentechnik, werden benötigt, um die Energieversorgung in der Zukunft zu sichern. Aktuell befinden sich Brennstoffzellenheizgeräte verschiedener Hersteller in der Feldtestphase. Im Rahmen dieser Feldtests werden verschiedene Fragestellungen in Bezug auf Standfestigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit der einzelnen Anlagenkomponenten untersucht. Anhand von Langzeitversuchen am Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) in Duisburg wurde festgestellt, dass Schäden im Bereich des Reformers infolge der vorliegenden kombinierten thermozyklischen Hochtemperaturkorrosionsbelastung auftreten. Zielstellung des Forschungsvorhabens IGF16118BG ist es, einen Reformer zu entwickeln, welcher eine hohe Standfestigkeit besitzt und gleichzeitig einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Hierzu bedarf es der Qualifizierung geeigneter Werkstoffe und Fertigungstechnologien sowie der Optimierung der Konstruktion und Prozessführung.

2 Reformerreaktor

Das Reformersystem in einem Brennstoffzellenheizgerät hat die Aufgabe, den Wasserstoff für die Reaktion in der Brennstoffzelle bereitzustellen. Als Ausgangsstoffe für die Wasserstoffherstellung kommen kohlenwasserstoffhaltige Gase (z. B. Erdgas, Flüssiggas) oder Flüssigkeiten (z. B. Diesel, Ethanol) zur Anwendung. Der Reformerreaktor ist zweiteilig aufgebaut und besteht zum einen aus der Brennkammer und zum anderen aus einem Behälter mit einer Katalysatorfüllung. Beide Bereiche sind nur durch eine dünne Zwischenwand getrennt. In der Brennkammer sorgt ein Brennersystem für die notwendigen Temperaturen, um den Umsatz der Kohlenwasserstoffverbindungen in Wasserstoff zu gewährleisten. Das Prozessgas strömt entsprechend um die Brennkammeraußenwand und das Rauchgas der

Verbrennung wird außen durch den Reformerreaktor geleitet, s. Bild 1.

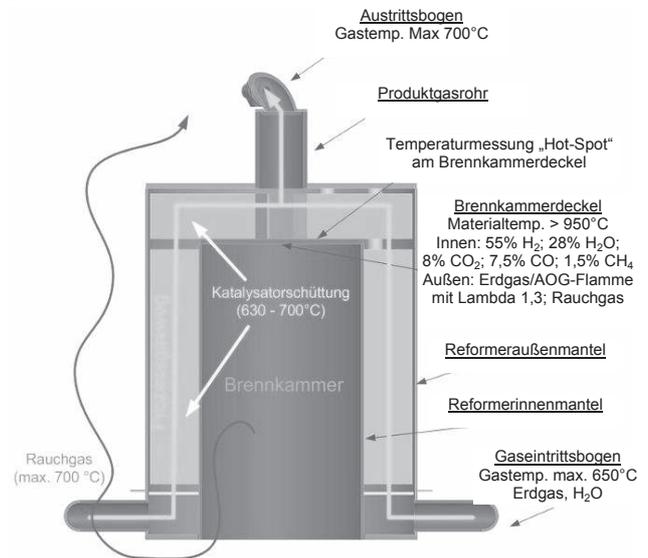


Bild 1: Schematischer Aufbau eines Reformerreaktors in einem Reformersystem für Brennzellenanwendungen

3 Schadensfallanalyse

Die Untersuchungen zur Ermittlung der wirkenden Schadensmechanismen wurden an einem Reformerreaktor aus X5NiCrAlTi31-20 (1.4958) durchgeführt. Dieser Reaktor wies nach 2000 Stunden zyklischem Betrieb signifikante Schäden im Bereich der Schweißung und dem Brennkammerdeckel auf. In Bild 2 wird deutlich, dass es im Deckelbereich zum direkten Werkstoffversagen gekommen ist. Die vorliegende WIG-Schweißverbindung als Ecknaht zwischen Deckel und Mantel sowie die Längsnaht an dem gewickelten Rohr wurden anhand von metallographischen Schliffbildern und REM-Untersuchungen charakterisiert. Die Untersuchungen dienen der Erklärung des vorliegenden Korrosionsmechanismus: Durch die direkte Flammenbeaufschlagung kommt es am Brennkammerdeckel zur Ausbildung eines Temperatur Hotspots. Der vorliegende Korrosionsangriff erfolgte interkristallin über

die Korngrenzen und führt zur Chromverarmung des Grundwerkstoffes. Durch die zyklische Betriebsweise des Systems wird an der Werkstoffoberfläche eine gleichmäßige Ausbildung einer festhaftenden Chromoxidschicht für die Passivierung verhindert. Die vorliegende Hotspot-Temperatur im Deckelbereich führt am Werkstoff 1.4958 zu plastischen Verformungen bis hin zum plastischen Fließen des Materials.

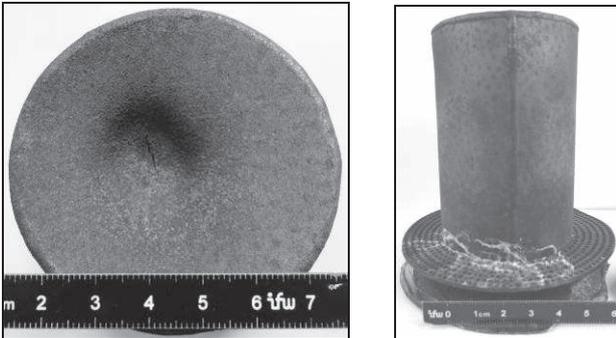


Bild 2: Brennkammer mit direkten Materialversagen

Die untersuchten Schweißverbindungen, welche mittels WIG-Schweißen hergestellt wurden, zeigen besonders im Bereich der Wärmeeinflusszone einen starken Korrosionsangriff, der durch die Gefügeveränderungen über die Korngrenzen sehr deutlich ausgeprägt ist.

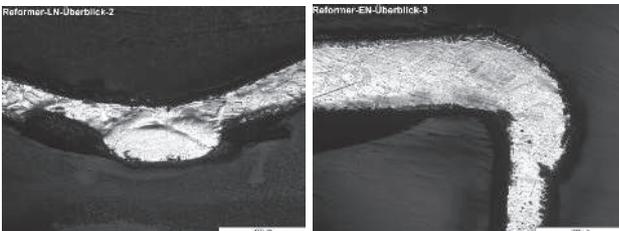


Bild 3: Schliffbilder zu den Schweißverbindungen am Reformierreaktor nach $t=2000$ zyklischen Betriebsstunden, links: Ecknaht im Deckelbereich, rechts: Längsnaht im Mantelbereich

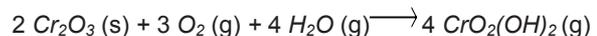
4 Bestimmung der Einsatzbedingungen

Im Rahmen der Untersuchungen zur Optimierung des Reformersystems war es notwendig, die vorherrschenden Einsatzbedingungen für die Werkstoffbelastung zu kennen. Von besonderem Interesse ist die Temperaturverteilung und Prozessgaszusammensetzung sowohl in der Brennkammer als auch im Katalysatorbereich. Die Temperaturen wurden an definierten Punkten in einem realen Reformierreaktor mittels laseraufgeschweißter Thermoelemente gemessen. Bild 4 zeigt die Anordnung der Thermoelemente in der Brennkammer.



Bild 4: Anordnung der Thermoelemente in der Brennkammer

Die ermittelten Maximaltemperaturen lagen im Bereich des Brennkammerdeckels bei 1050°C . Für die gemessenen Prozessgaszusammensetzungen im Bereich der Brennkammer (51,6% N_2 ; 31,9% H_2O ; 13,3% CO_2 ; 3,2% O_2) und des Katalysators (55% H_2 ; 28% H_2O ; 8% CO_2 ; 7,5% CO ; 1,5% CH_4) erfolgte die Ermittlung der Kohlenstoffaktivitäten und der Sauerstoffpartialdrücke mit Hilfe des Programmes FactSage. Aus den thermodynamischen Berechnungen geht hervor, dass in der Brennkammeratmosphäre ein höherer Sauerstoffpartialdruck ($p_{\text{O}_2} = 0.15 \text{ bar}$) vorliegt als in der Katalysatoratmosphäre ($p_{\text{O}_2} = 10^{-15} \text{ bar}$). Die Kohlenstoffaktivität in beiden Atmosphären liegt unter eins und schließt das Auftreten von Metall Dusting aus. Das Vorhandensein eines hohen Sauerstoffpartialdrucks in Kombination mit einem Wasserdampfgehalt führt zur Bildung von Chromoxyhydroxid:



Diese Reaktion fördert das Abdampfen der schützenden Chromoxidschicht. Die Auslagerungstests bestätigen, dass die Brennkammeratmosphäre durch ihren hohen Sauerstoffpartialdruck aggressiver als die Katalysatoratmosphäre ist und mit ihrer spezifischen Zusammensetzung eine stark korrosive Wirkung auf das System ausübt. Die vorliegende Oxidation stellt dabei den primären Korrosionsmechanismus dar, welcher zur späteren Schädigung des Bauteils führt.

Entsprechend der Erkenntnisse zur Temperaturverteilung und Wirkungsweise der vorliegenden Prozessgasatmosphären erfolgte die Auswahl der zur Anwendung kommenden Werkstoffe.

5 Konstruktionsoptimierung, Werkstoffuntersuchungen und Schweißversuche

Für die Optimierung des Reformers in Bezug auf seine Langzeitbeständigkeit ist es notwendig, die zur Anwendung kommende Füge­technologie entsprechend den gegebenen Anforderungen anzupassen. In früheren Versuchen wurden vermehrt Unregelmäßigkeiten, wie zum Beispiel Risse in den Schweißverbindungen, nachgewiesen. Des Weiteren ist eine konstruktive Anpassung des Reformers notwendig, um vorliegende Wärmespannungen im Bereich der Schweißverbindungen zu senken.

Es wurden verschiedene Schweißverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall untersucht u. a. das Laserstrahlschweißen. Für das Fügen der Werkstoffe X6CrNiTi18-10 (1.4541), X5NiCrAlTi31-20 (1.4958) und NiCr23Fe (2.4851) war es notwendig, die spezifischen Prozessparameter unter Einhaltung der maximalen Streckenenergie zu ermitteln, um die Bildung von Heißbrissen zu vermeiden. Dies wurde auch unter dem Aspekt einer wirtschaftlichen Ausführung der Schweißverbindungen durchgeführt. Bild 5 zeigt beispielhaft den Versuchsaufbau für das Laserstrahlschweißen und der Spann- und Formiervorrichtung.

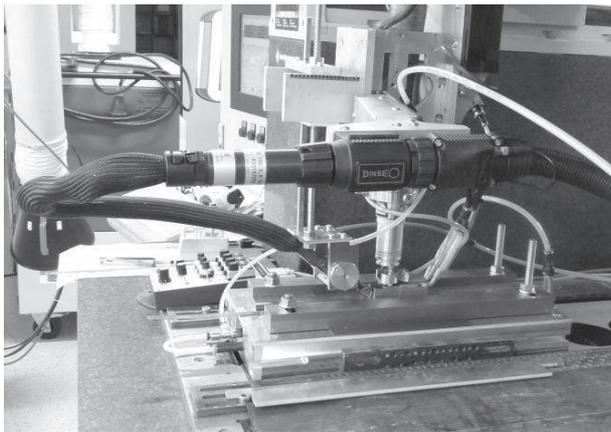


Bild 5: Versuchsaufbau zum Laserstrahlschweißen mit angepasster Schleppdüse

Im ersten Schritt hierzu wurden Standardfügeverbindungen hergestellt, welche auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht wurden. Die sich ergebende Schweißverbindung am 1.4958 ist in Bild 6 dargestellt. Für die hergestellten Verbindungen am X6CrNiTi18-10 war es zusätzlich notwendig, diesen im Pulverpackverfahren mit einer Diffusionsschicht auf Aluminium-Basis zu versehen, um die geforderte Langzeitbeständigkeit gewährleisten zu können.

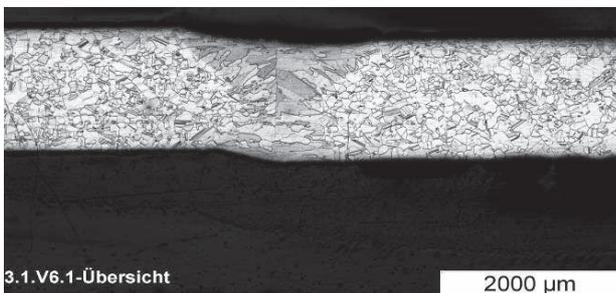


Bild 6: Makroschliff der Schweißverbindung 1.4958, geschweißt mittels Laser

Die Durchführung der Festigkeitsuntersuchungen erfolgte sowohl direkt nach dem Schweißen als auch nach einem definierten Hochtemperaturkorrosionstest (HT-Test). Der HT-Korrosionstest wurde an genormten Zugproben und unter Anwendung der realen Prozessgasatmosphären (Brennkammer- und Katalysatorbereich) durchgeführt. Das Temperatur-Zeit-Regime für den Korrosionstest in einem Tempe-

raturbereich zwischen $T = 20$ bis 1000°C ist in Bild 7 enthalten. Der Zyklus simuliert die späteren Anwendungsbedingungen.

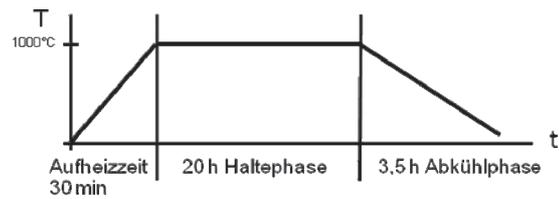


Bild 7: Temperatur-Zeit-Regime für Hochtemperaturkorrosionstest

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten statischen Zugversuche vor und nach der Auslagerung im Hochtemperaturkorrosionstest ist in Bild 8 dargestellt. Anhand des Diagramms wird deutlich, dass es infolge des Korrosionstests zu einem Abfall der Zugfestigkeit kommt. Des Weiteren ist der Einfluss der vorliegenden Prozessgasatmosphäre erkennbar. In der Brennkammeratmosphäre ist durch den höheren Sauerstoffpartialdruck in Verbindung mit Wasserdampf ein stärkerer Korrosionsangriff an der Werkstoffoberfläche festgestellt worden, was zu einer verringerten Zugfestigkeit führt. Bild 9 verdeutlicht den Korrosionsangriff an der Werkstoffoberfläche des 1.4958 nach $t = 1000$ h in der Brennkammeratmosphäre. Die Schliffbilder belegen, dass es an der Oberfläche zu keiner gleichmäßigen Ausbildung einer festhaftenden Oxidschicht kommt. Des Weiteren kommt es in Ansätzen zur Korngrenzenoxidation, welche sich bei längerer Betriebszeit beschleunigt fortsetzen würde.

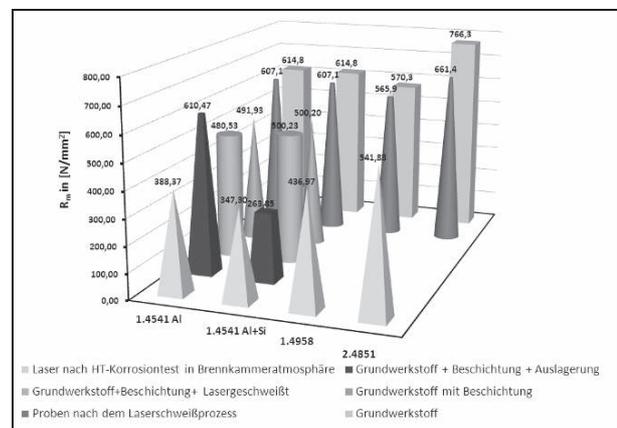


Bild 8: Zusammenfassung der Zugfestigkeitswerte vor und nach dem Hochtemperaturkorrosionstest ($t = 1000$ h) in Abhängigkeit vom Werkstoff



Bild 9: Mikroschliff am 1.4958 nach HT-Korrosionstest mit $t = 1000$ h in der Brennkammeratmosphäre

Für die Anpassung der Schweißkonstruktion wurden mittels Simulation verschiedene Deckelgeometrien bei unterschiedlichen Temperaturen betrachtet. Die Ergebnisse aus der Simulation zeigen, dass die aktuell zur Anwendung kommende Ausführungsvariante mit einer Ecknaht im Übergangsbereich zwischen Deckel und Mantel zu hohen Wärmespannungen führt und somit für die Anwendung nicht geeignet ist. Eine geringere Wärmespannung im Bereich der Schweißverbindung liegt bei den Ausführungsvarianten als Klöpperboden oder als flachgewölbter Boden vor.

Die Ausführung der Schweißverbindungen erfolgt bei den angepassten Varianten als Stumpfstoß zwischen Brennkammermantel und Brennkammerdeckel, siehe Bild 10. Diese Ausführungsvariante eignet sich besser zum Schweißen als der ursprünglich zur Anwendung kommende Eckstoß. Es ist so möglich, die Schweißverbindung in Bezug auf eine geringere Wärmeeinbringung und einer sicheren Wurzel erfassung qualitativ hochwertiger auszuführen.

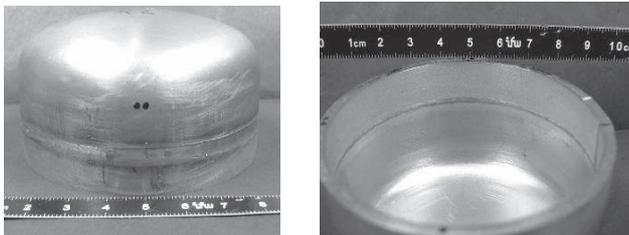


Bild 10: Laserstrahlschweißverbindung an optimierter Deckelgeometrie mit Klöpperboden

6 Qualifizierung an Funktionsmuster

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zur konstruktiven Auslegung und Ausführung der Schweißverbindung wurden anhand eines Funktionsmusters qualifiziert. Das Funktionsmuster-Reformersystem wurde für 1000 h mit Zyklen beaufschlagt. Es konnte festgestellt werden, dass an der Brennkammer keine signifikanten Schäden entstanden sind. Die verwendete Aluminiumbeschichtung am X5NiCrAlTi3120 führte zu einer stabilen Deckschicht, welche den Korrosionsangriff bzw. -fortschritt deutlich verlangsamte. Das Laserstrahlschweißen der Stumpfverbindung zwischen Rohr und Deckel zeigte auch nach der Langzeitbeanspruchung keine Unregelmäßigkeiten, siehe Bild 11. Die geringe Wärmeeinbringung des Verfahrens und die daraus resultierende sehr schmale Wärmeeinflusszone wirken sich hierbei positiv aus.

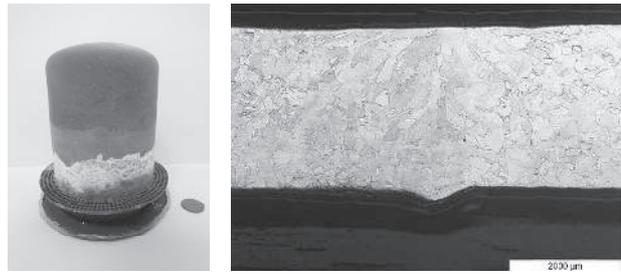


Bild 11: Reformersystem und Schweißnaht nach 1000 stündigen Langzeitversuch unter realen Einsatzbedingungen am 1.4958 mit Aluminiumbeschichtung

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen durchgeführt, um die zur Anwendung kommenden Werkstoffe und Fügetechnologie zu qualifizieren. Es konnte festgestellt werden, dass es durch die zyklische Betriebsweise mit den vorliegenden schnellen Temperaturwechseln zu einem verstärkten Korrosionsangriff aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Grundwerkstoff und der Passivschicht aus Chromoxid kommt. Die Forderung an die zur Anwendung kommenden Werkstoffe liegt in der Ausbildung einer festhaftenden Deckschicht an der Werkstoffoberfläche sowie einer hohen Zeitstandfestigkeit. Für die zur Anwendung kommende Fügetechnologie sollte ein möglichst geringer thermischer Energieeintrag gewährleistet sein wie zum Beispiel beim Laserstrahlschweißen realisierbar, um höchste Festigkeiten und eine schmale Wärmeeinflusszone zu erhalten. Der Schweißprozess sollte nach Möglichkeit mit einer angepassten Schutzgasführung erfolgen, um eine saubere Nahtanbindung und -ausbildung zu erreichen. Des Weiteren erfolgte auf Basis von Simulationen verschiedener Brennkammergeometrien die Festlegung einer geeigneten Ausprägung in Form eines Klöpperbodens. Die zur Anwendung kommenden Diffusionsbeschichtungen auf Aluminium-Basis konnten für den spezifischen Anwendungsfall angepasst werden und führten zu einer Steigerung der Korrosionsbeständigkeit.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Werkstoff- und fügetechnische Analyse eines Reformers für Brennstoffzellenanwendungen“ (FOSTA P810 – IGF16118BG-1) der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technik (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) finanziert. Dank gilt auch den beteiligten Industrievertretern ThyssenKrupp VDM, ThyssenKrupp Nirosta, BAXI INNOTECH GmbH, enymotion GmbH, Deutsche Edelstahlwerke, Böhler Schweißtechnik GmbH und der Riesaer Brennstoffzelle-technik GmbH.

MIKROPRODUKTION IM LASERFOKUS: MIKROBEARBEITUNG MIT UKP-LASERN

Severin Luzius, Marc Sailer, Jan Wieduwilt, Matthias Busch, Christof Siebert, Birgit Faisst
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Str. 2, 71254 Ditzingen

Die Fluenz ist eine wichtige Kenngröße bei der Bearbeitung von Metallen mit Ultrakurzpulslasern. Sie sollte die Abtragungsschwelle des Materials überschreiten, jedoch unter der thermischen Schwelle bleiben. Zwischen diesen Grenzen gibt es einen optimalen Arbeitspunkt bei dem man hohe Abtragungseffizienz erreicht, ohne thermische Einflüsse in Kauf nehmen zu müssen.

Defokussierung ist ein einfaches Mittel diesen Arbeitspunkt zu erreichen. Der optimale Arbeitspunkt liegt dann an dem Punkt, an dem die Isophote der Abtragungsschwelle ihre maximale Breite erreicht.

Diese Effekte sind materialabhängig. Der Vergleich der Abtragungseffizienzen von Stahl und Glas zeigt, dass bei Glas die Abtragungseffizienz bei Steigerung der Fluenz auf Werte über 15 J/cm^2 noch erhöht werden kann, während bei Stahl die Abtragungseffizienz bereits ab einer Fluenz von ca. 3 J/cm^2 sinkt.

1. Einleitung

Ultrakurzpulslaser haben sich einen festen Platz in der Mikroproduktion erobert. Wenn es darum geht, Materialien mit hoher Qualität, geringem Wärmeeinfluss und mit hoher Produktivität zu bearbeiten, sind Pikosekundenlaser das Werkzeug der Wahl.

Qualität und Geschwindigkeit der Bearbeitung werden durch verschiedene Parameter beeinflusst: Die mittlere Leistung, die Pulsenergie, die Wiederholrate und natürlich die Bearbeitungsstrategie. Die Abtragsscharakteristik – das Verhältnis von Schmelze, Dampf und Plasma – wird maßgeblich durch die räumliche und zeitliche Energieverteilung beeinflusst.

2. Abhängigkeit des Abtrags von der Pulsdauer

Die Abtragsrate pro Puls steigt mit steigender Fluenz. In Abbildung 1 ist der Abtrag pro Puls über die Fluenz für verschiedene Pulsdauern aufgetragen. In der Regel steigt die Abtragsrate mit steigender Fluenz. Der geringe Anstieg des Abtrages pro Puls bei einer Pulsdauer von einer Pikosekunde deutet jedoch auf eine sinkende Abtragungseffizienz bei höheren Energiedichten hin – bezogen auf die mittlere Leistung des Lasers wird weniger Volumen abgetragen. Diese Darstellung berücksichtigt allerdings nicht die Qualität des Bearbeitungsergebnisses: Bei Pulsdauern unter 10 Pikosekunden werden Ergebnisse ohne signifikanten Wärmeeintrag beobachtet.

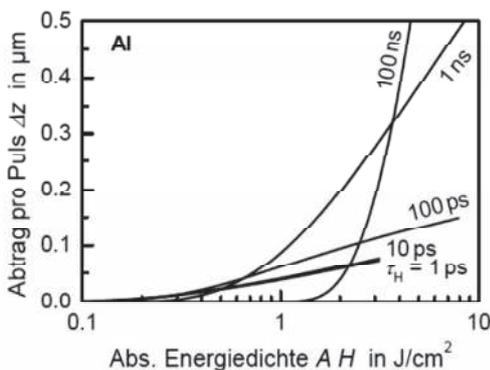


Abbildung 1: Abtrag pro Puls auf Aluminium [3]

3. Abtragungsschwelle und thermische Schwelle

Bei der Materialbearbeitung mit Pikosekundenlasern sind zwei wesentliche Regimes zu beobachten. Ab der Abtragungsschwelle steigt der quadrierte Abtragungsdurchmesser mit steigender Fluenz flach an (Abbildung 2). Ab einer Schwellfluenz wird die Steigung größer; diese Fluenz wird thermische Schwelle genannt. Oberhalb dieser Schwelle sind thermische Effekte im Abtrag zu beobachten.

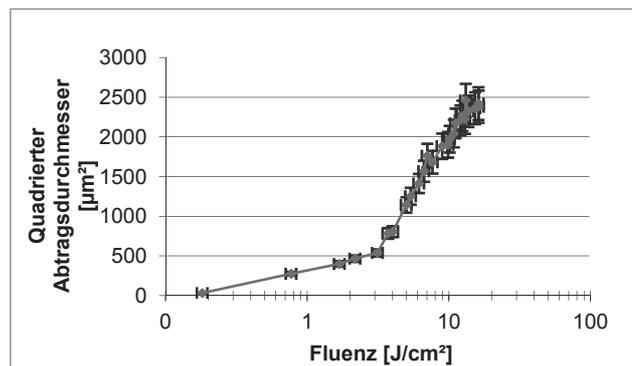


Abbildung 2: Abtragungsschwellwertbestimmung von Edelstahl [1]

Verantwortlich für die Vergrößerung des Abtragungsdurchmessers ist das gaußförmige Intensitätsprofil des beugungsbegrenzten Strahls. Spricht man von Fluenz, so wird in den meisten Fällen die mittlere Fluenz, also die durch den $1/e^2$ -Durchmesser geteilte Pulsenergie verstanden. Tatsächlich weist die Fluenz jedoch auch eine gaußförmige Verteilung auf. Somit liegen Randbereiche der Verteilung immer unterhalb der Abtragungsschwelle. Mit zunehmender mittlerer Fluenz werden diese Randbereiche über die Abtragungsschwelle gehoben und somit der Abtragungsdurchmesser vergrößert. Gleichzeitig steigt die Spitzenfluenz an und erreicht schließlich die thermische Schwelle.

4. Defokussierung

Betrachtet man Bereiche konstanter Intensität (Isophoten) eines beugungsbegrenzten Strahls in Ausbreitungsrichtung, so erkennt man besonders für niedrige Intensitäten zunächst eine starke Verbreiterung, bevor sie schließlich Null werden (Abbildung 3).

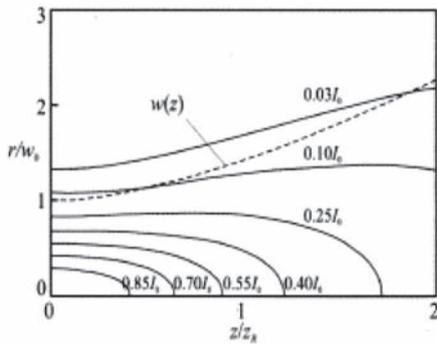


Abbildung 3: Intensitätsverlauf in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung [2]

Die Auswirkungen der Isophoten lassen sich bei Fokusreihen beobachten. Dabei wird ein Werkstück mit Pulsen in unterschiedlichen Fokuslagen bearbeitet. Außerhalb der Fokusposition (Abbildung 4) wird der Abtrag zunächst breiter, bevor er gegen Null geht. Gleichzeitig ist bei der Bearbeitung im Fokus ein deutlicher Wärmeeinfluss sichtbar, während bei den defokussierten Abträgen die Qualität deutlich zunimmt.

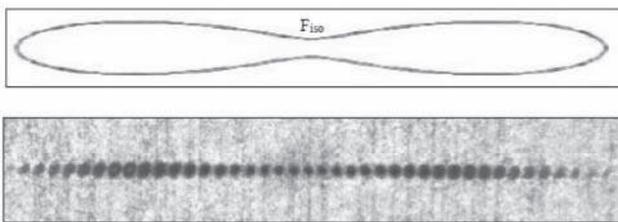


Abbildung 4: Typische Isophote und Abtragsdurchmesser bei Defokus [4]

Durch Defokussierung kann die Abtragseffizienz bei hoher Pulsenergie gesteigert und gleichzeitig eine hohe Qualität erzielt werden.

5. Abtragseffizienzen auf Edelstahl 1.4301 bei Defokussierung

Versuche zum Abtragen eines quadratischen Volumens mit einer Pulsdauer von etwa 6 ps und konstanter mittlerer Leistung auf Edelstahl 1.4301 bei verschiedenen Fokuspositionen zeigen eine deutliche Steigerung der Abtragseffizienz bis etwa 3 mm Defokus (Abbildung 5).

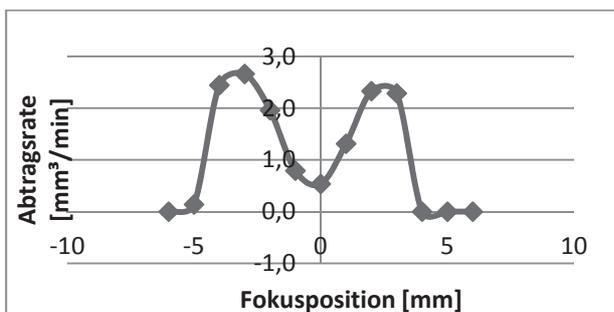


Abbildung 5: Abtragsraten bei unterschiedlichen Fokuspositionen [4]

Ein Vergleich des so ermittelten optimalen Arbeitspunktes (grüner Bereich in Abbildung 6) mit den Isophoten der Abtragsschwelle (äußere Isophote in Abbildung 6) und der thermischen Schwelle (innere Isophote in Abbildung 6) lassen darauf schließen, dass der optimale Arbeitspunkt dort erreicht wird, wo die Isophote der Abtragsschwelle den größten Durchmesser erreicht. Dabei sollte die Spitzenfluenz die thermische Schwelle nicht überschreiten.

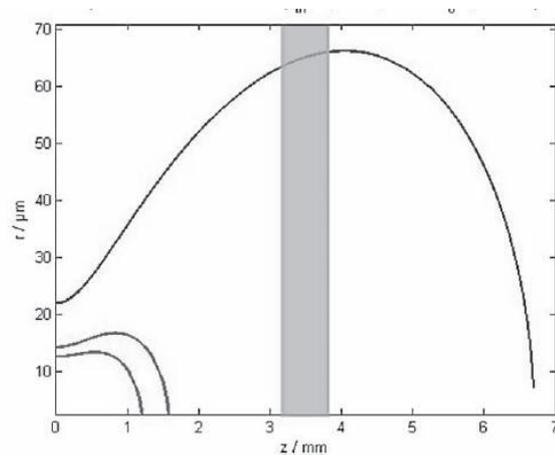


Abbildung 6: Wichtigste Isophoten und optimaler Arbeitspunkt [4]

Es wird also deutlich, dass die mittlere Fluenz nicht isoliert betrachtet werden sollte. Vielmehr muss das Fluenz- bzw. Intensitätsprofil im Verhältnis zu der materialspezifischen Abtragsschwelle und der thermischen Schwelle betrachtet werden. Insbesondere bei der Betrachtung nicht-gaußförmiger Intensitätsprofile weist dies interessante Möglichkeiten auf. Ein Top-Hat-Profil könnte zum Beispiel in der Lage sein die gesamte Energie des Laserpulses mit optimaler Fluenz einzubringen und so die Abtragseffizienz weiter zu steigern.

Ein ähnliches Verhalten konnte auf allen Metallen festgestellt werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Berechnung der Isophote der Abtragsschwelle ein gangbarer Weg für die Prozessoptimierung von Abtragsprozessen mit Ultrakurzpulslasern auf Metallen ist.

6. Fluenzen – Vergleich Stahl und Glas

Trägt man die Abtragseffizienz – also die auf die mittlere Leistung normierte Abtragsrate – der unterschiedlichen Fokuspositionen über die dort herrschende Fluenz auf, so erkennt man zunächst eine Steigerung der Abtragsrate, bevor sie ab ca. 3 J/cm² wieder absinkt (Abbildung 7).

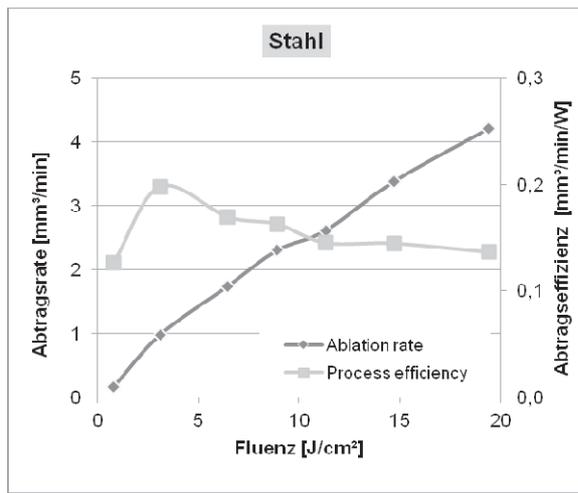


Abbildung 7: Abtragsraten und –effizienz bei der Bearbeitung von Stahl

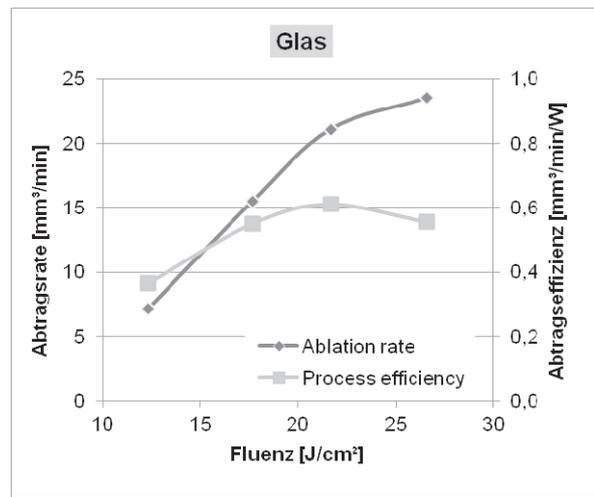


Abbildung 8: Abtragsraten und –effizienz bei der Bearbeitung von Glas

Bei transparenten Materialien kann die Bandlücke durch die Photonenenergie im sichtbaren und nahen infraroten Bereich nicht überwunden werden, es findet keine lineare Absorption statt. Bei hohen Leistungsdichten kommt es jedoch zu Mehrphotonenabsorption. Prozesse auf Glas profitieren daher von hoher Fluenz bei kurzen Pulsdauern.

Daher kann in diesen Versuchen auf Glas bis zu Fluenzen über 20 J/cm² noch eine Erhöhung der Abtragseffizienz beobachtet werden (Abbildung 8).

Literaturverzeichnis

- [1] Büttner, Simone: Grundlegende Untersuchungen zum Materialabtrag mit einem Ultrakurz-pulsscheibenlaser. Hochschule Furtwangen University, Diplomarbeit, 2007
- [2] Hügel, H. ; Graf, T.: Laser in der Fertigung. 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag (2009)
- [3] Ruf, Andreas: Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern. Universität Stuttgart, Dissertation, 2004
- [4] Sailer, Marc: Prozessoptimierung beim Abtrag von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen. Hochschule Furtwangen University

MIKROLASERAUFTRAGSSCHWEIßEN ZUM ERZEUGEN VON FUNKTIONSFLÄCHEN MITTELS SCHWEIßGEL

Dieter Fischer
SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz

1. Einleitung

Im Vortrag werden Ergebnisse zu Untersuchungen dargestellt, die hauptsächlich im Rahmen zweier geförderter Projekte entstanden sind. Einerseits ist dies das vom BMBF geförderte Projekt MIFULAS (01 RI 0904C) in dem Grundlagen zum Mikrolaserauftragsschweißen im Mittelpunkt standen und andererseits das Projekt „Entwicklung einer Produktionstechnologie und -technik zur industriellen Realisierung eines patentierten Mikrolaserauftragsschweißverfahrens“ (EP101321) das vom BMWI teilfinanziert wurde und Untersuchungen zum Schweißgel als Zusatzstoff beinhaltet.

Im Gegensatz zu den meisten Beiträgen von Hochschulen und Forschungsinstituten, bei denen außerhalb der Grundlagenforschung entweder die Modellbildung oder hauptsächlich der Nachweis der prinzipiellen Nutzbarkeit chemisch physikalischer Zusammenhänge und Wechselwirkungen zur Mikrolasermaterialbearbeitung behandelt werden, stehen bei industriellen Beiträgen produktions-technische Fragestellungen im Mittelpunkt. Bis zur wirtschaftlichen Nutzung neuer Erkenntnisse ist es oft ein weiter Weg, der in mehrere Phasen und Abschnitte aufgeteilt wird. Nicht umsonst werden die förderbaren Arbeiten der Forschung und Entwicklung in die Grundlagenforschung, die industrielle Forschung und die experimentelle Entwicklung unterschieden. Die Eigenbeteiligung der Industrie nimmt in der beschriebenen Reihenfolge stetig zu. Auf einen Satz verdichtet heißt das, dass die Forschung aus Geld Wissen generiert und die Industrie aus diesem Wissen mittels verkaufter Produkte Geld erwirtschaftet.

Für das Gebiet des Mikrolaserauftragsschweißens zur Generierung von Funktionsflächen heißt das konkret, dass es für die Nutzung der Produktionstechnik fast nie ausreicht, kleinste Funktionsflächen in einer ausreichenden Qualität prinzipiell herstellen zu können. Um eine Prozessinnovation nachhaltig wirtschaftlich erfolgreich umzusetzen, müssen die Stückkosten gegenüber der abzulösenden Technologie nachweislich geringer sein. Dies bedeutet, dass entweder mindestens die notwendigen Investitionskosten deutlich geringer sind (beispielsweise durch Verkürzung der Prozesskette) bei gleicher Produktivität oder bei vergleichbaren Investitionen die Produktivität stark zunimmt.

2. Charakteristik Mikrolaserauftragsschweißen

Für das im Fokus stehende Thema muss zunächst konstatiert werden, dass das Laserauftragsschweißen bereits seit längerer Zeit erfolgreich in-

dustriell genutzt wird. Es dürfte dazu regional bekannt sein, dass beispielsweise das Mittweidaer Unternehmen Laservorm sowohl auf diesem Gebiet als Dienstleister und Lohnfertiger aktiv ist als auch entsprechende Anlagen entwickelt. Üblicherweise werden durch Laserauftragsschweißen Verschleißschutzschichten und die Regenerierung von verschlissenen Konturen realisiert.

Mikrolaserauftragsschweißen dient aber hauptsächlich der Erzeugung von Funktionsflächen, die einerseits geometrische Abmessungen weit unter 1 mm² haben und andererseits durch spezielle, meist sehr teure Materialien auf preiswertem Grundmaterial spezielle Funktionen im elektrischen, optischen, radiologischen oder einem anderen physikalischen Bereich ermöglichen.

Typischerweise wird bisher auch im Mikrobereich der (teure) Zusatzwerkstoff in Form von fein granuliertem Pulver oder in Sonderfällen als extrem dünner Draht in einem einstufigen Prozess verwendet. Einstufig heißt in diesem Fall, dass das Pulver direkt in den fokussierten Laserstrahl geblasen wird. Die Düsen können sowohl konzentrisch zum Laserstrahl, als auch im spitzen Winkel zur Materialoberfläche angeordnet sein.

Diese Art der Zuführung des Zusatzwerkstoffes bereitet eine Reihe von Problemen.

- extrem fein granuliertes Pulver (Korngröße <5 µm) lässt sich mit üblichen Fördermechanismen nicht sicher zuführen
- da nur wenige Prozent des geförderten Pulvers vom fokussierten Laser aufgeschmolzen und mit dem Basismaterial verbunden werden, muss das unverbrauchte Pulver gesammelt u. U. gereinigt und in einen Kreisprozess zurückgeführt werden, der nie verlustfrei realisierbar ist.
- Für die Erzeugung mehrerer Mikrofonktionsflächen an unterschiedlichen geometrischen Orten muss die Zeitkonstante beachtet werden, die nach Ausrichtung der Pulverdüse benötigt wird bis der Material-Luftstrom laminare Verhältnisse annimmt.

Das letztgenannte Problem schränkt die Produktivität zur Erzeugung kleinster Funktionsflächen erheblich ein. Die Ausrichtung und Ausbildung des laminaren Massestroms lässt sich nicht sinnvoll mit hochdynamischen Scannerlösungen zur Lasermaterialbearbeitung koppeln.

Der innovative Gedanke zum Einsatz eines Schweißgels statt Pulver setzt genau hier an. Wenn es erstens gelingt fein granuliertes Pulver in ein geeignetes Bindersystem zu bringen, das dispens-

bar oder in einem Siebdruckverfahren mengenmäßig gut dosiert und geometrisch genau platziert werden kann, dann ist zweitens der nun 2-stufige Prozess technologisch zu lösen, in dem die dosierten und platzierten Punkte mittels Laser qualitätsgerecht zu verschweißen sind. Dabei ist zunächst der Einsatz einer schmelzbaren metallhaltigen Paste nicht besonders neu. Spätestens seit der Oberflächenmontage von elektronischen Bauelementen auf Leiterplatten werden diese in einer vorher aufgedruckten Lötpaste positioniert und anschließend beim Durchlauf durch einen Infrarotofen verlötet. Der große Unterschied besteht im Zeitverlauf des Energieeintrages für den Schmelzprozess. Das organische Bindersystem einschließlich der Fluss- und Reduktionsmittel zur Realisierung hochqualitativer Lötverbindungen hat bei dem langsamen Temperaturanstieg mehrere Sekunden Zeit zu verdampfen. Gleichzeitig bewirkt auch der niedrige Schmelzpunkt von Zinn (ca. 250 °C) keine Beeinflussung des Grundmaterials (typisch Kupfer; Schmelzpunkt ca. 1060 °C). Da beim Mikrolaserauftragsschweißen auf das häufig verwendete Grundmaterial Edelstahl (Schmelzpunkt ca. 1.300 °C) z. B. zur nachhaltigen Sicherung kleinster elektrischer Übergangswiderstände Goldpunkte (Schmelzpunkt ca. 1060 °C) aufzubringen sind, ergeben sich viel diffizilere Verhältnisse.

Bei den angestrebten minimalen Massen und der Energiedichte des Lasers, wird der Schmelzpunkt des Zusatzmaterials innerhalb von ms erreicht. Damit besteht die Gefahr, dass einerseits die plötzliche Volumenvergrößerung der flüchtigen Bestandteile die ursprüngliche Geometrie explosionsartig verändert und andererseits, dass es durch die geringe Temperaturdifferenz der Schmelzpunkte von Zusatz- und Grundmaterial zu einer nicht erwünschten Vermischung im Schmelzbad kommt.

Spätestens nach dieser Beschreibung erscheint auch eine Diskussion sinnvoll, ob überhaupt der Begriff „Mikrolaserauftragsschweißen“ korrekt ist oder nicht von einer besonderen Form des „Hartlöten“ zu sprechen ist. Da aber in den bisherigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen renommierter Einrichtungen (Literatur ILT Aachen) stets der Begriff „Mikrolaserauftragsschweißen“ benutzt wurde, soll diese Diskussion hier nicht weitergeführt werden.

3. Anwendungsbeispiel

Als konkreter Einsatzfall steht folgend das Mikrolaserauftragsschweißens von elektrischen Kontaktpunkten auf Schnappscheiben (Abb. 1) im Fokus. Schnappscheiben sind geprägte und gestanzte Edelstahlplättchen mit monostabilem Verhalten. Sie werden in elektrischen Tastern eingesetzt, wenn eine taktile Rückmeldung bei erfolgter Betätigung gefordert ist. Um über lange Zeit auch bei ungünstigen Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit, pH-Wert kleiner 7) niedrige elektrische Übergangswiderstände garantieren zu können, wird das Edelstahlband vor dem Präge- und Stanzprozess galva-

nisch vergoldet. Auch die Gegenkontakflächen auf dem üblicherweise genutzten Leiterplattenmaterial besitzen vergoldete Leiterbahnen, so dass sich keine lokalen Galvanikelemente bilden können.

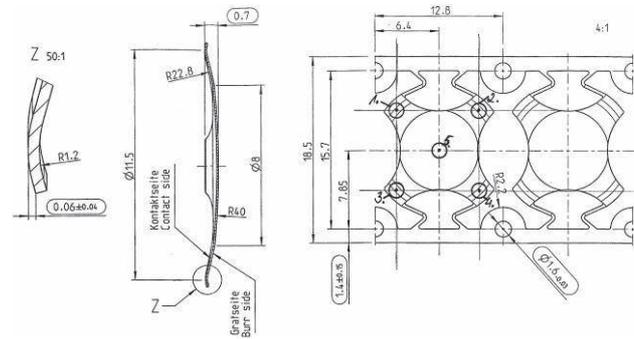


Abb. 1: Schnappscheibenband (rechts)

Die Nachteile der bisherigen, ausgereiften Technologie bestehen einerseits darin, dass selbst bei nur einseitiger Galvanisierung des primären Edelstahlbandes sich ca. 30 % des eingesetzten Goldes auf den Stanzabfällen befindet und aufwendig recycelt werden müssen, um nicht verloren zu gehen. Andererseits ist der Goldverbrauch selbst bei einer 3 µm dick einseitig vollflächig galvanisierten Schicht etwa 50-mal höher als beim Mikrolaserauftragsschweißen, wenn es gelingt die bei Schnappscheiben benötigten 5 Kontaktpunkte mit genügend kleinem Volumen zu realisieren. In absoluten Kosten heißt dies beim gegenwärtigen Goldpreis, dass der Goldeinsatz je Schnappscheibe von etwa 0,25 € auf 0,005 € zurückgeht. Diese Betrachtungen belegten die wirtschaftliche Bedeutung der technologischen Untersuchungen zum Einsatz eines geeigneten Schweißgels, wenn gleichzeitig bekannt ist, dass jährlich etwa 10 Mio. Schnappscheiben benötigt werden. Für eine problemlose Ablösung des galvanischen Vergoldens durch Mikrolaserauftragsschweißen des Kontaktpunktes ist eine direkte Ankopplung dieses neuen Prozesses nach dem Stanzvorgang wünschenswert. Da die Stanze mit 600 Hüben pro min. arbeitet stehen nur 0,1 s Taktzeit je Schnappscheibe zur Verfügung.

4. Dispens- und Laserschweißversuche

Für das praxis- und damit produktionstechnikgerechte Aufbringen des Schweißgels kam nach ersten rein manuellen Versuchen nur das Dispensieren in Frage. Ein paralleles Aufbringen der 5 Punkte je Schnappscheibe schied durch die 3-dimensional geprägte Form aus. Bei der Viskosität des Gels konnten mit einem pneumatischen Dispenskopf und der triggerbaren elektrischen Steuerung der Firma SPI sowie einer 100 µm Kanüle gute Ergebnisse erreicht werden. Dies bezieht sich sowohl auf die sehr kurze Zeit zum Dispensieren (< 10 ms) als auch auf die Gleichmäßigkeit der aufgetragenen Menge.

Im nächsten Schritt wurden die möglichen Einflussfaktoren für das Laserschweißen der dispensierten Punkte zur Aufstellung von praktikablen Versuchsplänen zunächst theoretisch analysiert und an-

schließlich auf der Basis von Erfahrungswissen auf die wesentlichen Aspekte reduziert. Neben den direkten Laserparametern wie Strahlleistung, Impulsregime, Fokusslage bzw. -größe und Wellenlänge wurden die Strahlführungsgeometrie relativ zur Punktlage und der Vortrocknungszustand des Gels als signifikante Einflussfaktoren identifiziert.

Obwohl die starke Abhängigkeit des Absorptionsverhaltens besonders der edlen Metalle bei kurzen Wellenlängen (200 nm ... 500 nm) bekannt war (Abb. 2) standen zunächst nur Laser mit 1064 nm zur Verfügung.

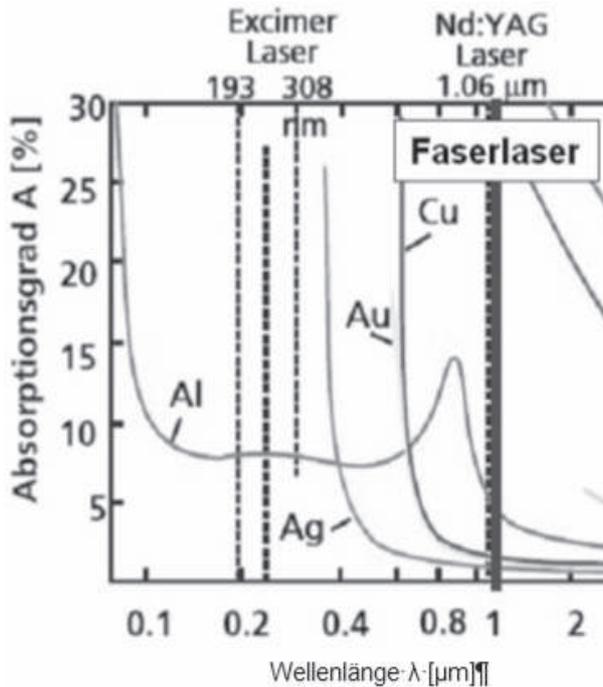


Abb. 2: Wellenlängenabhängiger Absorptionsgrad bei 300K (Quelle: Beyer, E.; Fraunhofer Institut Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden: Vorlesung Lasersystemtechnik, TU Dresden 2004)

Eine statische Positionierung des Lasers konzentrisch zum dispensten, nicht vorgetrockneten Punkt brachte kein brauchbares Ergebnis. Dies überraschte durch die hohe Menge organischer Bestandteile im Gel nicht. Tendenziell bessere Ergebnisse wurden durch Vertrocknung mittels Heißluftpistole vor dem Laserprozess erreicht. Allerdings konnte auch mit allen variierten Werten der Fokusslage sowie -größe und des Impulsregime die Qualität der Schweißpunkte bei statischer Ausrichtung des Lasers nicht befriedigen. Aus diesem Grund wurden Versuchsreihen mit einer Relativbewegung zwischen Laser und Punkt-geometrie durchgeführt. Den Anstoß gab dazu das gute Schweißergebnis beim Abfahren einer dispensten Linie (Abb. 3)

Um hochdynamisch den Laser zu bewegen, bietet sich ein Scannersystem an. Es wurden Versuche beginnend mit einer einfachen linearen Überfahrt bis zu einer im Punktzentrum endenden Spirale durchgeführt. Es zeigte sich, dass sich die bessere Einkopplung des 1064 nm Lasers im Edelstahl des

Grundmaterials positiv auf die Qualität des verschweißten Punktes auswirkt. Um einerseits die Kosten für die Vielzahl an Versuchen zu begrenzen, wurde, statt Gold Kupfer in Pulverform als Basis für das Schweißgel genutzt. Andererseits wurde zur Vermeidung von Oxidbildung Stickstoff als Schutzgas eingesetzt. In den folgenden Abbildungen sind Ergebnisse verschweißter Punkte zu sehen. Sie zeigen, dass der Einsatz von Schweißgel zum Erzeugen von kleinsten Funktionsflächen möglich ist und die eingangs aufgezeigten negativen Aspekte vermieden werden können. Besonders der Zeitbedarf von < 20 ms für eine Schweißung ist für die effiziente produktionstechnische Nutzung interessant.

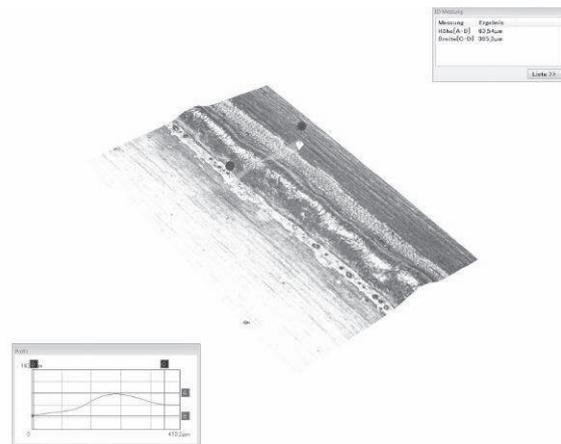


Abb. 3: Beispiel für eine verschweißte Linie

Es muss gegenwärtig aber auch konstatiert werden, dass die Qualität bei Nutzung eines Lasers mit 1064 nm Wellenlänge noch nicht ausreichend für den industriellen Einsatz ist und noch mehrere der identifizierten Einflussfaktoren optimiert werden müssen. Eine entscheidende Verbesserung der Ergebnisse wurde nach Beschaffung eines Lasers mit der Wellenlänge 532 nm erreicht. Abb. 4 zeigt eine vereinzelt Schnappscheibe mit einem mittig aufgeschweißten Punkt.



Abb. 4 Schnappscheibe mit Schweißpunkt

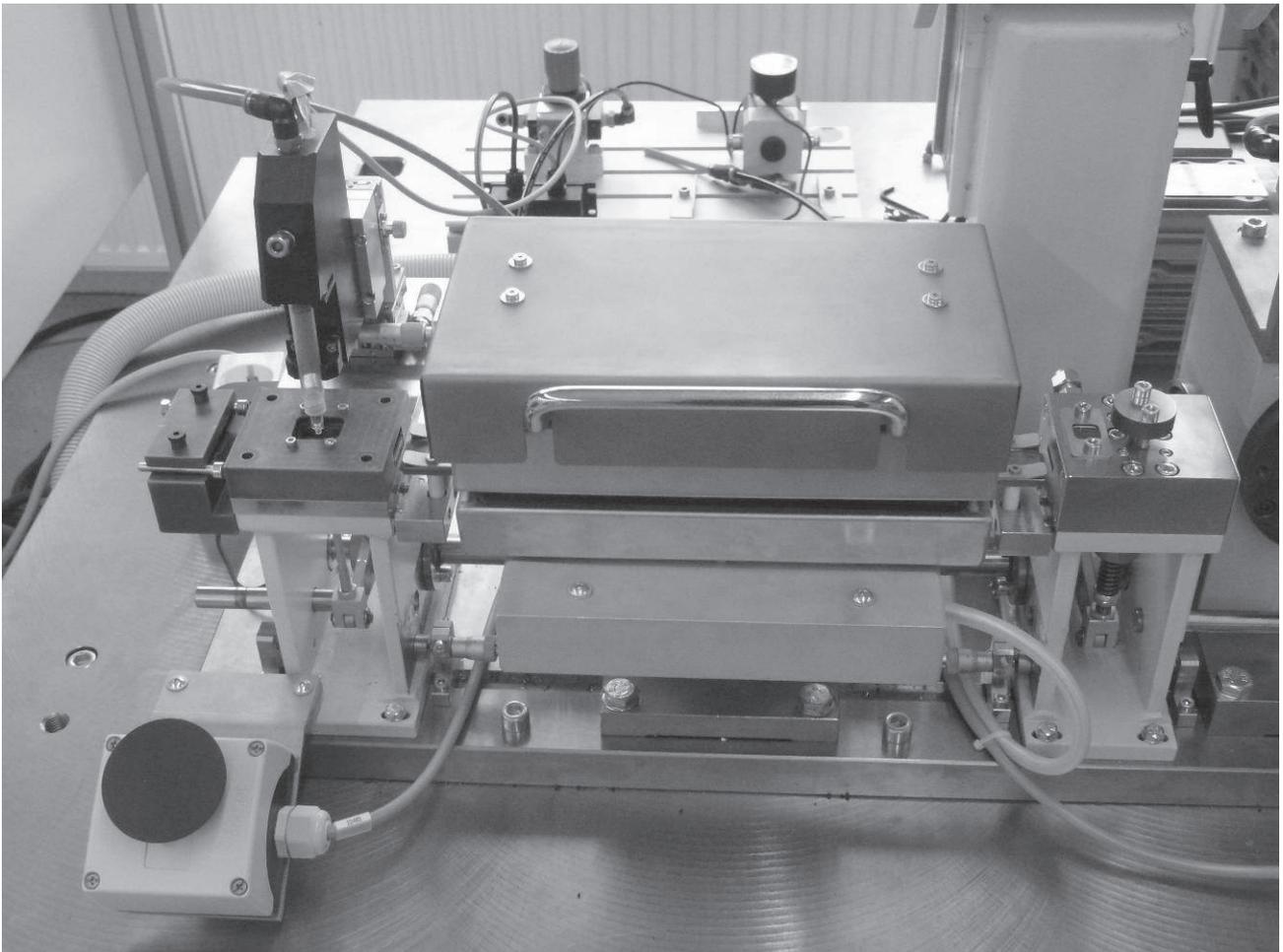


Abb. 5: Ansicht des Demonstrators
(von links nach rechts Dispensstation, Infrarottrockner, Schutzgaskammer; aber ohne Laser)

Die bisherigen Erkenntnisse aus den Versuchsreihen wurden genutzt, um zeitparallel einen Demonstrator für eine praxisnahe Testung der Prozesskette zu konstruieren und prototypisch zu realisieren. In diesem Versuchsaufbau (Abb. 5) ist die sequentielle Folge von Dispensen, Trocknen und Laserschweißen so implementiert, dass das Schnappscheibenband im Zeitraster von 0,1 s um ein Raster transportiert werden kann. Ganz links befindet sich die Dispensstation (mit Dispenser als montiertes Kaufteil). Anschließend ist über eine Strecke von 250 mm ein geführter Bandlauf. Auf dieser Strecke wird innerhalb der Laufzeit von ca. 2 s (Taktzeit 0,1 s für eine SS) der dispense Pastenpunkt vorgetrocknet, so dass der Großteil der organischen Lösungsmittel, die für die erforderliche Viskosität nötig sind, verdampfen konnte.

Am rechten Bildrand befindet sich eine gerätetechnische Einheit, die zwei technologische Operationen in sich vereinigt. Zunächst wird in der kleinen, linken Kammer die Laserschweißung unter Schutzgas vorgenommen. Zu diesem Zweck ist die Kammer nach oben mit einem Quarzglasfenster abgeschlossen. Durch diese Auslegung kann die Kammer vollständig mit Schutzgas unter leichtem Überdruck geflutet werden. Die Vorteile gegenüber der Zuführung des Schutzgases mittels Düsen ist, dass sowohl der Verbrauch geringer ist, als auch durch die vernachlässigbare Strömungsgeschwindigkeit keine störende Verwirbelung des Goldgranulates auftritt. Endgültige Ergebnisse und darauf basierende Entscheidungen potentieller Endnutzer stehen aber momentan noch aus.

ERHÖHUNG DER BAURATE BEIM MICRO CLADDING DURCH GEZIELTE MIKROSTRUKTURIERUNG

Martin Erler, Robby Ebert, Sascha Klötzer, Horst Exner

Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Abstract

Es wurden Untersuchungen zur gezielten Erzeugung und Nutzung von Mikrostrukturen beim Micro Cladding durchgeführt. Die notwendigen Prozessbedingungen dafür wurden gefunden. Die Baurate konnte um den Faktor 5 erhöht werden. Eine weitere Skalierung der Baurate auf das Doppelte durch Erhöhung der Scangeschwindigkeit konnte ebenfalls gezeigt werden. Die gezielte Mikrostrukturierung ist geeignet, um 2,5 D Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis in hoher Geschwindigkeit zu erzeugen.

1. Einleitung

Micro Cladding ist ein generatives Fertigungsverfahren, bei dem ein kontinuierlicher Pulverstrom mittels fokussiertem Laserstrahl aufgeschmolzen und dabei schichtweise miniaturisierte Bauteile oder Strukturen auf einer Oberfläche aufgebaut werden.

Die Vorgehensweise ist vergleichbar mit dem bekannten makroskopischen Laserpulverauftragsschweißen. Entsprechend der kleineren Spurgeometrien müssen die Prozessparameter Pulverkorn Durchmesser, Pulverfördermenge, Laserstrahlfokussdurchmesser und Laserstrahlleistung skaliert werden. Durch die Verwendung von kontinuierlicher Laserstrahlung und einer Festoptik, wobei der Laserstrahl relativ zur Substratoberfläche bewegt wird, bleiben die Streckenenergien jedoch hoch und die Intensitäten gering. Dies führt zu einer relativ hohen thermischen Belastung des Substrates und der aufgebauten Struktur und zu einer geringen Bearbeitungsgeschwindigkeit [1-3].

Aus diesem Grund wurde am Laserinstitut der Hochschule Mittweida eine andere Verfahrensvariante entwickelt und untersucht. Hierbei lag die Besonderheit in der Verwendung eines gepulsten Lasers und eines Scanners mit hohen Ablenkgeschwindigkeiten. Damit konnte die Energie auch im Mikrobereich definiert eingebracht werden. Erste Voruntersuchungen beschäftigten sich mit der Ermittlung geeigneter Prozessparameter für unterschiedliche 2 - 2,5 D Strukturen [4, 5]. Als Pulverdüse wurde eine Dreistrahlkoaxialdüse verwendet. Damit konnten Mikrobauerteile mit einem Durchmesser von bis zu 3 mm und einer Auflösung von 50 µm generiert werden. Im Rahmen einer Masterarbeit sollte anschließend ein theoretisches Modell zum Aufbauprozess erarbeitet und durch experimentelle Untersuchungen verifiziert werden [6]. Hierbei wurde insbesondere der Aufbauprozess von Mikrowänden näher betrachtet. Zum Einsatz kam eine selbst entwickelte Flachstrahldüse. Dabei zeigte sich, dass durch eine gezielte Mikrostrukturierung während des Prozesses die Baurate deutlich erhöht werden kann.

2. Versuchsaufbau

Als Strahlquelle für die Untersuchungen diente ein gepulster Yb:YAG Faserlaser mit einer maximalen mittleren Ausgangsleistung von 20 W. Die Pulsdauer betrug 200 ns, die Frequenz 1 – 500 kHz. Zur

schnellen Strahlablenkung wurde ein Galvo-Scanner mit einer maximalen Ablenkgeschwindigkeit von 8 m/s verwendet. Die Fokussierung erfolgte mit einer F-Theta Optik mit einer Brennweite von 63 mm. Der erzielte Fokussdurchmesser betrug 52 µm (86% Leistungseinschluss). Das Pulver mit einer zumeist sphärischen Partikelform und das Substratmaterial waren aus austenitischem CrNiMo-Stahl (1.4404). Der mittlere Partikeldurchmesser betrug 6,3 µm. Das Pulver-Gasgemisch (Volumenstrom Trägergas Argon: 8 l/min; Massenstrom Pulver: 15 g/min) wurde über eine selbst entwickelte Flachstrahldüse mit einem Austrittsquerschnitt von 45 x 0,5 mm² am Bearbeitungsort homogen verteilt. Der Abstand der Düsenaustrittsöffnung zur Substratoberfläche betrug 6 mm bei einem Düsenanstellwinkel von 65 Grad. Der kontinuierliche Pulverstrom wurde mit fokussiertem Laserstrahl auf der Substratoberfläche mittig überlagert. Die Positionierung des Substrates erfolgte mittels Roboterarm. In Abb. 1 ist die Versuchsanordnung schematisch dargestellt.

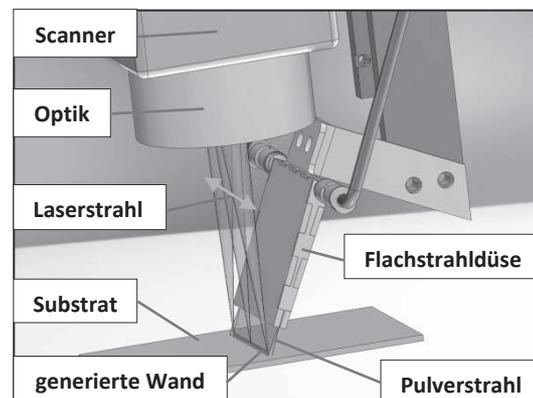


Abb. 1: schematische Darstellung der Versuchsanordnung

3. Ergebnisse

Die ersten Untersuchungen beschäftigten sich mit dem Einfluss der Fluenz auf die Baurate. Hierbei zeigte sich, dass es einen optimalen Fluenzbereich von 22 – 30 J/cm² gab (Abb. 2). Dieser lag bereits im Bereich der Verdampfung des Materials, dennoch kam es zum Aufbau von Strukturen. Zudem war festzustellen, dass die Wahl des geometrischen Pulsabstandes einen erheblichen Einfluss auf die Baurate hatte. Die größten Bauraten ergaben sich

bei geometrischen Pulsabständen zwischen 40 und 52 μm . Diese lagen im Bereich des verwendeten Fokussdurchmessers von 52 μm . Interessant war, dass es auch bei einem geometrischen Pulsabstand, bei dem kein Pulsüberlapp mehr vorlag, zu einem Aufbau mit relativ hoher Baurate kam (Abb. 3).

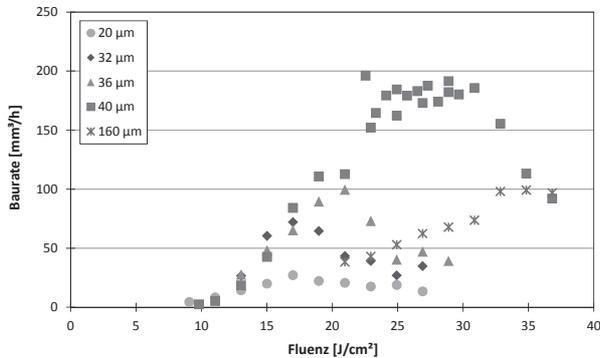


Abb. 2: Baurate in Abhängigkeit von der Fluenz bei unterschiedlichen geometrischen Pulsabständen ($f_{\text{Puls}} = 50 \text{ kHz}$)

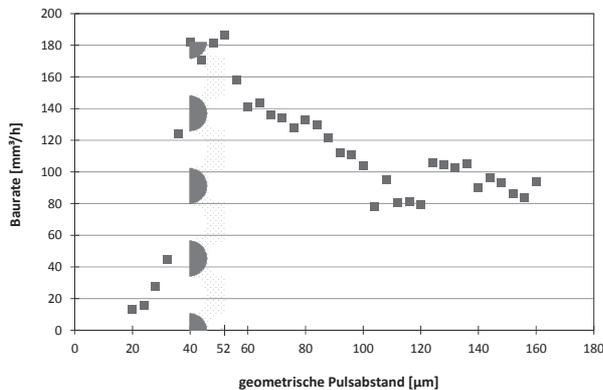


Abb. 3: Baurate in Abhängigkeit vom geometrischen Pulsabstand, eingezeichneter Streifen: idealer Arbeitsbereich ($H_0 = 27 \text{ J/cm}^2$, $f_{\text{Puls}} = 50 \text{ kHz}$)

Im Folgenden wurden die Ursachen der hohen Bauraten und der starke Einfluss des geometrischen Pulsabstandes darauf untersucht. Dazu wurde der Eintreffort der Laserpulse von Überfahrt zu Überfahrt variiert, so dass eine quasi unregelmäßige Bestrahlung der aufzubauenden Struktur vorlag. Dies wurde gezielt mit einem Phasenversatz zwischen Laserpulsfrequenz und Überfahrfrequenz eingestellt. Der Phasenversatz liefert den geometrischen Versatz des Eintreffortes von Überfahrt zur Überfahrt.

Bei den Versuchen wurde eine Pulsfrequenz von 10 kHz, also ein zeitlicher Pulsabstand von 100 μs , appliziert. Zur Erzeugung des Phasenversatzes wurde ein Scanner-Delay in Schritten von 10 μs erhöht. Dies entsprach geometrischen Versätzen um jeweils 4 μm . War der Phasenversatz ein ganzzahliges Vielfaches des zeitlichen Pulsabstandes, dann lagen die Eintrefforte der Laserpulse von Überfahrt zu Überfahrt wieder geometrisch genau übereinander. In Abb. 4 zeigt sich die größte Baurate bei geometrisch exakt übereinander liegenden Eintrefforten. Sie war um den Faktor 6,8 höher als bei Pulsen, die um die Hälfte, also 20 μm , versetzt waren. Offensichtlich

wurde durch den halben Versatz der sich bildende Schmelzrand abgetragen. Dies hatte negative Auswirkungen auf die Baurate. Schon eine Abweichung von 10 μs , also eine geometrische Verschiebung des Auftreffortes um 4 μm , bewirkte einen Abfall der Baurate auf die Hälfte.

Zum Erreichen der maximalen Baurate bei einem Phasenversatz von 10-90 μs musste die Fluenz angepasst werden.

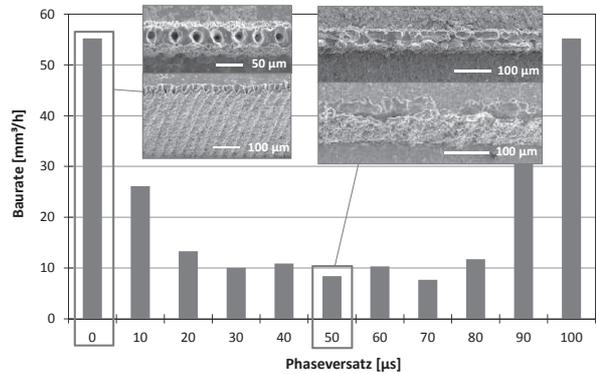


Abb. 4: Baurate bei verschiedenen Phasenversätzen und ausgewählte REM-Aufnahmen der Mikrowände in Draufsicht und schräger Ansicht

Phasenversatz 10 - 90 μs : $H_0 = 18,1 \text{ J/cm}^2$ (optimiert)

Phasenversatz 0 / 100 μs : $H_0 = 27 \text{ J/cm}^2$ (optimiert)

($t_{\text{Puls}} = 100 \mu\text{s}$, $s_{\text{geo}} = 40 \mu\text{m}$; $v = 400 \text{ mm/s}$)

Im Vergleich zu Abb. 3 ergaben sich in Abb. 4 geringere Bauraten aufgrund der geringeren Pulsfrequenz bzw. Scangeschwindigkeit.

Bei REM-Aufnahmen der Mikrowände war zu erkennen, dass sich bei geometrisch genau übereinander liegenden Auftrefforten der Laserpulse regelmäßige Kavitäten mit Schmelzrändern ausbildeten. Dies war ebenfalls bei den Untersuchungen des Einflusses zum geometrischen Pulsabstand und der Fluenz gegeben (Abb. 2 und 3). Der Einfluss des geometrischen Pulsabstandes wäre sonst nicht so stark ins Gewicht gefallen.

Mithilfe der folgenden Gleichungen wurde das Massenverhältnis von aufgebauter zu während des Laserpulses im Pulverstrom auftreffender Masse theoretisch berechnet:

Massenverhältnis

$$K_{\frac{\text{Masse}}{\text{Puls}}} = \frac{m_{\text{Auftrag Puls}}}{m_{\text{pulver Puls}}} \quad (1)$$

Aufgetragene Masse pro Laserpuls

$$m_{\frac{\text{Auftrag}}{\text{Puls}}} = \frac{m_{\text{überfahrt}}}{N_{\frac{\text{Puls}}{\text{Wand}}}} \quad (2)$$

Aufgetragene Masse pro Überfahrt

$$m_{\text{überfahrt}} = h_{\text{überfahrt}} \cdot b \cdot s \cdot \rho_{\text{Edelstahl}} \quad (3)$$

Anzahl der Pulse pro Überfahrt und Scanlänge

$$N_{\frac{\text{Puls}}{\text{Wand}}} = \frac{s}{s_{\text{geo}}} \quad (4)$$

Auftreffende Masse aus dem Pulverstrahl pro Laserpuls

$$m_{\text{Pulver}}^{\text{Puls}} = N_{\text{Partikel}}^{\text{Laser}} \cdot m_{\text{Partikel}} \quad (5)$$

Anzahl der Pulverpartikel im Wirkungsbereich des Laserstrahles pro Laserpuls

$$N_{\text{Partikel}}^{\text{Laser}} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \cdot \frac{1}{m_{\text{Partikel}}} \cdot V_{\text{Laser}} \quad (6)$$

Zusammenführung von (1) bis (6)

$$\frac{K_{\text{Masse}}^{\text{Puls}}}{\dot{m}} = \frac{\dot{V}}{\dot{m}} \cdot \frac{h_{\text{Überfahrt}} \cdot b \cdot s_{\text{geo}}}{V_{\text{Laser}}} \cdot \rho_{\text{Edelstahl}} \quad (7)$$

mit
$$V_{\text{Laser}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{86}^2 \cdot \Delta z \quad (8)$$

Zur Berechnung wurden bis auf die Dichte Messwerte aus den Untersuchungen eingesetzt:

- Volumenstrom $\dot{V} = 8 \text{ l/min}$
- Massenstrom $\dot{m} = 15 \text{ g/min}$
- Schichthöhe $h_{\text{Überfahrt}} = 0,7 \text{ }\mu\text{m}$
- Wandstärke $b = 50 \text{ }\mu\text{m}$
- geometrischer Pulsabstand $s_{\text{geo}} = 40 \text{ }\mu\text{m}$
- Dichte $\rho_{\text{Edelstahl}} = 7,9 \text{ g/cm}^3$
- Laserstrahldurchmesser $d_{86} = 52 \text{ }\mu\text{m}$
- Wirklänge $\Delta z = 700 \text{ }\mu\text{m}$

Für das Wechselwirkungsvolumen des Laserstrahles mit dem Pulverstrahl V_{Laser} wurde ein Zylinder angenommen, der aus dem Fokussdurchmesser d_{86} und der Wirklänge Δz durch den kompletten Pulverstrahl gebildet wird. Durch visuelle Untersuchung der Wechselwirkungszone konnte festgestellt werden, dass die Pulverpartikel während des Durchfluges durch den Laserstrahl in Richtung des Laserfokus abgelenkt wurden. Die Ablenkung erfolgte aufgrund einer oberflächennahen Verdampfung der Pulverpartikel, die einen Rückstoß zur Folge hatte. Dies wirkte sich positiv auf die im Prozess wirksame Pulvermasse aus und wurde daher bei der Wirklänge Δz berücksichtigt. Mit den verfügbaren realen Werten ergab sich ein Massenverhältnis von 4. Dies bedeutet, dass viereinmal mehr Material aufgebaut wurde als in der Zeit eines Laserpulses eigentlich zur Verfügung gestanden hat. Der scheinbare Widerspruch konnte durch eine REM-Untersuchung der Strukturen aufgeklärt werden. Ohne Reinigung der Struktur war zu erkennen, dass in den Kavitäten eine lose Pulveransammlung vorlag (Abb. 5a). Diese stand damit zusätzlich bei der nächsten Überfahrt für den Aufbauprozess zur Verfügung. Das Pulver hatte sich während der Pulspause von ca. 100 μs durch den kontinuierlich wirkenden Pulverstrahl in der Kavität angesammelt. Dass es sich um loses Pulver handelte, zeigte die REM-Aufnahme nach einer Ultraschall-Reinigung (Abb. 5b). Dort war kein Pulver mehr vorhanden. Gleichzeitig war zu erken-

nen, dass sich um die Kavität ein Schmelzrand bildete, der sich durch Vervielfachung des Prozesses zu einem Röhrchen aufbaute. Damit konnte der neuartige Mechanismus, der zu einer höheren Bau-rate führt, aufgeklärt werden. Durch Speicherung von Pulver in den Mikro-Kavitäten und die Ausbildung von Schmelzrändern konnte der Aufbauprozess stark beschleunigt werden. Die ermittelte Massendifferenz wurde dadurch plausibel.

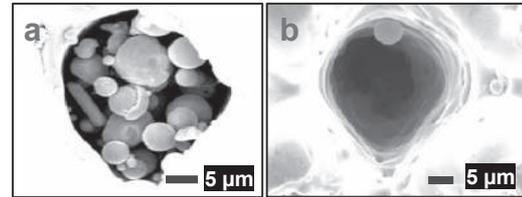


Abb. 5: REM-Aufnahmen von den sich bildenden regelmäßigen Kavitäten; (a) vor der Reinigung; (b) nach der Reinigung

Bei Abweichungen des geometrischen Pulsabstandes vom regelmäßigen Pulsmuster bildete sich hingegen ein unregelmäßiger Graben auf der Oberfläche der Mikrowand aus. In diesem Graben konnte kein Pulver für die nächste Überfahrt gespeichert werden, woraus die deutlich geringeren Bauraten aus Abb. 4 resultierten. Das ermittelte Massenverhältnis von 4 bildete tendenziell den Unterschied in der Baurate um den Faktor 6,8 gut ab.

Es zeigte sich weiterhin, dass zu Beginn des Aufbauprozesses ausschließlich ein Abtrag stattfand bis sich die regelmäßigen Kavitäten ausbildeten und sich genug loses Pulver ansammeln konnte. Im weiteren Verlauf des Aufbauprozesses fand fortlaufend zugleich ein Abtrag als auch ein Auftrag an Material statt, wobei der Auftrag an Material überwog. Die Kavitäten bildeten sich während des Aufbaus konstant mit einer Tiefe von ca. 100 μm aus.

Die regelmäßigen Kavitäten mit Schmelzrand ließen sich deshalb nur mit entsprechend hohen Fluenzen erzeugen. Wurde die Fluenz zu klein gewählt, verkleinerten sich die Kavitäten und damit auch die Menge der Pulveransammlung. War hingegen die Fluenz zu groß, wurde das Pulver überwiegend verdampft. Dies erklärt die Abhängigkeit der Baurate von der Fluenz und das ermittelte Optimum im Bereich von 22 – 30 J/cm^2 (Abb. 2).

Technisch bedingt konnte es zu einer weiteren kleinen Phasenverschiebung kommen. Pro Umlauf betrug die zeitliche Verschiebung 65 ns. Sie bewirkte einen kontinuierlichen geometrischen Versatz des Auftreffortes der Pulse von 162 nm. Dies ließ sich nicht durch eine Anpassung der Umlauffrequenz vermeiden. Da der geometrische Pulsversatz nur sehr gering war, blieb die Ausbildung der regelmäßigen Kavitäten mit Schmelzrand ohne Einschränkung erhalten. Er bewirkte aber aufgrund der hohen Anzahl an Überfahrten eine Kumulation der geometrischen Abweichungen und somit eine von der Senkrechten abweichende Aufbaurichtung (Abb. 6b).

Im Falle eines großen geometrischen Pulsabstandes von z.B. 160 μm , bei dem kein Pulsüberlapp mehr vorlag, führte dies zu einer Verbindung von am Anfang noch getrennt verlaufenden Kavitäten, wodurch überraschenderweise auch ein Wandaufbau zu beobachten war (Abb. 3). Eine geschlossene Wandstruktur bildete sich nach 1.000 Überfahrten, also einem seitlichen Versatz um 162 μm , ab 4.000 Überfahrten sah die Struktur relativ eben aus.

Da die Kavitäten auf der generierten Mikrowand für die Herstellung von anwendungsrelevanten Bauteilen hinderlich wären, wurden weitere Untersuchungen zur Glättung der Wandoberfläche unternommen. Mit geänderten Parametern (niedrigere Fluenz, höhere mittlere Leistung) gelang es, die Vertiefungen durch Aufschmelzen zu beseitigen und eine Glättung der Oberfläche zu erzielen (Abb. 6 rechts).

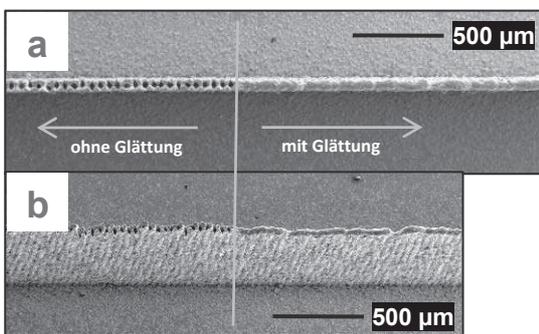


Abb. 6: REM-Aufnahmen einer generierten Wand mit und ohne Glättung der Wandoberfläche, links: 1000 Überfahrten (Parameter für Aufbau); rechts: 1 Überfahrt (Parameter für Glättung); (a) Draufsicht; (b) schräge Ansicht 30°

Neben der Erhöhung der Baurate durch gezielte Mikrostrukturierung zeigte sich in früheren Untersuchungen zudem eine gute Skalierbarkeit der neuen Verfahrensvariante. Es deutete sich beim Vergleich der unterschiedlichen verwendeten Fokusdurchmesser und den damit verbundenen Wandstärken an, dass die Auflösung des Verfahrens nur durch den Fokusdurchmesser bestimmt wird. Weiterhin ließ sich die Baurate durch Erhöhung der Scangeschwindigkeit und unter Berücksichtigung der notwendigen Prozessbedingungen wie einem gleichbleibendem geometrischen Pulsabstand von Überfahrt zu Überfahrt und optimierter Fluenz theoretisch beliebig erhöhen. Hierzu wurden erste erfolgreiche Untersuchungen durchgeführt und die Baurate durch Verdopplung von Pulsfrequenz und Scangeschwindigkeit problemlos verdoppelt. Der verkürzte zeitliche Pulsabstand hatte keinen Einfluss auf den Bauprozess. Ein Vorteil neben der guten Skalierbarkeit war zudem, dass die vertikale Fokusslage bis zu einer Bauteilhöhe von 1,5 mm nicht nachgeführt werden musste. Die Wandstärke und die Baurate blie-

ben während des Aufbaus konstant. Zudem war durch die geringe eingebrachte Streckenenergie die thermische Belastung minimal und die Generierung von Mikrowänden auf Blechen mit Dicken ab 100 μm problemlos realisierbar.

4. Zusammenfassung

Durch den Einsatz einer prozessangepassten optimierten Fluenz und der regelmäßigen Pulsverteilung konnte die Mikrostrukturierung der generierten Bauteiloberfläche dazu genutzt werden, um die Pulverausnutzung zu erhöhen und die Baurate damit deutlich zu steigern. Der ablaufende Prozess konnte aufgeklärt werden.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden dankenswerterweise durch vom BMBF (Innovationsoffensive neue Länder - Unternehmen Region) geförderte Innoprofile Projekte (03IP506, 03IPT506A) und den Laserinstitut Mittelsachsen e.V. unterstützt.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Jambor, K. Wissenbach: Micro-Laser-Cladding with High Quality Fibre Lasers. In: Lasers in Manufacturing 2007 (LIM), 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, München, DE, Jun 18-22, 2007, S. 193–197.
- [2] Weidlich, Nils; Dudziak, Sonja; Nölke, Christian; Herzog, Dirk; Hustedt, Michael; Haferkamp, Heinz (2009): Metallische Funktionsbauteile im Mikromaßstab durch einstufiges Laserstrahlmikroauftragschweißen. In: Schweißen und Schneiden, H. 9, S. 545–547.
- [3] Meier, O.; Mewes, H.; Czerner, S.; Dudziak, S.: Direct laser micro cladding with nanophased powders. In: 5th Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE 2007), Proceedings, Vol. 2, Erlangen, DE, Sep 25-28, 2007, S. 887–897.
- [4] Erler, Martin: Weiterführende Untersuchungen zum Mikropulverauftragschweißen mittels gepulster Faserlaserstrahlung; Diplomarbeit 2009; Hochschule Mittweida; Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik
- [5] Knebel, Tommy: Untersuchungen zum Generieren von 3D-Körpern mittels Mikropulverauftragschweißen (Micro-Cladding); Bachelorarbeit 2009; Hochschule Mittweida; Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik
- [6] Erler, Martin: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Verfahren Micro Cladding; Masterarbeit 2011; Hochschule Mittweida; Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik

MIKROSTRUKTURIERUNG VON STAHL MIT PIKO- UND FEMTOSEKUNDENLASERPULSEN

Peter Lickschat, Jörg Schille, Steffen Weißmantel
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Es werden Ergebnisse der Mikrostrukturierung von Stahl mittels ultrakurzer Laserpulse vorgestellt. Bei den Untersuchungen kamen hochrepetierende Laser zum Einsatz, die Pulsdauern von 180 fs und 15 ps aufwiesen. Die verwendeten Pulsenergien lagen im Bereich von 2,7 μJ bis 7,1 μJ . Es wurden flächige Abträge bis zu einer Abtragtiefe von 100 μm realisiert. Es zeigte sich dabei, dass das Abtragsvolumen pro Puls bei gleichen Pulsenergien beim Einsatz von Femtosekundenlaserpulsen höher ist als bei der Verwendung von Pikosekundenlaserpulsen. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die mittels Femtosekundenlaserpulsen generierten Strukturböden eine geringere mittlere Rauigkeit haben als die mittels Pikosekundenlaserpulsen erzeugten Böden. Die Strukturböden weisen dabei die typischen Mikrostrukturen (z.B. Ripple) auf, die bei der Strukturierung mit ultrakurzer Laserstrahlung entstehen. Bei den Untersuchungen wurden verschiedene Parameter variiert und auf ihren Einfluss auf das Abtragsvolumen pro Puls V_{Puls} und die mittlere Rauigkeit R_A des Strukturbodens hin untersucht.

1. Einleitung

Der Einsatz von Ultrakurzpulslasern in der industriellen Bearbeitung rückt aufgrund der Entwicklung von leistungsstarken Lasersystemen immer mehr in den Vordergrund. Besonders hochrepetierende Lasersysteme, die Pulsfolgenfrequenzen bis in den MHz-Bereich bereitstellen können, sind dabei von Interesse. Aufgrund der hohen Pulsfolgenfrequenzen ist es möglich, hohe mittlere Leistungen selbst bei geringen Pulsenergien umzusetzen. Dadurch können die Vorteile der ultrakurzen Laserpulse, wie beispielsweise die kaum vorhandene Beeinflussung angrenzender Gebiete, ausgenutzt werden und eine hohe Produktivität des Verfahrens erzielt werden.

Inwieweit sich die Pulsdauer auf das Bearbeitungsergebnis auswirkt, ist hierbei noch intensiver zu untersuchen. Dies wurde bereits in verschiedenen Untersuchungen [1 - 4] durchgeführt, jedoch kamen dabei ausschließlich niedrigrepetierende Lasersysteme zum Einsatz. Ebenfalls wurden bei diesen Untersuchungen bisher noch keine flächigen Abtragsuntersuchungen durchgeführt, welche jedoch für industrielle Anwendungen von höchstem Interesse sind. In der hier vorliegenden Arbeit werden Ergebnisse von Untersuchungen zur flächigen Bearbeitung von Stahl mittels hochrepetierender Ultrakurzpulslasersysteme präsentiert.

2. Anlagentechnik

Die Untersuchungen wurden an zwei Lasergeräten durchgeführt. Es kam ein Pikosekundenlaser vom Typ Hyper Rapid 50 der Fa. Lumera Laser GmbH und ein Femtosekundenlaser vom Typ Impulse der Fa. Clark-MXR Inc. zum Einsatz. Die Laserparameter der beiden Lasergeräte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurde bei beiden Lasergeräten derselbe Strahldurchmesser von 30 μm verwendet.

Tabelle 1: Parameter der Lasergeräte.

	ps-Laser	fs-Laser
Pulsdauer τ	< 15 ps	180 fs (sech ²)
Wellenlänge λ	1064 nm	1030 nm
Strahldivergenz	< 1 mrad	< 1 mrad
Pulsfolgenfrequenz f_P	bis 1 MHz	bis 25 MHz
mittlere Leistung P_{AV}	bis 50 W	bis 15 W
Pulsenergie Q	bis 125 μJ	bis 10 μJ

Das Bearbeitungsprinzip war bei beiden Laseranlagen identisch (siehe Abbildung 1).

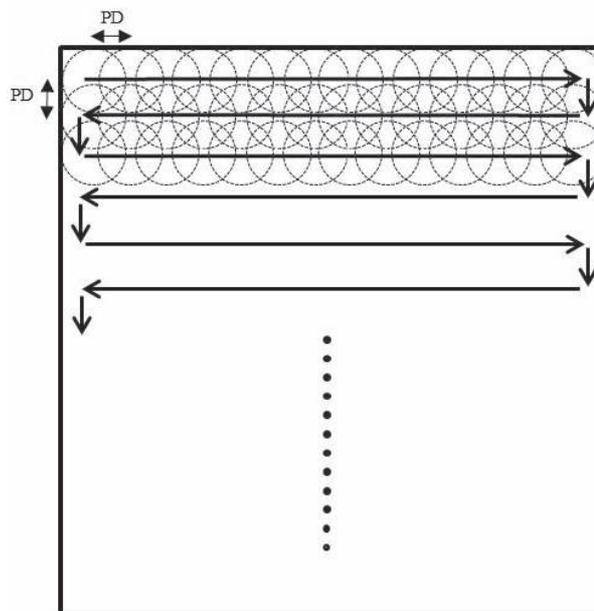


Abbildung 1: Bearbeitungsprinzip des Flächenabtrages.

Der Laserstrahl wurde mittels einer Scannereinheit über die Probe geführt. Dabei wurden die Pulse in der jeweiligen Bearbeitungsspur mit einem konstanten Pulsabstand (PD) hintereinander gesetzt. Die flächige Strukturierung schließlich wurde durch das Nebeneinanderlegen mehrerer Bearbeitungsspuren realisiert. Der Abstand zwischen den einzelnen Spuren ist derselbe wie der

Abstand der einzelnen Pulse in der Bearbeitungspur. Es wurden bei den Untersuchungen mehrere Überfahrten (\ddot{U}) realisiert, um tiefere Abträge zu erzielen. Dabei wurde die Bearbeitungsrichtung je Überfahrt um 90° zur vorherigen Überfahrt gedreht.

3. Ergebnisse und Diskussion

Variation der Fluenz H

Um den Einfluss der Fluenz auf die Bearbeitung zu untersuchen, wurde diese in einem Bereich von $0,75 \text{ J/cm}^2$ bis 2 J/cm^2 variiert. Es wurden Strukturen unter Verwendung eines Pulsabstandes von $6 \mu\text{m}$ und einer Pulsfrequenz von 150 kHz erzeugt. Die Anzahl der Überfahrten betrug hierbei 50 . Anhand der ermittelten Strukturtiefe konnte das Abtragsvolumen pro Puls mithilfe folgender Formel bestimmt werden.

$$V_{\text{Puls}} = \frac{d_{\text{Gesamt}}}{\ddot{U}} * PD^2 \quad (d_{\text{Gesamt}} - \text{Abtragstiefe})$$

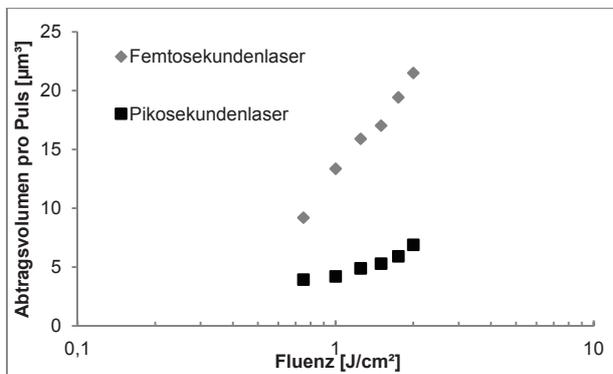


Abbildung 2: Abtragsvolumen pro Puls bei Variation der Fluenz ($PD = 6 \mu\text{m}$; $f_P = 150 \text{ kHz}$; $\ddot{U} = 50$).

Bei der Betrachtung der grafischen Darstellung des Abtragsvolumens pro Puls (Abbildung 2) wird ersichtlich, dass dieses bei der Verwendung von Femtosekundenlaserpulsen höher ist als bei der Verwendung von Pikosekundenlaserpulsen. Der Grund hierfür sind die unterschiedlichen Pulsdauern. Bei der Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen spielt die Elektron-Phonon-Relaxationszeit τ_R eine entscheidende Rolle. Diese Zeit gibt an, wann die Elektronen ihre Energie an das Phononensystem abgeben. Die Relaxationszeit ist durch den großen Massenunterschied zwischen Elektronen und Gitterbausteinen gegeben, der eine Verzögerung der Energieübertragung zwischen den Subsystemen bedingt. Für Metalle liegt die Relaxationszeit zwischen Elektronen- und Phononensubsystem im Pikosekundenbereich [5]. Erste Abschätzungen ergeben für Eisen, als Näherung von Stahl, ein τ_R von ca. 2 ps . Bei Laserpulsen, die kürzer sind als die Elektron-Phonon-Relaxationszeit τ_R , wird während des Laserpulses keine Energie an das Gittersystem abgegeben. Der dominierende Ausbreitungsmechanismus der Energie im Material ist die Diffusion von heißen (energiereichen)

Elektronen. Das Abtragsvolumen ist im Zeitbereich unterhalb der Elektron-Phonon-Relaxationszeit τ_R , aufgrund der nicht stattfindenden Wechselwirkung zwischen Elektronen und Phononen nahezu unabhängig von der Pulsdauer. Tatsächlich steigt das Abtragsvolumen mit kürzer werdenden Pulsdauern geringfügig an. Dies kann mit der schneller Energieabgabe erklärt werden und der damit verbundenen höheren Elektronentemperatur. Wenn Laserpulse verwendet werden, deren Pulsdauer länger ist als die Elektron-Phonon-Relaxationszeit τ_R , wird Energie während des Laserpulses an das Gitter abgegeben. Dies reduziert die erreichbare Elektronentemperatur zusätzlich. Mit den Pikosekundenlaserpulsen wird dadurch die für den Abtragsprozess notwendige Temperatur in einem kleineren Volumen erreicht als mit den Femtosekundenlaserpulsen. Das bedeutet, dass mit kürzeren Laserpulsen die Laserpulsenergie effizienter für den Ablationsprozess genutzt wird. Diese höhere Effizienz lässt sich im größeren Anstieg der Kurve der Messwerte der Femtosekundenbearbeitung im Gegensatz zur Kurve der Pikosekundenbearbeitung erkennen.

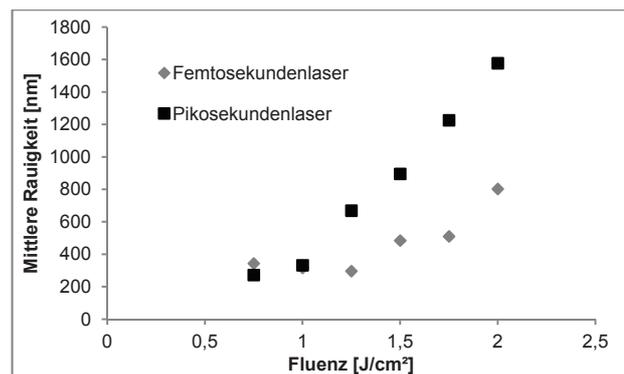


Abbildung 3: Mittlere Rauigkeiten in Abhängigkeit von der Fluenz ($PD = 6 \mu\text{m}$; $f_P = 150 \text{ kHz}$; $\ddot{U} = 50$).

Bei der Auswertung der mittleren Rauigkeiten der Strukturböden (Abbildung 3) stellt man fest, dass sich diese bei geringen Fluenzen (bis 1 J/cm^2) bei beiden Pulsdauern kaum voneinander unterscheiden. Es werden minimale Werte von ca. 300 nm erreicht. Bei höheren Fluenzen ($> 1 \text{ J/cm}^2$) sind die mittleren Rauigkeiten der Strukturen, die mit den Pikosekundenlaserpulsen erzeugt wurden, jedoch größer als die mittleren Rauigkeiten der Strukturen, die mittels Femtosekundenlaserpulsen entstanden. Bemerkenswert ist, dass die Strukturen der Femtosekundenlaserpulse hierbei nicht nur eine geringere mittlere Rauigkeit aufweisen, sondern auch aufgrund des höheren Abtragsvolumens pro Puls tiefer sind.

Anhand der REM-Bilder (Abbildung 4 und Abbildung 5) erkennt man, dass sich sowohl bei der Strukturierung mit den Femtosekundenlaserpulsen als auch bei der Strukturierung mit den Pikosekundenlaserpulsen die bereits aus Quelle [6] bekannten Strukturen ausbilden. Es sind sowohl

Flächen mit Ripple-Strukturen erkennbar als auch Gebiete in denen sich Überstrukturen (conical like structures) beginnen auszubilden.

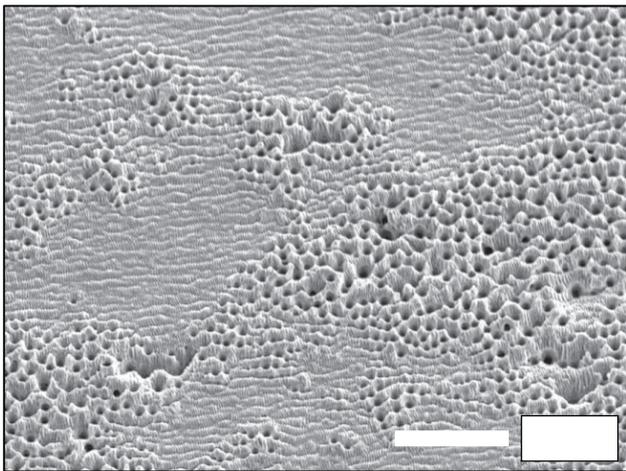


Abbildung 4: Mikrostrukturen bei der Bearbeitung mit Femtosekundenlaserpulsen ($d_{\text{Gesamt}} = 29,9 \mu\text{m}$; $H = 2 \text{ J/cm}^2$; $PD = 6 \mu\text{m}$; $f_p = 150 \text{ kHz}$; $\dot{U} = 50$).

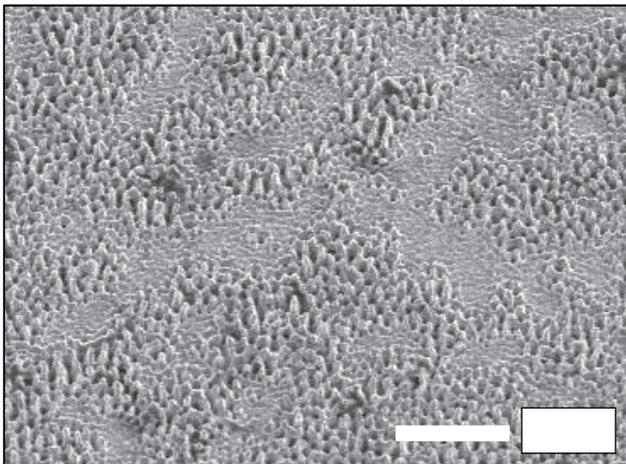


Abbildung 5: Mikrostrukturen bei der Bearbeitung mit Pikosekundenlaserpulsen ($d_{\text{Gesamt}} = 9,6 \mu\text{m}$; $H = 2 \text{ J/cm}^2$; $PD = 6 \mu\text{m}$; $f_p = 150 \text{ kHz}$; $\dot{U} = 50$).

Variation der Überfahrten

Es wurden Untersuchungen durchgeführt bei denen die Anzahl der Überfahrten variiert wurde. Die Überfahrten wurden hierbei von 10 bis auf 200 (Femtosekundenlaserpulse) bzw. bis auf 500 (Pikosekundenlaserpulse) erhöht. Der Pulsabstand wurde auf $6 \mu\text{m}$ festgelegt und die Pulsfolgefrequenz betrug 150 kHz . Als Fluenz wurde ein Wert von $1,5 \text{ J/cm}^2$ gewählt. Wie man anhand der grafischen Auswertungen (Abbildung 6 und Abbildung 7) erkennen kann, ist der Einfluss der Überfahrten auf das Abtragsvolumen pro Puls bei beiden Pulsdauern unterschiedlich. Bei den Untersuchungen mit Pikosekundenlaserpulsen (Abbildung 6) wurde festgestellt, dass der Abtrag pro Puls mit steigender Anzahl an Überfahrten zunimmt. Erst ab ca. 100 Überfahrten stellt sich ein annähernd konstanter Abtrag pro Puls ein. Eine eindeutige Erklärung für diesen Effekt konnte noch nicht gefunden werden.

Es existieren zwei Erklärungsmöglichkeiten für das sich erhöhende Abtragsvolumen pro Puls. Eine Möglichkeit ist, dass durch die steigende Anzahl an Überfahrten im Werkstück eine Situation entsteht durch die die einfallende Laserpulsenergie effizienter für den Abtrag genutzt werden kann. Die andere Möglichkeit ist, dass die Energie der Laserpulse der ersten Überfahrten, die für einen Abtrag nicht ausreichend war, bei nachfolgenden Überfahrten zum Abtragsprozess mit beiträgt. Zur Klärung des Effektes sind weitere Untersuchungen notwendig.

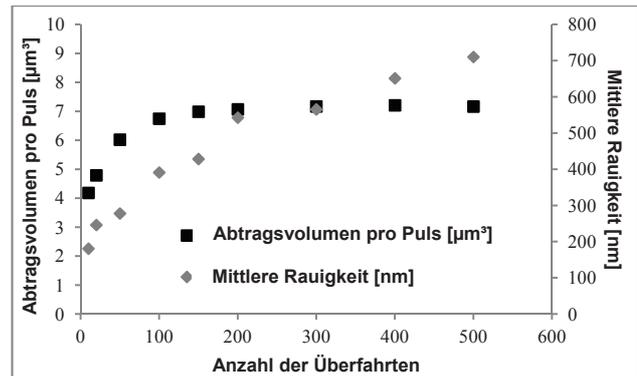


Abbildung 6: Abtragsvolumen pro Puls und mittlere Rauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Überfahrten bei der Verwendung von Pikosekundenlaserpulsen ($H = 1,5 \text{ J/cm}^2$; $PD = 6 \mu\text{m}$; $f_p = 150 \text{ kHz}$).

Bei den Femtosekundenlaserpulsen (Abbildung 7) ist der Abtrag nahezu konstant. Es treten geringfügige Schwankungen auf, diese können aber keinem physikalischen Effekt zugeschrieben werden. Eine Steigerung des Abtragsvolumens pro Puls mit zunehmender Anzahl von Überfahrten, wie sie bei der Pikosekundenbearbeitung auftritt, konnte nicht beobachtet werden.

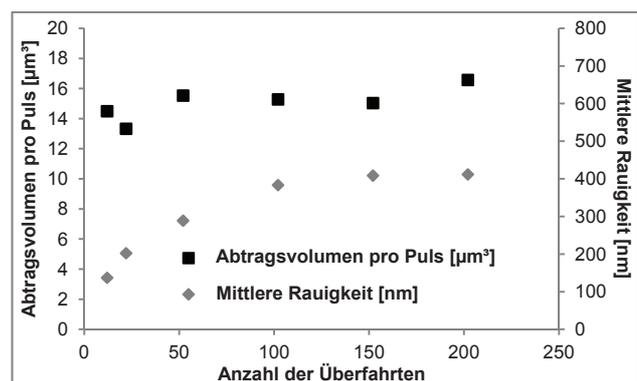


Abbildung 7: Abtragsvolumen pro Puls und mittlere Rauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Überfahrten bei der Verwendung von Femtosekundenlaserpulsen ($H = 1,5 \text{ J/cm}^2$; $PD = 6 \mu\text{m}$; $f_p = 150 \text{ kHz}$).

Beim Vergleich der Rauigkeitswerte stellt man fest, dass die mittlere Rauigkeit mit zunehmender Anzahl von Überfahrten bei beiden Pulsdauern steigt. Dies lässt sich gut anhand der REM-Bilder der Strukturen (Abbildung 8) veranschaulichen.

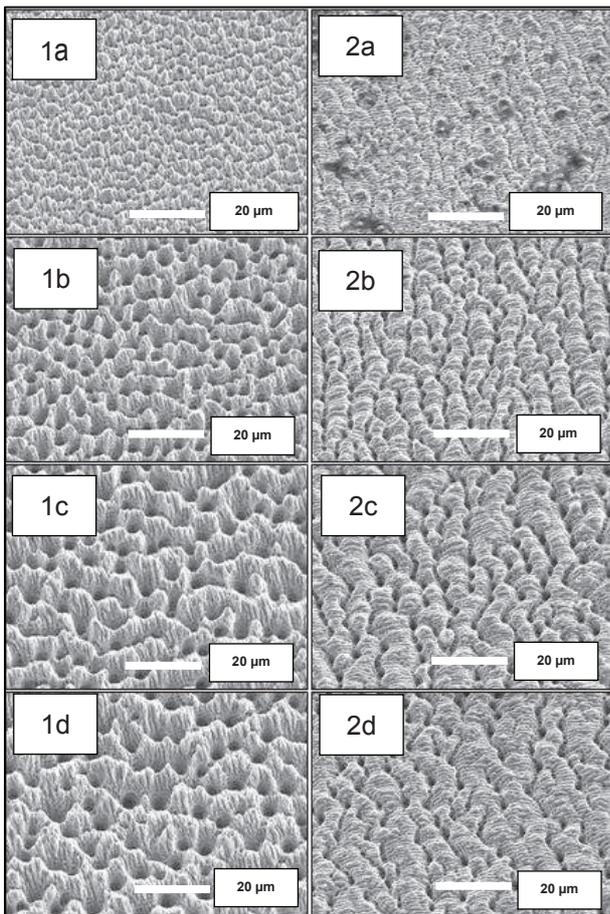


Abbildung 8: REM-Bilder der Strukturen, die mit unterschiedlichen Pulsdauern und Überfahrten strukturiert wurden ($PD = 6 \mu\text{m}$; $H = 1,5 \text{ J/cm}^2$; $f_p = 150 \text{ kHz}$). (1) Pikosekundenlaserpuls; (2) Femtosekundenlaserpuls (a) 10 Ü, (b) 50 Ü, (c) 100 Ü, (d) 200 Ü.

Es entstehen zunächst die bekannten Ripple-Strukturen. Diese weisen eine geringe Rauigkeit auf. Mit zunehmender Anzahl an Überfahrten bilden sich aus diesen Ripple-Strukturen die sogenannten "conical like structures" aus, die aufgrund ihrer Form zu einer höheren mittleren Rauigkeit des Strukturbodens führen.

Die Abtragstiefe betrug beim Einsatz von Femtosekundenlaserpulsen bei 200 Überfahrten $93 \mu\text{m}$. Die dabei erzeugte mittlere Rauigkeit betrug 410 nm . Bei den Pikosekundenlaserpulsen wurde bei 500 Überfahrten eine Tiefe von $100 \mu\text{m}$ erreicht, bei einer mittleren Rauigkeit von 710 nm .

4. Zusammenfassung/Ausblick

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen konnten unterschiedliche Phänomene bei der Bearbeitung von Stahl mit Piko- und Femtosekundenlaserpulsen beobachtet werden. Es wurde festgestellt, dass der Abtrag mit Femtosekundenlaserpulsen effektiver ist als der Abtrag mit Pikosekundenlaserpulsen. Dies

lässt sich mithilfe der schnelleren Abgabe der Energie auf das Elektronensystem, verbunden mit einer höheren Elektronentemperatur, bei der Verwendung der Femtosekundenlaserpulse erklären. Die einsetzende Kopplung zwischen Elektronen- und Phononensystem während des Pikosekundenlaserpulses reduziert den Abtrag bei der Bearbeitung mit Laserpulsen, die länger sind als die Elektron-Phonon-Relaxationszeit, zusätzlich.

Beim Einsatz von Pikosekundenlaserpulsen konnte eine Steigerung des Abtrages pro Puls mit zunehmender Anzahl von Überfahrten festgestellt werden. Hierfür konnte noch keine abschließende Erklärung gefunden werden. Der Abtrag pro Puls mit Femtosekundenlaserpulsen blieb im Gegensatz dazu bei der Variation der Überfahrten konstant.

Bei der Auswertung der mittleren Rauigkeiten wurde festgestellt, dass die Strukturen, die mittels Femtosekundenlaserpulsen erzeugt wurden eine höhere Qualität (geringere mittlere Rauigkeit) aufweisen, bei vergleichbaren Abtragstiefen, als die Strukturen, die mittels Pikosekundenlaserpulsen erzeugt wurden.

Danksagung

Wir möchten uns bei der Fa. 3D-Micromac bedanken, die uns die Versuche an der Pikosekundenlaseranlage ermöglichte.

Literaturverzeichnis

- [1] Harzic, R. L., Breitling, D., Weikert, M. et al. (2005) Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100 fs to 5 ps, Applied Surface Science 249 322-331
- [2] Tuennermann, A., Nolte, S., Limpert, J. (2010) Femtosecond vs. Picosecond Laser Material Processing, Laser Technik Journal Volume 7, Issue 1, 34-38
- [3] Nedialkov, N.N., Imamova, S. E., Atanasov, P. A. (2004) Ablation of metals by ultrashort laser pulses, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 638-643
- [4] Salle, B., Gobert, O., Meynadier, P. et al. (1999) Femtosecond and picosecond laser microablation: ablation efficiency and laser microplasma expansion, Applied Physics A 69 [Suppl.] 381-383
- [5] Wellershoff, S. S. (2000) Untersuchungen zur Energierelaxationsdynamik in Metallen nach Anregung mit ultrakurzen Laserpulsen, Dissertation, Freie Universität Berlin, Germany
- [6] Schille, J., Ebert, R., Loeschner, U. et al. (2008) Micro structuring with highly repetitive ultra short laser pulses, Proc. 9th Int'l Symp. Laser Prec. Microfab. (LMP2008), 08-57

SIMULATION DER TEMPERATURFELDER IN FESTKÖRPERN INFOLGE DER BESTRAHLUNG MIT ULTRAKURZEN LASERPULSEN IM PIKO- UND FEMTOSEKUNDENBEREICH

Andreas Fischer, Peter Lickschat
Hochschule Mittweida

Es wurde ein Programmsystem auf der Grundlage von COMSOL® entwickelt, das es dem Anwender ermöglicht, dreidimensionale Temperaturfelder bei Femtosekundenlaserbestrahlung in Metallen zu berechnen. Dazu ist es notwendig, die Berechnungen in zwei getrennten Systemen, dem System der freien Elektronen und dem des Gitter zu unterteilen. Zwischen beiden Systemen existiert eine Kopplung, die es ermöglicht, die Energie der Laserpulse über die primäre Wechselwirkung Photon-Elektron auf die sekundäre Wechselwirkung Elektron-Phonon und damit auf das Gitter zu übertragen.

Die Berechnungsergebnisse werden mit experimentellen Daten verglichen.

1. Einleitung

Femtosekundenlaserbearbeitungen werden mit der immer besseren Verfügbarkeit dieser Anlagen für Anwender gute Einsatzmöglichkeiten bei der präzisen Mikromaterialbearbeitung zum Einsatz kommen. Das ist ein Grund dafür, sich näher mit dem Abtragsprozess beim Einsatz der Ultrakurzzeitlaser zu beschäftigen und Simulationen der ablaufenden physikalischen Prozesse durchzuführen.

Das entwickelte Programm zur Berechnung von dreidimensionalen Temperaturfeldern bei Laserpulsbestrahlungen bis in den Femtosekundenbereich erfordert eine Aufteilung bei der Laserstrahlaborption in einem Metall in den primären Wechselwirkungsprozess Photon-Elektron und den sekundären Wechselwirkungsprozess Elektron-Phonon mit einer Relaxationszeit von etwa $\tau \cong 1ps$ [1]. Damit wird die Laserenergie bei Femtosekundenpulsen zuerst im Elektronensystem deponiert bevor sie zeitverzögert in das Gittersystem überführt werden kann. Dadurch entstehen sogenannte heiße Elektronen mit hohen Energien und hohen thermischen Geschwindigkeiten, die wesentlich schneller in das Material hinein diffundieren. Das Elektronensystem kann über die Modellvorstellung der freien Elektronen behandelt werden.

COMSOL® Multiphysics mit dem Heat Transfer Tool bietet ausgezeichnete Voraussetzungen für die Entwicklung eines Programms für die Simulation der Femtosekundenlaserbearbeitung unter den oben genannten Voraussetzungen. Es ist möglich für die Berechnung zwei Heat Transfer Tools zu aktivieren, die geeignet miteinander entsprechend dem physikalischen Modell gekoppelt werden.

2. Physikalisches Modell

Das freie Elektronensystem wird entsprechend der Modellvorstellungen der Statistischen Physik betrachtet [2]. Aus diesem Modell lassen sich die thermischen Eigenschaften des freien Elektronengases für Eisen berechnen.

Die Elektronendichte in zweiwertigem Eisen beträgt nach der klassischen freien Elektronengastheorie

$$n_e = 2 \cdot \frac{\rho}{M} \cdot N_A = 1,7 \cdot 10^{29} m^{-3} \quad (1)$$

(ρ – Dichte, M – molare Masse, N_A – Avogadro'sche Zahl, m_e – Elektronenmasse).

Daraus ergibt sich die Dichte der freien Elektronen zu

$$\rho_e = n_e \cdot m_e = 0,1547 kg / m^3. \quad (2).$$

Die Wärmeleitfähigkeit eines Gases beträgt

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot \bar{v} \cdot \rho_e \cdot c_e \cdot \bar{l} \quad (3)$$

(\bar{v} - mittlere Geschwindigkeit der Elektronen, c_e – spezifische Wärmekapazität der Elektronen, \bar{l} - mittlere freie Weglänge der Elektronen).

Aus der inneren Energie des freien Elektronengases

$$U = m_e \cdot c_e \cdot T = \frac{m_e}{M} \cdot N_A \cdot \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T \quad (4)$$

ergibt sich schließlich für die spezifische Wärmekapazität der Elektronen

$$c_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{N_A}{M} \cdot k_B = \frac{3}{2} \cdot \frac{k_B}{m_e} \quad (5).$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen steigt nach Formel (3) proportional \sqrt{T} , da für die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen folgender Ausdruck gilt

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8 \cdot k_B \cdot T}{\pi \cdot m_e}}. \quad (6).$$

Betrachtet man zusätzlich die Spinkopplung zweier Elektronen im Eisen, d.h. jeweils zwei Elektronen sind zu einem Teilchen der doppelten Masse verbunden, erhält man bei $T = 300 K$ für die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen nach Formel (3)

$\lambda = 63 W/(m \cdot K)$ und für die spezifische Wärmekapazität (5) $c_e = 1,14 \cdot 10^7 J/(kg \cdot K)$.

Wenn sich die Energie nach dem Gleichverteilungssatz im thermodynamischen Gleichgewichtsfall auf das Gitter und die freien Elektronen gleich verteilt, ergibt sich

$$U = \rho_G \cdot V \cdot c_G \cdot T = \rho_e \cdot V \cdot c_e \cdot T$$

$$c_G = \frac{\rho_e}{\rho_G} \cdot c_e \quad \text{bzw.} \quad (7)$$

(c_e – spezifische Wärmekapazität des Elektronensystems, c_G – spezifische Wärmekapazität des Gitters).

Tabelle 1: Thermische Materialeigenschaften von Eisen für das freie Elektronensystem berechnet nach den Formeln (2), (3) und (5) und das Gitter nach (7) sowie für das Kompaktmaterial

System	Dichte in kg/m ³	Wärmekapazität in J/(kg·K)	Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)
Freie Elektronen	0,1547	1,14 · 10 ⁷	63 bei T = 300 K
Gitter	7870	223	13,2
Kompaktmaterial	7870	446	76,2

Die Wärmeleitfähigkeit für das Gitter in Tabelle 1 wurde erhalten aus der Annahme, dass zwischen dem Gitter und dem Elektronensystem eine parallele Wärmeleitung stattfindet und somit die Summe aus beiden die Wärmeleitfähigkeit des Kompaktmaterials ergeben sollte. Der Gleichverteilungssatz der Thermodynamik kommt in dem Produkt aus Dichte und Wärmekapazität, welches der gespeicherten Energie pro Volumen und Kelvin entspricht, zum Ausdruck. Die im Volumen gespeicherte Energie ist danach pro Kelvin in beiden Systemen, den freien Elektronen und dem Gitter gleich.

Die Kopplung zwischen dem freien Elektronensystem und dem Gitter erfolgt durch Wärmesenken bzw. Wärmequellen in den Elementen des COMSOL® -Programms. Die Wärmequellen verlangen eine Leistungsdichte, die vom Elektronensystem ab- und dem Gitter zugeführt wird. Die innere Energie im Elektronensystem lässt sich durch

$$U = \rho_e \cdot V \cdot c_e \cdot T \quad (8)$$

beschreiben. Die Leistungsdichte im Elektronensystem beträgt dann

$$\frac{\dot{Q}}{V} = \frac{\dot{U}}{V} = \rho_e \cdot c_e \cdot \frac{dT}{dt} \quad (9).$$

Die Zeitableitung der Temperatur kann mit Hilfe der Relaxationszeit der Energieübertragung von den Elektronen auf das Gitter ermittelt werden.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\tau} \quad (10).$$

Damit ergibt sich für die Kopplung der beiden Systeme schließlich

$$\left. \frac{\dot{Q}}{V} \right|_e = - \left. \frac{\dot{Q}}{V} \right|_G = -\rho_e \cdot c_e \cdot \frac{T_e - T_G}{\tau} \quad (11)$$

Wird die Wärmeleitfähigkeit des Elektronensystems entsprechend der Fermiverteilungsfunktion im Leitungsband des Metalls betrachtet, ergibt sich [3]

$$\lambda_e = \frac{1}{3} \pi^2 \cdot \frac{n_e}{m_e} \cdot k^2 \cdot \tau \cdot T \quad (12)$$

(n_e – Elektronendichte, k – Boltzmannkonstante).

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur verändert sich dadurch gegenüber dem freien Elektronengas entsprechend der Gleichungen (3) und (6) mit der Proportionalität von $\lambda_e \sim \sqrt{T}$ zu $\lambda_e \sim T$.

3. Programmsystem

Das physikalische Modell konnte im COMSOL® Heat Transfer Tool umgesetzt werden. Alle physikalischen Materialeigenschaften können auch temperaturabhängig eingesetzt werden. Zur schnelleren Berechnung wurde aufgrund der Axialsymmetrie der Femtosekundenlaserbearbeitung der 2D axialsymmetrische Fall ausgewählt. Zur Verbesserung der räumlichen Auflösung der Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche wurde das Material in Schichten unterteilt. Die Vernetzung der Struktur ist im Bild 1 dargestellt.

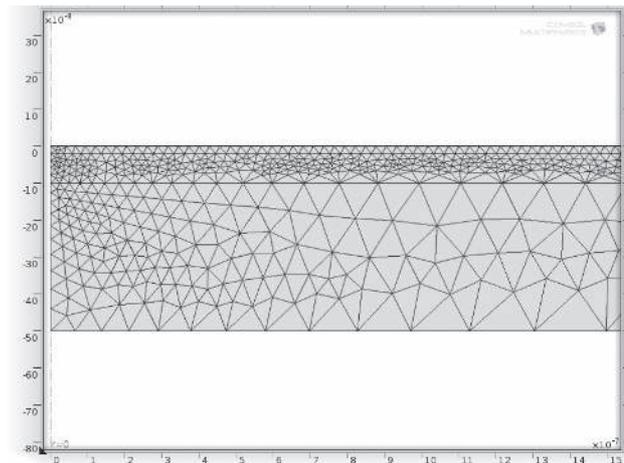


Bild 1: Netzstruktur in der 2D-Axialsymmetrie mit den Koordinaten r und z (Die Materialoberfläche befindet sich bei z = 0).

Zur Berechnung der Temperaturen im Elektronensystem und im Gitter wurden in das Projekt zwei Heat Transfer Module eingefügt. Im Elektronensystem erfolgt die Absorption der Laserstrahlung entsprechend dem Absorptionsgesetz mit einem Ab-

sorptionskoeffizienten von $5 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$. Die Absorption erfolgt demzufolge in einem Metall in einer oberflächennahen Schicht von ca. 20 nm. Die heißen Elektronen besitzen eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als das Gitter. Die thermische Kopplung zwischen dem Elektronensystem und dem Gitter wird entsprechend der Gleichung (11) realisiert, d.h. nach einer Zeit, die etwa der Relaxationszeit entspricht, sollten sich die Temperaturen des Elektronensystems und des Gitters angeglichen haben. Zur Auswertung der Ergebnisse stellt COMSOL® ausreichend Werkzeuge zur Verfügung.

4. Ergebnisse

Die berechneten zeitlichen Verläufe der Temperaturen in der Skintiefe von 20 nm im Zentrum der Laserbestrahlung für die Femto- und Pikosekundenbestrahlung mit einer Energiefluenz von $2,7 \mu\text{J}$ sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt.

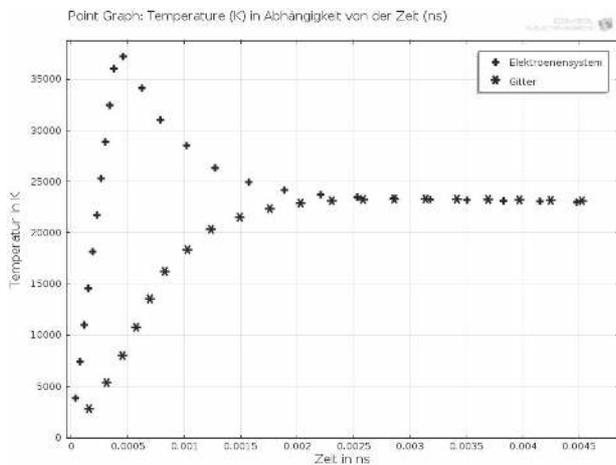


Bild 2: Femtosekundenlaserbestrahlung - Abhängigkeit der Temperatur von der Zeit für das Elektronensystem (+) und das Gitter (*) bei einer Energiefluenz der Laserstrahlung von $2,7 \mu\text{J}$.

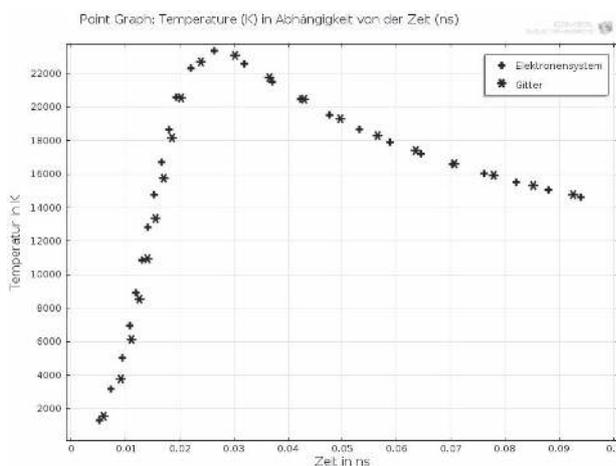


Bild 3: Pikosekundenlaserbestrahlung - Abhängigkeit der Temperatur von der Zeit für das Elektronensystem (+) und das Gitter (*) bei einer Energiefluenz der Laserstrahlung von $2,7 \mu\text{J}$.

Nach einer Zeit von ca. 1,5 ps haben sich die Temperaturen des Elektronensystems und des Gitters

angeglichen (Bild 2). Deshalb ist die Unterscheidung in die elementaren Wechselwirkungen Photon-Elektron und Elektron-Phonon bei Laserpulszeiten im Pikosekundenbereich nicht mehr relevant. Die Temperaturen des Elektronensystems und des Gitters sind nahezu identisch (Bild 3). Nur für Zeiten kleiner zwei Pikosekunden ergeben sich vernachlässigbare Differenzen der beiden Temperaturen.

Experimentelle Ergebnisse liegen derzeit nur für die Abtragsraten pro Laserpuls vor. Eine Festlegung des Abtrags pro Laserpuls kann über das Modell nur durch die Isothermen erfolgen. Dazu muss eine Schwelltemperatur festgelegt werden, bis zu der sich der Abtrag einstellt. Es ist nicht sinnvoll, die klassischen Schmelz- und Verdampfungsprozesse ablaufen zu lassen, da in diesen kurzen Zeiten keine Umordnung in der Gitterstruktur möglich sein sollte. Die Schwelltemperatur wurde ermittelt aus der Beziehung

$$T_{Sch} = \frac{q_V}{c} \quad (13)$$

(q_V – Verdampfungswärme, c – spezifische Wärmekapazität). Für Eisen ergibt sich dabei ein Wert für die Schwelltemperatur von ca. 13000 K, d.h. Material oberhalb dieser Schwelltemperatur wird abgetragen. Die Abtragstiefe z_{Sch} und der Abtragsradius r_{Sch} werden aus den berechneten Isothermen bei der Schwelltemperatur ermittelt. Über die Volumenformel eines Rotationsparaboloids

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot z_{Sch} \cdot r_{Sch}^2 \quad (14)$$

kann der Volumenabtrag pro Laserpuls in guter Näherung entsprechend dem Modellansatz ermittelt werden.

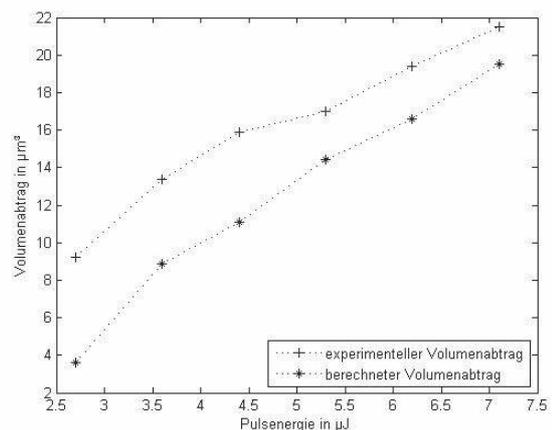


Bild 4: Volumenabtrag pro Laserpuls für die Femtosekundenlaserbearbeitung in Abhängigkeit von der Pulsenergie.

Bei der Femtosekundenlaserbearbeitung entspricht der berechnete Volumenabtrag in seinem Verlauf den experimentellen Werten. Die Verschiebung der absoluten Werte ist durch eine Veränderung der Schwelltemperatur zu kleineren Werten hin möglich (Bild 4). Bei der Pikosekundenlaserbearbeitung steigt der berechnete Volumenabtrag schneller an als der experimentelle (Bild 5), wobei allerdings in

beiden Fällen der absolute Abtrag geringer ausfällt als bei der Femtosekundenlaserbearbeitung. Eine Erklärung für dieses Verhalten könnte sein, dass bei der Pikosekundenlaserbearbeitung die Abschirmung der Laserstrahlung über die Plasmazündung in diesem Zeitbereich den Anstieg des experimentellen Abtrages begrenzt.

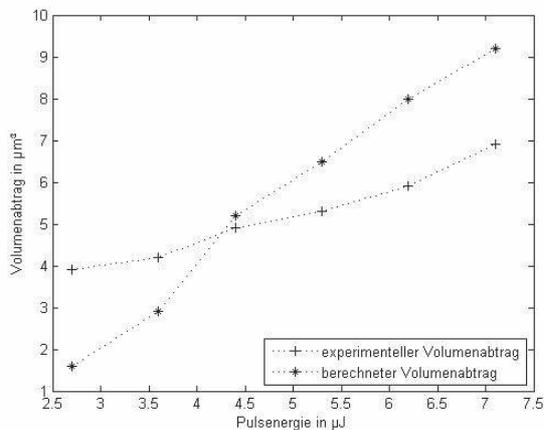


Bild 5: Volumenabtrag pro Laserpuls für die Pikosekundenlaserbearbeitung in Abhängigkeit von der Pulsenergie.

5. Zusammenfassung

Durch das Modell der Photon-Elektron- und Elektron-Phonon-Wechselwirkung konnte bei der Pikosekundenlaserbearbeitung eine Erklärung für den Materialabtrag in Abhängigkeit von der Pulsenergie gefunden werden. Im Pikosekundenbereich werden die experimentellen Ergebnisse durch die Rechnungen nicht vollständig wiedergespiegelt. Ein Grund dafür könnte die Plasmaabschirmung sein. Interessant ist dabei, dass die experimentellen Daten im Femtosekundenbereich nur richtig berechnet werden können, wenn für die Wärmeleitfähigkeit des Elektronensystems die lineare Proportionalität zur Temperatur entsprechend der Fermiverteilung im Leitungsband angenommen wird. Die Proportionalität der Wärmeleitfähigkeit zur Wurzel aus der Temperatur entsprechend dem Modell des freien Elektronengases führte in beiden Fällen der Femto- und der Pikosekundenlaserbestrahlung zu annähernd gleichen Abtragsraten und konnte damit den experimentellen Befund nicht wiedergeben.

Literatur

- [1] D. Denzler; Untersuchungen zur Ultrakurzzeitdynamik photostimulierter Oberflächenreaktionen und der Energierelaxation in Metallen, Diplomarbeit Freie Universität Berlin 1999
- [2] B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet; Grundlagen der Statistischen Physik, Walter de Gruyter 1994
- [3] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer, Physik für Ingenieure S. 684, VDI Verlag 4. Auflage

ERZEUGUNG PERIODISCHER MIKRO- UND SUBMIKROMETERSTRUKTUREN AUF KUNSTSTOFFOBERFLÄCHEN

Denise Langheinrich¹, Sebastian Eckhardt², Andrés F. Lasagni^{1,2}

¹Fraunhofer IWS, Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden

²Institut für Fertigungstechnik, TU Dresden, George-Bähr-Straße 3c, 01069 Dresden

Das Aufbringen periodischer Topografien im μm - und Sub- μm -Bereich auf Materialoberflächen ist ein schnell wachsender F.- & E.-Bereich. Die erzeugten Strukturen geben dem Werkstoff nicht nur eine definierte Topografie sondern verleihen ihm neue spezifische physikalische und chemische Eigenschaften. Am Fraunhofer IWS wird die Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) zur schnellen, großflächigen und kostengünstigen Erzeugung periodischer Strukturen auf unterschiedlichen Werkstoffoberflächen angewendet und weiterentwickelt. Ein Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Erzeugung bio-inspirierter und funktionalisierter Oberflächen auf polymeren Festkörperwerkstoffen (z.B. PI) sowie photoempfindlicher Lacke für den Einsatz in der Elektronik, Photovoltaik und Biotechnologie.

The fabrication of periodic μm - and sub- μm arrays on different material surfaces has gained increasing prominence in research and development. In particular, topographical, chemical and physical surface properties can be locally influenced by those patterns. For the fast and large area fabrication of periodical μm - and sub- μm -structures, the Laser Interference Patterning technology is applied and advanced at the Fraunhofer IWS. Thereby, one core area is the generation of bio-inspired and functionalized surfaces of polymer bulk materials (e.g. PI) as well as light sensitive resins for the application in electronics, photovoltaics, and biotechnology.

1. Einleitung

Die präzise und schnelle Erzeugung definierter periodischer Topografien auf Materialoberflächen im μm - und Sub- μm -Bereich ist ein schnell wachsender technologischer Bereich mit hohem Anwendungspotential. Durch die Strukturierung erhalten die Oberflächen von Metallen, Halbleitern oder Polymeren neue spezifische elektrische, mechanische und chemische Eigenschaften. In Abhängigkeit von den Materialparametern und der Strukturmorphologie entstehen so neuartige funktionelle Oberflächen, die beispielsweise in der Biotechnologie und Medizin oder auch Photovoltaik und Sensorik eingesetzt werden^[1-5].

Die Fertigungstechnik bietet mit z.B. Abgusstechniken, E-Beam-Lithografie und optischer Lithografie ein breites Spektrum an Technologien, mit denen Oberflächentopografien bearbeitet werden können. Fertigungsmethoden, die auf Laserstrahlung als Werkzeug zurückgreifen, bieten aufgrund der optimalen Prozessregelung und der kontaktfreien Bearbeitung ein hohes Maß an Flexibilität. Dabei erfolgt der Energieeintrag lokal beschränkt. Häufig werden Verfahren wie das direkte Laserschreiben und abbildende lithografische Methoden eingesetzt. Obwohl diese Technologien für die Strukturierung im μm -Bereich geeignet sind, sind sie aufgrund ihres sequenziellen Ablaufs bzw. durch den hohen geräte-technischen Aufwand (z.B. Masken) sehr zeit- und kostenintensiv^[6-7].

Eine schnelle und kostengünstige Alternative für die Erzeugung periodischer Strukturen ist die Laserinterferenzlithografie (LIL)^[8-9]. Werden Hochleistungslasersysteme eingesetzt kann die Materialoberfläche direkt bearbeitet werden (Direkte Laserinterferenzstrukturierung, DLIP)^[10-12].

In diesem Beitrag wird auf die letzten Entwicklungen auf dem Gebiet der DLI-Technologie zur Modifizierung photoempfindlicher Lacke sowie polymerer

Bulkmaterialien eingegangen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Laserlicht und Material. Außerdem werden erste Ergebnisse zu einer Auswahl von konkreten Anwendungsbeispielen aus der Biotechnologie gezeigt.

2. Laserinterferenzstrukturierung

Der experimentelle Aufbau zur Laserinterferenzstrukturierung ist in Bild 1 (a) schematisch dargestellt.

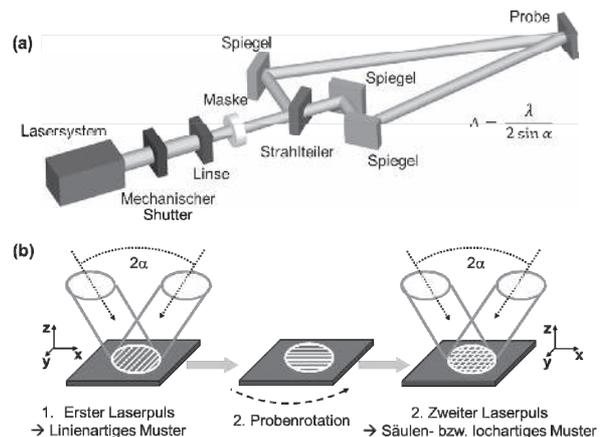


Bild 1: (a) Schematische Darstellung zum Zwei-Strahl-Interferenz-Aufbau. (b) Schrittfolge für die Erzeugung säulen- oder lochartiger Muster mittels Zwei-Strahl-Interferenz.

Nachdem der Ausgangsstrahl bspw. eine Linse und/oder eine Maske zur Strahlformung passiert hat, wird er in eine kleine Anzahl ($N \leq 4$) von Teilstrahlen gesplittet (z.B. in zwei Strahlen, siehe Bild 1 (a)). Durch die nachfolgend angeordneten Spiegel werden die Strahlen unter dem Einfallswinkel 2α auf der Substratoberfläche zur Interferenz gebracht. Der Einfallswinkel (2α) sowie die Laserwellenlänge (λ)

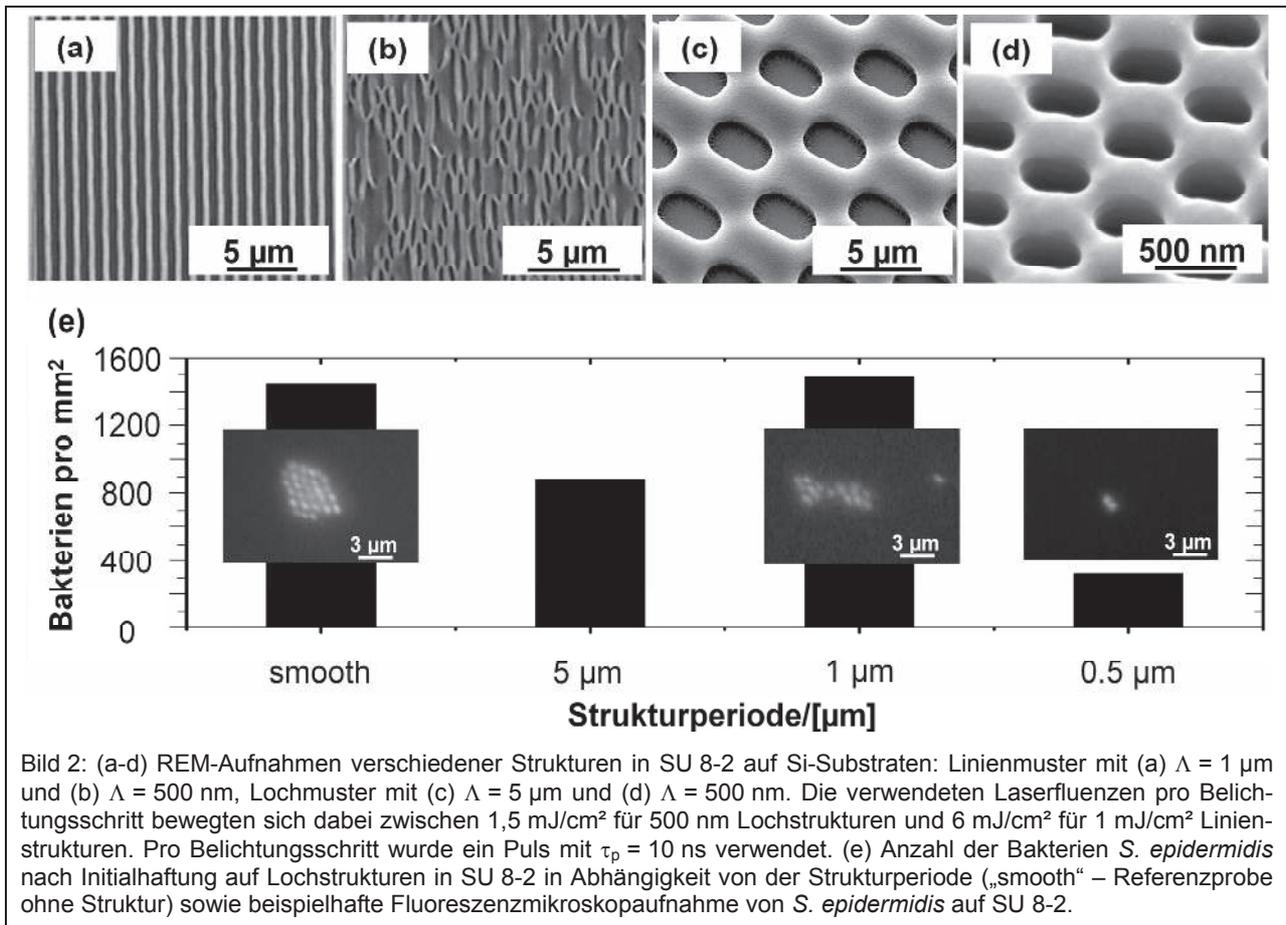


Bild 2: (a-d) REM-Aufnahmen verschiedener Strukturen in SU 8-2 auf Si-Substraten: Linienmuster mit (a) $\Lambda = 1 \mu\text{m}$ und (b) $\Lambda = 500 \text{ nm}$, Lochmuster mit (c) $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ und (d) $\Lambda = 500 \text{ nm}$. Die verwendeten Laserfluenzen pro Belichtungsschritt bewegten sich dabei zwischen $1,5 \text{ mJ/cm}^2$ für 500 nm Lochstrukturen und 6 mJ/cm^2 für $1 \mu\text{m}$ Linienstrukturen. Pro Belichtungsschritt wurde ein Puls mit $\tau_p = 10 \text{ ns}$ verwendet. (e) Anzahl der Bakterien *S. epidermidis* nach Initialhaftung auf Lochstrukturen in SU 8-2 in Abhängigkeit von der Strukturperiode („smooth“ – Referenzprobe ohne Struktur) sowie beispielhafte Fluoreszenzmikroskopaufnahme von *S. epidermidis* auf SU 8-2.

bestimmen dabei die Periode des Interferenzmusters (Λ). Mit dem dargestellten Aufbau können Linienstrukturen erzeugt werden. Diese sind wiederum Ausgangspunkt für die Herstellung zweidimensionaler Strukturen (z.B. säulenartige Strukturen auf Bulkpolymeren und lochartige Strukturen in Photolacken). Dazu erfolgt, wie in Bild 1 (b) dargestellt, ein zweiter Belichtungsschritt nachdem die Probe um einen bestimmten Winkel gedreht wurde.

Für die Strukturierung steht das gepulste Nd:YAG-Lasersystem Quanta Ray der Fa. Spectra Physics/Newport mit einer Grundwellenlänge von 1064 nm ($\tau_p = 10 \text{ ns}$, $f = 10 \text{ Hz}$) zur Verfügung. Da die meisten Photolacke sowie Polymere eine hohe Absorption im UV-Spektralbereich besitzen, wird die frequenzverdreifachte Wellenlänge $\lambda = 355 \text{ nm}$ eingesetzt.

3. Submikrometer-Strukturen in Photolack für antibakterielle Oberflächen

Photoempfindliche Lacke sind Materialien auf beispielsweise Epoxydharzbasis, die mit Hilfe von Licht chemisch umgewandelt werden können. Dabei werden bei sogenannten positiven Lacken belichtete Bereiche so verändert, dass sie für die entsprechende Entwicklerlösung löslich werden. Bei negativen Lacken, wie dem hier verwendeten Photolack SU 8-2 (Fa. Microchem Corp.), werden belichtete Bereiche polymerisiert und für den Entwickler unlöslich. Der auf Si-Substraten ($2 \times 1 \text{ cm}^2$) mittels Spin-Coating aufgebrauchte Photolack (SU 8-2) wurde

durch Laserinterferenzlithographie (LIL) unter Verwendung des unter Bild 1 (a) dargestellten Versuchsaufbaus strukturiert. Es wurden linien- und lochartige Strukturen mit unterschiedlichen Perioden (500 nm bis $5 \mu\text{m}$) auf der gesamten Si-Oberfläche (ein Puls pro Belichtungsschritt) erzeugt und zunächst hinsichtlich ihrer Qualität und Stabilität untersucht. Lochartige Strukturen wurden dabei mit der in Bild 1 (b) dargestellten Schrittfolge erzeugt. Die detaillierte Behandlung des Photolacks wurde bereits erläutert^[13].

Für die Stabilität der Strukturen sind vor allem Aspekte wie die Strukturperiode (Λ), die Lackschichtdicke (d), die Breite der photopolymerisierten Bereiche (Wandstärke) sowie die Parameter bei der Behandlung vor und nach der Belichtung zu beachten^[14]. Linienartige Strukturen sind wie in Bild 2 (a) zu sehen bei größeren Perioden ($\Lambda = 1 \mu\text{m}$), kleineren Schichtdicken ($d = 1,2 \mu\text{m}$) und großen Wandstärken im Grunde stabil. Kleinere Perioden ($\Lambda < 1 \mu\text{m}$) bzw. zu große Schichtdicken führen aufgrund hoher Kapillarkräfte während des Trocknungsprozesses dazu, dass die Strukturen in sich zusammenfallen (Bild 2 (b)).

In Bild 2 (c-d) ist ein zweidimensionaler Strukturtyp (Löcher) zu sehen. Da diese periodische Struktur an den Überlappungspunkten zusätzlich vernetzt ist, ergibt sich unabhängig von der Strukturperiode, der Schichtdicke und der Wandstärke eine hohe Stabilität.

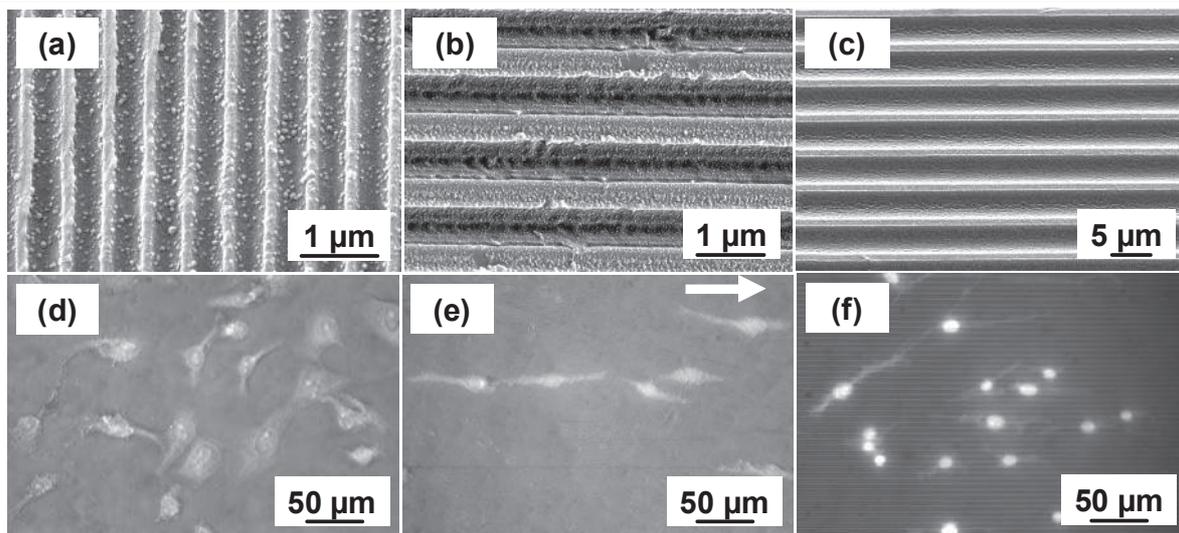


Bild 3: (a-c) Ausgewählte REM-Aufnahmen strukturierter PI-Oberflächen: (a) $\Lambda = 500 \text{ nm}$, $F = 0,3 \text{ J/cm}^2$; (b) $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $F = 0,5 \text{ J/cm}^2$; (c) $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $F = 1,0 \text{ J/cm}^2$. (d-e) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von LM2-Tumorzellen auf diesen Substraten: (d) Referenzsubstrat ohne Struktur mit $H_n(0-15^\circ) = 0,22$; (e) $\Lambda = 500 \text{ nm}$ mit $H_n(0-15^\circ) = 0,79$; (f) $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ mit $H_n(0-15^\circ) = 0,61$.

Diese Art von Struktur wurde für die Untersuchung zum Verhalten des Bakteriums *Staphylococcus epidermidis* verwendet. Dafür wurden die Substrate mit einer Lösung, die einen Stamm dieser Bakterienart enthielt, tropfenweise kontaminiert (2 min.). Nach der Fixierung erfolgte die Markierung der *S. epidermidis* mit dem Farbstoff DAPI. Die Anzahl der Bakterien sowie deren Besiedlungsverhalten wurden mit Hilfe von Fluoreszenzmikroskopie analysiert.

Bild 2 (e) zeigt den Trend der Bakterienbesiedlung in Abhängigkeit von der Strukturperiode und im Vergleich mit der Referenzprobe (nicht-strukturiertes SU 8-2). Es wird deutlich, dass sich eine glatte Oberfläche sowie eine Strukturperiode von $1 \mu\text{m}$ günstig auf das Besiedlungsverhalten von *S. epidermidis* auswirken. Auf einer Struktur mit $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ sowie $\Lambda = 500 \text{ nm}$ konnte die Initialhaftung des Stamms reduziert werden, wobei mit ca. 300 Bakterien/ mm^2 die wenigsten Bakterien auf 500 nm Strukturperiode gezählt wurden.

Hauptgrund für die Reduzierung der Initialhaftung ist die Größenordnung der Periode. Vor allem im Sub- μm -Bereich ist die Kontaktfläche zwischen Bakterien und Substrat stark minimiert, so dass die Zellen weniger Anhaftungspunkte finden und sich dadurch kein starkes Netzwerk ausbilden kann.

4. Strukturiertes Polyimid für gerichtetes Zellwachstum

In dieser Studie wurden mittels DLIP-Technologie Linien-Arrays mit unterschiedlichen Strukturperioden (500 nm bis $10 \mu\text{m}$) auf Polyimidfolie (PI, Fa. Goodfellow) erzeugt. Die Laserfluenzen bewegten sich dabei zwischen $0,3 \text{ J/cm}^2$ für 500 nm und $1,0 \text{ J/cm}^2$ für $10 \mu\text{m}$. Alle Strukturierungen erfolgten jeweils mit einem Puls ($\tau_p = 10 \text{ ns}$). Die mit einem Puls strukturierte Fläche betrug ca. 25 mm^2 .

Um eine größere Fläche zu bearbeiten, stand ein Vierachssystem zur Verfügung, mit dem die Probe pulsgenau verfahren werden kann (Verfahrensgenauigkeit: 500 nm).

Die Substrate wurden anschließend als Templates für Zellwachstumsexperimente verwendet. Im Vorfeld zu diesen biologischen Untersuchungen erfolgte die Charakterisierung der erzeugten Strukturen hinsichtlich ihrer Form und Homogenität.

Es wurde der in Bild 1 (a) dargestellte Zweistrahl-Interferenzaufbau verwendet. Das UV-Licht wird dabei von dem im PI ausgedehnten Netzwerk an Iridgruppen (Chromophoren) sehr gut absorbiert ($\kappa = 0,3 \cdot 10^5 \text{ 1/cm}$ für 351 nm)^[15-17].

Bild 3 (a-c) zeigt eine beispielhafte Auswahl raster-elektronenmikroskopischer Aufnahmen von Oberflächenstrukturen auf PI.

Die Strukturen auf der PI-Oberfläche weisen eine wohlgeordnete, weitestgehend defektfreie Form auf. Strukturperioden bis zu 500 nm können gut abgebildet werden. Die bei den verwendeten Laserparametern maximal erreichbaren Strukturperioden bewegen sich zwischen 280 nm ($\Lambda = 500 \text{ nm}$) und 900 nm ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$).

Grundsätzlich wird bei der Ablation von PI von einem photo-physikalischen Abtrag mit überwiegend photo-chemischem Anteil ausgegangen. Dabei werden die chemischen Bindungen zwischen Stickstoff und Carbonylgruppen innerhalb des Iridsystems durch die Photonen direkt aufgebrochen^[18]. Für die Initiierung dieses Vorgangs wird ein Energieschwellwert benötigt, der für PI bei $I_{th} = 100 \text{ mJ/cm}^2$ ($\lambda = 355 \text{ nm}$)^[19]. Des Weiteren wurden geringe Mengen an Benzol und Benzol-Derivate (Pyrolyseprodukte) in den Ablationsprodukten gefunden, deren Entstehung photo-thermischer Ablation zugeordnet wird^[20].

Die Zellwachstumsuntersuchungen wurden mit Brustkrebszellen von Mäusen (LM2) durchgeführt. Für die Charakterisierung wurden die Zellkerne der auf den PI-Substraten angesiedelten Zellen (Wachstumszeit: 96 h) mit dem Farbstoff Hoechst 33258 markiert. Mittels Fluoreszenzmikroskopie erfolgte die Untersuchung der Wachstumsausrichtung in Bezug auf die Strukturlinien. Der Grad der Ausrichtung wurde über den Winkel zwischen Linien- und Zellachse quantifiziert. Bei einem Winkel zwischen 0° und 15° war die Zelle parallel zu den Linien orientiert.

In Bild 3 (d-f) sind einige fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen der Tumorzellen auf den PI-Substraten dargestellt. Auf dem unbehandelten PI zeigten die Zellen keine bestimmte Vorzugsrichtung (Bild 3 (d)). Die relative Häufigkeit (H_n) der Zellen mit einem Winkel 0-15° zu den Linien betrug lediglich 0,22. Ein anderes Bild ergibt sich auf den strukturierten Substraten, auf denen sich die Zellen mit einer relativen Häufigkeit von 0,58 ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$) bis 0,79 ($\Lambda = 500 \text{ nm}$) parallel zu den Linien ausrichteten^[21].

Diese Resultate zeigen, dass die Mikrostruktur auf der Oberfläche eine Art mechanischer Stimulus für die Zellen darstellt, worauf die Organismen durch direkte oder indirekte Mechanotransduktion mit einer Änderung ihrer Form, Differenziation und des Ausbreitungsverhaltens reagieren^[22-24].

5. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der hier dargestellten Ergebnisse wird deutlich, dass sich die Laserinterferenztechnologie in Form der LIL und DLIP für die schnelle Herstellung periodischer Strukturen auf großen Oberflächen polymerer Materialien eignet. Einerseits können diese Substrate genutzt werden, um bakterielle Kontaminationen zu minimieren. Diese Oberflächen könnten Anwendung in z.B. Krankenhäusern, Fitnessstudios oder Küchen, wo die Infektionsgefahr besonders hoch ist, finden. Andererseits ist es möglich das Wachstum bestimmter Zellen durch die Mikrostruktur zu beeinflussen. Hier wären Anwendungen im Bereich der Medizintechnik (z.B. Implantatdesign) oder des Tissue Engineerings denkbar.

In naher Zukunft soll geklärt werden, inwieweit sich die hier dargestellten Ergebnisse auf andere Mikroorganismen sowie tierische und menschliche Zellen übertragen lassen. Dazu werden weitere experimentelle Arbeiten auf biologisch relevanten Substraten mit ähnlichen und auch anderen Strukturtypen und -perioden durchgeführt.

Literaturverzeichnis

[1] N. Ganesh, I.D. Block, B.T. Cunningham, Appl. Phys. Lett. 89 (2006), 023901.

[2] W.H. Ryu, S.W. Min, K.E. Hammerick, M. Vyakarnam, R.S. Greco, F.B. Prinz, R.J. Fasching, Biomater. 28 (2007), 1174.

[3] K. Hammerick, W. Ryu, R. Fasching, S. Bai, R. Smith, R. Greco, in: Nanoscale technology in biological systems. Boca Raton, FL, CRC Press (2005), 73.

[4] J.D. Joannopoulos, P.R. Villeneuve, S. Fan, Nature 386 (1997), 143.

[5] A. Lasagni, M.R. Nejati, R. Clasen, F. Mücklich, Adv. Eng. Mater. 6 (2006), 580.

[6] A. Bertsch, S. Jiguet, P. Renaud, J. Micromech Microeng. 14 (2004), 197.

[7] F. Mèriche, E. Neiss-Clauss, R. Kremer, A. Boudrioua, E. Dogheche, E. Fogarassy, R. Mouras, A. Bouabellou, Appl. Surf. Sci. 254 (2007), 1327.

[8] M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison, R. G. Denning, and A. J. Turberfield, Nature 404 (2000), 53.

[9] T. Kondo, S. Juodkazis, V. Mizeikis, H. Misawa, Opt. Exp 14 (2006), 7943.

[10] F. Mücklich, A. Lasagni, C. Daniel, Internet. 13 (2005), 437.

[11] A. Lasagni, Proceedings of the 17. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium, Dresden, October 30-31 (2009), 15.

[12] M. Zheng, M. Yu, Y. Liu, R. Skomski, S.H. Liou, D. J. Sellmyer, V.N. Petryakov, Y.K. Verevkin, N.I. Polushkin, N.N. Salashchchenko, Appl. Phys. Lett. 79 (2001), 2606.

[13] A.F. Lasagni, B.S. Menéndez-Ormaza, Adv. Eng. Mater. 12 (2010), 54.

[14] D. Wu, N. Fang, C. Sun, X. Zhang, Sens. Actuators A 128 (2006), 109.

[15] W.K.C. Yung, J.S. Liu, H.C. Man, T.M. Yue, J. Mater. Proc. Technol. 2000, 101, 306.

[16] G. Koren, J.T.C. Yeh, J. Appl. Phys. 56 (1984), 2120.

[17] S. Küper, J. Brannon, K. Brann, Appl. Phys. A56 (1993), 43.

[18] K.C. Yung, D.W. Zeng, T.M. Yue, Appl. Surf. Sci. 173 (2001), 193.

[19] W.K.C. Yung, J.S. Liu, H.C. Man, T.M. Yue, J. Mater. Proc. Technol. 101 (2000), 306.

[20] N. Biturkin, B. S. Luk'yanchuk, M. H. Hong, T. C. Chong, Chem. Rev. 103 (2003), 519.

[21] D. Langheinrich, E. Yslas, M. Broglia, V. Rivalola, D. Acevedo, A. Lasagni, J. Polymer Sci. Part B 50 (2012), 415.

[22] J.H. Wang, B.P. Thampatty, J.S. Lin, H.J. Im, J. Gene 391 (2007), 391, 1.

[23] Y. Lim, A.D. Dreiss, Z. Zhou, J.C. Hansen, C.A. Siedlecki, R.W. Hengstebeck, Biomaterials 28 (2007), 1787.

[24] M.J. Dalby, N. Gadegaard, M.O. Riehle, C. Wilkinson, A. Curtis, Int. J. Biochem. Cell B 36 (2004), 2005.

MATERIALSPEZIFISCHE EFFEKTE UND LIMITIERUNGEN BEI DER MIKROSTRUKTURIERUNG MIT PS-LASERSTRAHLUNG UND SCANNEROPTIK

Jens Hildenhagen, Marco Smarra, Klaus Dickmann

Laser Center (LFM), Muenster University of Applied Sciences, 48565 Steinfurt, Germany

Wird ps-Laserstrahlung für die Mikrostrukturierung mittels Scanneroptik eingesetzt, treten mit zunehmender Tiefe unerwünschte Nebeneffekte auf. Strukturanten weisen keine senkrechten Flanken auf, es ergeben sich materialspezifische Winkel von 50° bis 85°. Bei hochreflektierenden Substraten bilden sich am Strukturgrund Gräben die bis zu 20 % der Gesamttiefe betragen können. Des Weiteren ist bei einigen Werkstoffen die Entstehung unterschiedlicher Substrukturen (Löcher, Kanäle, Rillen) möglich. Auch diese können teilweise die Genauigkeit der Geometrie beeinträchtigen. Zum Erreichen definierter Struktur Tiefen muss das genaue Abtragsverhalten systematisch untersucht werden. Bei der Vielzahl an beeinflussenden Parametern ist eine Automatisierung solcher Messreihen sinnvoll. Zur Studie an acht Werkstoffen (hochlegierter Stahl, Kupfer, Titan, Aluminium, PMMA, Al₂O₃-Keramik, Silizium und Quarzglas) wurde ein industrieller ps-Laser mit einem chromatischen Abstandssensor gekoppelt. Hierüber ist eine unmittelbare Vermessung der generierten Strukturen und das automatische Auswerten von Parametern möglich.

1. Einleitung

Die Vorzüge von Lasersystemen mit Pulsdauern im Pikosekunden-Bereich sind hinlänglich bekannt, ihr industrieller Nutzungsgrad steigt kontinuierlich. Bei komplexen Mikrostrukturen ist die Scanneroptik meist das Mittel der Wahl. Hier treten allerdings mit zunehmender Abtragstiefe Nebeneffekte zum Vorschein, die eine wachsende Abweichung von vorgegebenen Geometrieformen bewirken und somit viele Applikationen erschweren oder verhindern. Vergleichbare Wechselwirkungen treten auch bei der Bearbeitung mit Femtosekunden-Lasersystemen auf [1]. Für die Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Lasern (UKP) werden bewusst Pulsdauern kleiner 10 ps verwendet, um eine Wechselwirkung unterhalb der Phononen-Latenzzeit zu erzielen. Die Pulsenergie wird dabei so gewählt, dass sie unterhalb der thermischen Schwelle - meist knapp über der Abtragungsschwelle - liegt. Somit treten die Wärmeleitungsseigenschaften des Substrates in den Hintergrund und der Ablationsprozess wird von der unmittelbaren Eindringtiefe des Laserlichts dominiert. Folglich begrenzt sich der Wechselwirkungsprozess auf diesen Bereich:

$$\tau_e \ll \tau_L \ll \tau_i$$

(τ_e = Elektronenabkühlzeit, τ_L = Laserpulsdauer,

τ_i = Gitteraufheizzeit)

Hieraus ergeben sich eigene Gesetzmäßigkeiten für den Abtragsprozess mit ultrakurzen Pulsen, die sowohl Vorteile als auch störende Nachteile beinhalten. Grundsätzlich können Abtragsmodelle zu dem Prozess erstellt werden [2, 3]. Für die Praxis erschwert jedoch das Zusammenspiel einer Vielzahl von Laser- und Werkstoffparametern eine zuverlässige Modellbildung. Somit ist eine vorausgehende Berechnung von Konturabweichungen und mögliche Kompensation nicht ohne Weiteres realisierbar. Bisher werden entsprechende Strukturveränderungen für jeden Einzelfall untersucht und, wenn möglich, durch Sonderlösungen (z. B. das Verkippen der Probe bei sonst unzureichenden Flankenwinkeln) realisiert. Eine

umfassende Analyse der Effekte an unterschiedlichen Werkstoffen soll helfen, ein besseres Verständnis für die Besonderheit der UKP-Bearbeitung zu erlangen. Zudem soll gezeigt werden, dass mittels gezielter Parameter- und Materialauswahl einige Fehlbildungen reduziert werden können.

Eine optimale Ergänzung bei der Studie von Mikrostrukturen mittels ps-Laserstrahlung stellt ein integriertes Messsystem zur Erfassung der Oberflächentopografie dar. Können Strukturen in situ vermessen werden, so ist eine zeitnahe Erfassung der generierten Struktur nebst vielen Automationsschritten bis hin zur selektiven Korrektur der Geometrie denkbar. Für die vorliegende Studie wurde ein Pikosekundenlaser vom Typ Trumpf TruMicro 5050 Compact (Ausgangsleistung: 50 W, Pulsfolgefrequenz: 800 kHz, Pulsdauer: 8 ps, Wellenlänge: 1030 nm) mit einem Scannersystem Scanlab Hurryscan 15 (Brennweite: 57 mm, Spotdurchmesser im Fokus: 11 μ m) und einem Messkopf Precitec RB200050 gekoppelt. Das Messsystem basiert auf einem chromatischen Sensor, der Topografien bis zu einem Höhenunterschied von 3 mm mit einer Auflösung von 1 μ m erfasst. Zum Bewegen der Probe wird eine x/y/z-Verfahreinheit mit Schrittmotoren verwendet. Zentral gesteuert werden alle Prozesse und Messwert-erfassungen mit einem PC via der Software MathLab.

2. Abtragsverhalten

Jeder Werkstoff weist ein spezifisches Abtragsverhalten bei der Ablation mittels ps-Laserstrahlung auf. Der Volumenabtrag pro Puls als feste Basisgröße variiert dabei nicht nur mit veränderten Laserparametern wie Pulsenergie oder Frequenz. Ebenso sind die Ablenkgeschwindigkeit des Scannersystems, die Form des verwendeten Scannersystems sowie die Abmaße und das Aspektverhältnis der zu erzeugenden Struktur relevant. Zur Ermittlung erster Abtragsraten an acht Werkstoffen wurden standardisierte Felder von 1 x 1 mm² mit einem unidirektionalen Linienscan (Linienabstand 10 μ m, Scangeschwindigkeit 550 mm/s) bei einer

Pulsfolgefrequenz von 800 kHz verglichen (s. Abb. 1).

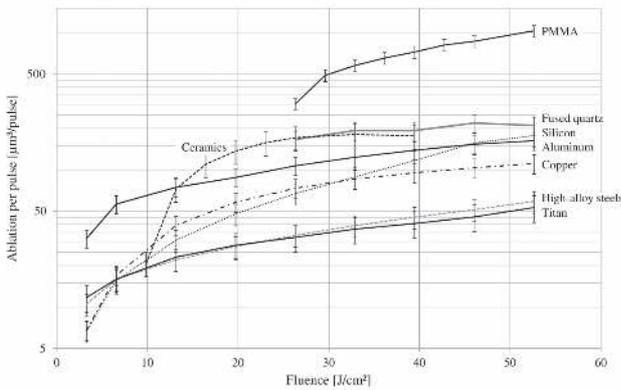


Abb. 1: Ermittelter Materialabtrag bei unterschiedlichen Energiedichten. Das Abtragsvolumen pro Puls steigt mit zunehmender Fluenz für alle acht untersuchten Werkstoffe bis zu einem charakteristischem Sättigungswert. Für Quarzglas und PMMA ist erst ab 25 J/cm² ein definierter Abtrag mittels nichtlinearer Absorption möglich.

Der Zuwachs am Volumenabtrag pro Puls mit steigender Fluenz verläuft für jeden Werkstoff unterschiedlich, teils „linear“ oder auch mit partiell überproportionalem Verhalten, jedoch niemals abfallend. Allgemein gilt, dass bei höheren Fluenzen der thermische Anteil am Ablationsprozess steigt, es kommt zur Bildung von Schmelzrückständen. Diese Parameter verbieten sich entsprechend für eine qualitative Bearbeitung. Eine Ausnahme bilden hier die transparenten Werkstoffe Quarzglas und PMMA, bei denen eine Energiedichte von mindestens 25 J/cm² für gute Qualitäten benötigt wird. Ab diesem Wert setzt mittels nichtlinearer Absorption ein definierter Materialabtrag ein.

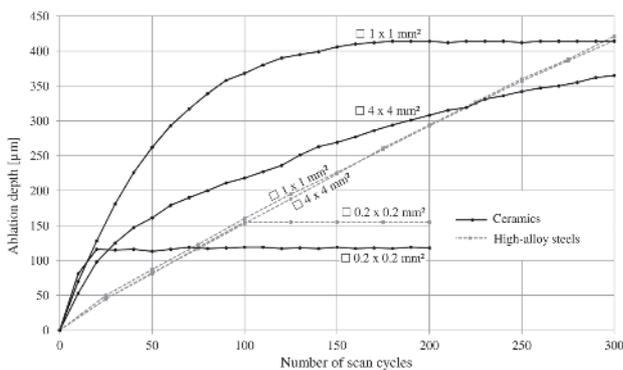


Abb. 2: Erreichte Abtragtiefe in Abhängigkeit der Anzahl an Scandurchläufen (Scanmuster 1 x 90°). Für hochlegierten Stahl ergibt sich keine Abhängigkeit, für Al₂O₃-Keramik ist hingegen die Strukturgröße besonders relevant. Strukturen mit 0.2 mm Kantenlänge stoppen in einer Tiefe von 120/150 µm durch das Zusammenlaufen der geneigten Flanken. Scangeschwindigkeit: 1100 mm/s, Pulsfolgefrequenz: 800 kHz, Energiedichte: 7 J/cm² (Stahl) und 12 J/cm² (Keramik).

Anders als bei der Erhöhung der Fluenz, kann eine Steigerung der Pulswiederholfrequenz sogar rückläufiges Verhalten aufweisen. Dieses wird

beispielsweise bei einem Vergleich der Abtragsrate pro Puls bei Kupfer und Al₂O₃-Keramik deutlich. Bei konstanter Scangeschwindigkeit sinkt der Abtrag pro Puls im Kupfersubstrat mit steigender Frequenz von 9.5 µm³/Puls bei 100 kHz auf 6.5 µm³/Puls bei 800 kHz. Die Erhöhung des Überlapps hat also kontraproduktive Auswirkungen. Höhere Frequenzen sollten, wenn möglich, durch schnellere Scangeschwindigkeiten kompensiert werden, um die maximale Leistung des Lasersystems nutzen zu können. Der Werkstoff Keramik verzeichnet diese Rückläufigkeit nicht, sondern weist sogar einen sprunghaften Anstieg zwischen 400 kHz (8.2 µm³/Puls) und 800 kHz (11 µm³/Puls) auf. Hierfür sind thermische Einflüsse durch lokalen Wärmeeintrag verantwortlich. Dieser Effekt wiederum ist unmittelbar an die gewählten Strukturgrößen gekoppelt. (Hier: Bearbeitungsfeld von 1 x 1 mm²).

Wie gravierend sich Strukturmaße auf das Abtragsverhalten auswirken können, zeigt ein Vergleich mit quadratischen Strukturen unterschiedlicher Kantenlänge 0.2/1.0/4.0 mm (Abb. 2). Bei identischen Bearbeitungsparametern (Pulsfolgefrequenz: 800 kHz, Scangeschwindigkeit: 500 mm/s, Scanmuster: 1 x 90°, Linienabstand: 10 µm, Energiedichte: 3,3 J/cm² (Stahl) und 13,2 J/cm² (Keramik)) wurde nach jeweils 10 Scandurchläufen die aktuell erreichte Tiefe ermittelt. Bei hochlegiertem Stahl stellt sich für alle Geometrien ein identisches Verhalten ein. Allerdings stoppt bei einer Tiefe von 150 µm der Abtrag im kleinsten Feld aufgrund des Aspektverhältnisses. Hier treffen die geneigten Flanken am Strukturgrund zusammen und verhindern einen weiteren Abtrag. Identisches Verhalten zeigt Keramik bereits bei 120 µm und der Kantenlänge 0.2 mm. Davon abgesehen weist Keramik aber kein einheitliches Bild auf. Der Abtrag sinkt bei größeren Strukturbreiten. Hier können erneut thermische Effekte geltend gemacht werden, da mit sich verkleinernden Strukturen jedes Flächenelement in einem kürzeren Zeitintervall erneut bestrahlt wird. Somit übt auch das gewählte Scanmuster Einfluss aus und ermittelte Abtragsraten gelten jeweils nur für einen speziellen Anwendungsfall. Allgemeingültige Aussagekraft lässt sich nur durch umfangreiche, systematische Untersuchungen realisieren. An dieser Stelle kann die Möglichkeit zur automatischen Vermessung generierter Strukturen und Durchführung ganzer Messreihen mittels des aufgebauten Systems hilfreich sein.

3. Grabenbildung und Flankenwinkel

Bei der Mikrostrukturierung mit UKP-Lasern können sich Gräben am Grund von Strukturkanten ausbilden und so lokal einen tieferen Abtrag generieren. Teilweise lässt sich dieses Verhalten auf eine unzureichende Synchronisation zwischen der Beschleunigung der Scannerspiegel und dem Einschalten des Lasers zurückführen und ggf. beseitigen. Daneben gibt es noch einen zweiten, wenig beeinflussbaren Faktor. Bei Werkstoffen,

welche die verwendete Laserwellenlänge gut reflektieren, wird während des Scanprozesses Laserlicht unterhalb der Strukturwände konzentriert. Dies ist insbesondere bei metallischen Werkstoffen der Fall. Die hier entstehenden Gräben können eine Tiefe bis zu 20 % der Strukturhöhe aufweisen (Abb. 3, links). An Substraten mit geringer oder diffuser Reflexion tritt dieser Effekt nicht auf. Vielmehr entstehen hier Verrundungen am Grund der Strukturflanken (Abb. 3, rechts).

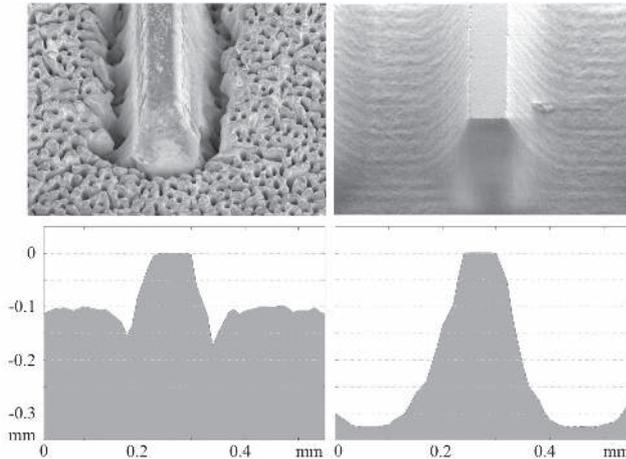


Abb. 3: Unterschiedliche Ausbildung von Stegstrukturen. Grabenbildung an hochlegiertem Stahl (links oben: REM-Bild, links unten: Gemessene Topografie im Querschnitt) ist ebenso möglich, wie eine starke Verrundung der Flanken an Al_2O_3 -Keramik (rechts). Scangeschwindigkeit: 1100 mm/s, Pulsfrequenz: 800 kHz, Energiedichte: 7 J/cm² (Stahl) und 12 J/cm² (Keramik), Scanmuster: 4 x 45°.

Wird die Tiefe der Grabenstruktur in Relation zur Strukturhöhe gesetzt, so zeigt sich, dass eine Variation der Fluenz keinen Einfluss hat. Höhere Pulsenergien beschleunigen den Materialabtrag gleichermaßen wie die Grabenbildung. Ebenso bewirkt eine Variation der Pulswiederholrate keine signifikante Veränderung. Die sukzessive Entstehung der Struktur nebst möglicher Grabenbildung wird gut veranschaulicht, wenn in Intervallen die Struktur vermessen und die Querschnitte gemeinsam dargestellt werden (Abb. 4). Wird linear polarisierte Strahlung genutzt, so ergeben sich Richtungsabhängigkeiten bei der Ausbildung der Grabenstrukturen. An Kanten parallel zur Polarisationsrichtung bilden sich ausgeprägtere Vertiefungen am Grund als an solchen quer dazu.

Die analysierten Werkstoffe bilden bei der Strukturierung überwiegend gerade Flanken unter einem Winkel von 75-80° aus. Lediglich bei Keramik kommt es zu einer deutlichen Konkavität und einem damit einhergehend geringen Winkel von 50°. Die ermittelten Werte sind weitgehend unabhängig von den gewählten Prozessparametern und können als werkstoffspezifisch erachtet werden. Generell ist die hohe Abweichung des Flankenwinkels von der Orthogonalen ein Problem, welches durch den Einsatz von Laserstrahlung mit

Gaußscher Energieverteilung sowie insbesondere durch den Scanprozess selbst herrührt.

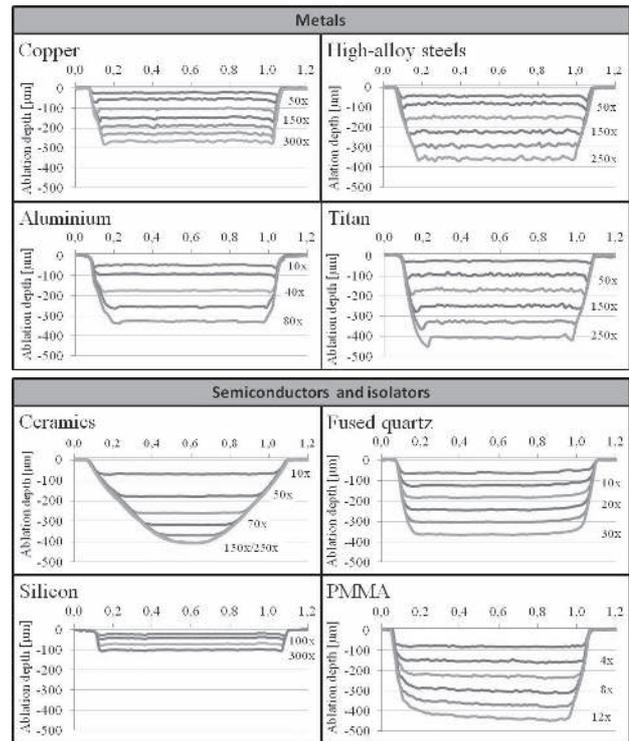


Abb. 4: Mit chromatischem Sensor ermittelte Topografie-Querschnitte. Durch Intervallmessung zwischen den Scandurchläufen wird die schrittweise Entstehung der Mikrostruktur (Quadrat, 1 x 1 mm²) in unterschiedlichen Werkstoffen sichtbar. Als Laserparameter wurden für den jeweiligen Werkstoff optimierte Energiedichten verwendet. (Scangeschwindigkeit: 1100 mm/s, Pulsfrequenz: 800 kHz, Scanmuster: 1 x 90°).

4. Substrukturen

Bei der Mikrostrukturierung können neben den unmittelbar geometrieverändernden Effekten weitere Beeinflussungen der Topografie durch die UKP-Laserbestrahlung auftreten. Durch Mehrfachreflexion, beginnend an kleinen Inhomogenitäten, kann Laserlicht eigenständig Mikrokanäle in das Substrat einbringen. Die Inhomogenitäten liegen dabei bereits als Mikrodefekt auf der Oberfläche vor oder werden durch Pulsüberlappung im Scanprozess hervorgerufen. Zuerst bilden sich kleine Vertiefungen, die sich zu Mikrokavitäten (\varnothing 5 – 20 µm) am Strukturgrund ausbilden. Durch zunehmende Vereinigung und die Ausbildung von Verbindungskanälen kommt es zu einer Erosion des Strukturgrunds (Abb. 3, links). Diese Substrukturen können bis zu 30 % des definierten Tiefenabtrags betragen. Form und Ausprägung sind parameter-spezifisch und treten nur bei einigen Werkstoffen auf. Im Rahmen dieser Studie waren dies hochlegierter Stahl, Titan und Silizium. Dimension und Form der Substrukturen lassen sich mit dem verwendeten Messsystem nur qualitativ erfassen und eine systematische Analyse fand an dieser Stelle nicht statt. Grundsätzlich können diese Modifikationen zur Erzeugung lokal funktionalisierter

Oberflächen verwendet werden und so z. B. hydrophobe Eigenschaften generiert werden /5/.

6. Zusammenfassung

Mikrostrukturierung mit UKP-Laserstrahlung kann einen sehr hohen Qualitätslevel erreichen, insbesondere wenn spezielle Fertigungstechniken genutzt werden können. Beim Einsatz einer Scanneroptik zur Mikrostrukturierung sinkt die Präzision mit zunehmender Abtragtiefe wie auch bei Verwendung höherer Fluenzen. Unerwünschte Nebeneffekte können die Strukturbildung beeinflussen und lassen sich nur bedingt unterdrücken oder reduzieren. Der erzielte Materialabtrag wird zudem von zahlreichen Faktoren beeinträchtigt und erschwert ebenso eine präzise Geometrieerzeugung. Mit einem adaptierten optischen Messsystem können diese Einflüsse systematisch analysiert werden. Hierüber ist eine genaue Berechnung vor der Bearbeitung möglich und es können im Rahmen der Möglichkeiten maßhaltige Strukturen ohne Erprobung generiert werden. Für höchste Ansprüche ist zudem eine in-situ-Kontrolle und selektive Nacharbeitung möglich.

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen des BMBF-Projektes „Mikrobearbeitung von

temperaturempfindlichen Bauteilen mit Ultrakurz-puls-Lasern“, Teilprojekt (A) - Einsatz von Piko-sekunden-Lasern - durchgeführt worden (Förder-kennzeichen: 17 70 B 09).

Literatur

- [1] J. Schiller, R. Ebert, H. Exner, et al.: Rapid micro processing with a high repetition rate ultra short fibre laser, Proc. 5th Int. WLT Conf. Lasers Manuf. 2009, pp.549-554
- [2] D. Breitting, A. Ruf, F. Dausinger: Fundamental aspects in machining of metals with short and ultra short pulses, Photon Processing in Microelectronics and Photonics III, Proc. Of SPIE Vol. 5339, pp. 49-63
- [3] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte et al.: Femtosecond, picoseconds and nanosecond laser ablation of solids, Appl. Phys. A 63, 109-115 (1996)
- [4] Weikert, M., "Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen," Dissertation, IFSW, Univ. Stuttgart (2005)
- [5] Wu, B., Zhou, M., Li, J., Ye, X., Li, G., Cai, L.: Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using femtosecond laser, Applied Surface Science 256, 2009. S. 61-66.

UNTERSUCHUNGEN ZUR SELEKTIVEN MAGNETISIERUNG VON SPINTRONISCHEN SCHICHTSYSTEMEN MITTELS LASERSTRAHLUNG

Isabel Berthold, Mathias Müller, Sascha Klötzer, Robby Ebert, Horst Exner
 Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

A spintronic layer system with a thickness of 32 nm was structured by use of a highly-repetitive femtosecond laser in order to generate separated areas. Subsequently the exchange bias field was switched in those areas under the influence of a laser beam and an external magnetic field. A new constructed measurement device with a spintronic magnetic field sensor was applied to investigate the influence of pulse peak intensity, pulse overlap and pulse duration on the orientation of the exchange bias field.

1. Einleitung

1988 wurde der Riesenmagnetowiderstand (engl. Giant Magnetic Resistance, GMR) durch Albert Fert [1] und Peter Grünberg [2] entdeckt. Inzwischen spielt der GMR-Effekt in der magnetischen Sensorik und damit unter anderem auf dem Gebiet der Automobiltechnik, des Maschinenbaus und der Speichermedien eine bedeutende Rolle.

Ein GMR-Schichtsystem besteht aus zwei ferromagnetischen Schichten, die durch eine dünne nichtmagnetische Zwischenschicht getrennt sind. In solchen Systemen ist der elektrische Widerstand abhängig von den relativ zueinander ausgerichteten Magnetisierungen der beiden ferromagnetischen Schichten. Wird einer der beiden ferromagnetischen Schichten eine feste Magnetisierungsrichtung aufgeprägt (hard/pinned layer), während sich die andere frei nach einem äußeren Magnetfeld ausrichten kann (free fayer), dann eignet sich das System als magnetischer Sensor. Das Festlegen einer Magnetisierungsrichtung kann durch die Kopplung der ferromagnetischen Schicht an eine anti-ferromagnetischen Schicht erfolgen. Wird eine solche Schichtverbindung von einer Temperatur oberhalb der sogenannten Blocking-Temperatur des Systems abgekühlt, während ein äußeres Magnetfeld anliegt, dann entsteht im Ferromagneten eine unidirektionale magnetische Anisotropie. D.h. der ferromagnetischen Schicht wird eine Vorzugsrichtung der Magnetisierung aufgeprägt, was sich in einer Verschiebung der Hysteresekurve des Ferromagneten um einen bestimmten Feldstärkebetrag äußert. Dieser Effekt wird als Austauschanisotropie oder Exchange Bias Effekt bezeichnet. Entsprechend wird der Feldstärkebetrag, um den die Hysterese verschoben wird, Exchange Bias Feld genannt. Beim Anlegen eines entgegengesetzt gerichteten Magnetfeldes mit einem Betrag kleiner als das Exchange Bias Feld wird die Magnetisierungsrichtung der gekoppelten ferromagnetischen Schicht daher nicht verändert [3] [4].

Für die Herstellung von GMR-Sensoren ist neben der Strukturierung solcher GMR-Schichtsysteme auch die selektive Festlegung der magnetischen Vorzugsrichtung der pinned layer von Bedeutung. Mittels hochrepetierender fs-Laserstrahlung wurden das GMR-Schichtsystem strukturiert und dabei isolierte Stege erzeugt. Diese Stege wurden mittels gütegeschalteter Laserstrahlung im Scanverfahren

erwärmt, wobei sich die Probe in einem externen Magnetfeld befand. Ziel war dabei die definierte selektive Neuorientierung der magnetischen Vorzugsrichtung der pinned layer und die Untersuchung des Einflusses von Pulsdauer, Pulsüberlapp und Spitzenintensität.

2. Versuchsanordnung

Das zu beeinflussende GMR-Schichtsystem war wie in Abb. 1 dargestellt aufgebaut. Die Gesamtdicke des spintronischen Schichtsystems betrug 32 nm. Dem Schichtstapel war bereits ein Exchange Bias Feld aufgeprägt.

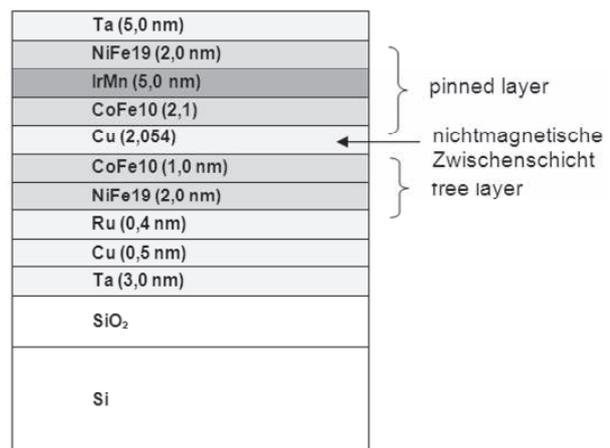


Abb. 1: GMR-Schichtsystem (TU Chemnitz, Professur Oberflächen- und Grenzflächenphysik)

Die Proben wurden mittels hochrepetierender fs-Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 1030 nm und einer Pulsdauer von 180 fs lateral strukturiert (Tab. 1). Dabei wurden für die Untersuchungen notwendige isolierte Stege mit Abmessungen von 200 x 500 μm^2 erzeugt.

Tab. 1: Laserparameter zur Strukturierung

Fokusradius (86%)	9,5 μm
Pulsspitzenfluenz	106 J/cm^2
Pulswiederholfrequenz	125 kHz
Pulsüberlapp	90%
Spurüberlapp	80%

Für die Umpolung der magnetischen Vorzugsrichtung war neben der Erwärmung auf eine Blocking-

Temperatur von 500 K ein externes Magnetfeld mit einer Flussdichte von mindestens 100 mT notwendig. Diese wurde durch einen Dauermagneten mit einer Grundfläche von 30 x 10 mm² bereitgestellt. Mithilfe einer kalibrierten Hallsonde wurde das Magnetfeld in dem Abstand zur Magnetoberfläche gemessen, in dem sich anschließend auch die Probe befand. Die Messung in Abb. 2 zeigte, dass die notwendige Magnetflussdichte von 100 mT auf einer Fläche von 26 x 6 mm² erreicht wird. Diese Fläche war ausreichend groß, um die Teststrukturen von je vier isolierten Stegen darin zu positionieren.

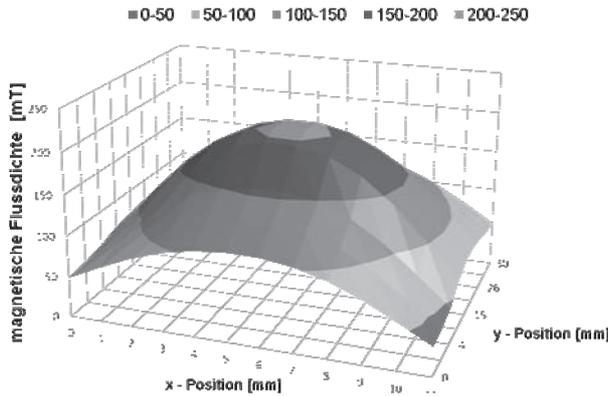


Abb. 2: Verteilung der magnetischen Flussdichte des Dauermagneten am Ort der Probe

Für die notwendige selektive Erwärmung auf die Blocking-Temperatur stand ein lampengepumpter Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm und einer cw-Leistung von 5 W zur Verfügung. Der Laser wurde gütegeschaltet betrieben, wobei die Pulsdauer durch Variation der Pulsfrequenz geändert werden konnte. Für die Untersuchungen wurden die Pulsdauern 58 ns ($f_p = 1$ kHz) und 160 ns ($f_p = 10$ kHz) verwendet. Der zeitliche Pulsverlauf konnte in guter Näherung als gaußförmig beschrieben werden.

Mit Hilfe einer Simulation des Temperaturfeldes wurde die notwendige Spitzenintensität zum Erreichen der Blocking-Temperatur in Abhängigkeit von der Pulsdauer auf 1,4 MW/cm² bei 160 ns bzw. 1,7 MW/cm² bei 58 ns abgeschätzt. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass es auch bei Applikation einer Frequenz von 10 kHz nicht zur Wärmeakkumulation kommt.

Der Laserstrahl wurde extern wahlweise durch eine oder zwei Keilplatten abgeschwächt, um eine ausreichend kleine mittlere Laserstrahlleistung von 0,3 mW bei 58 ns bzw. 6,7 mW bei 160 ns erreichen zu können. Er wurde mit einer F-Theta-Optik der Brennweite 80 mm auf einen Fokusradius von 13,4 μ m (86% Leistungseinschluss) fokussiert.

Mithilfe eines Galvanometerscanners wurden die isolierten Stege mit dem Laserstrahl und definiertem Pulsüberlapp bidirektional bestrahlt, während die Struktur dem äußeren Magnetfeld mit einer Mindestflussdichte von 100 mT ausgesetzt war. Das Magnetfeld war der bereits vorhandenen magnetischen

Vorzugsrichtung der Probe entgegengesetzt gerichtet, um eine Umpolung der Vorzugsrichtung zu bewirken. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 3 zu sehen.

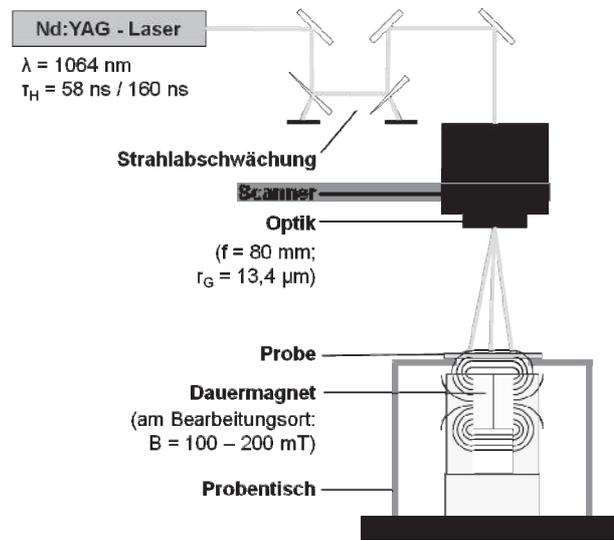


Abb. 3: Versuchsaufbau

Für die Messung der Magnetisierungsrichtung im GMR-Schichtstapel kam ein spintronischer Magnetfeldsensor mit einem Messbereich von ± 5 mT bei Auflösungen im μ T-Bereich zum Einsatz (Abb. 4, rechts). Durch eine Kalibrierung des Sensors mithilfe der Hallsonde wurden die aufgenommenen Widerstandswerte des Sensors in die entsprechenden Werte der magnetischen Flussdichte umgerechnet.

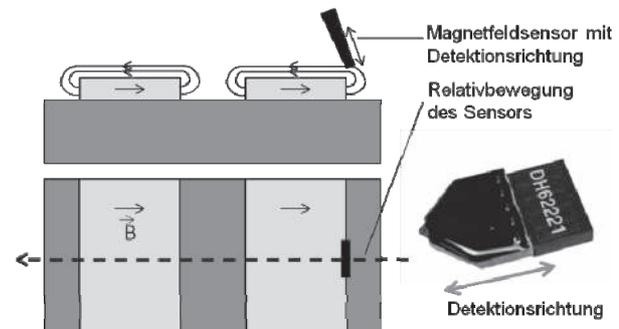


Abb. 4: links: Seitenansicht der Stege mit detektierbaren Magnetfeldlinien und Draufsicht mit eingezeichneter Relativbewegung des Sensors; rechts: spintronischer Magnetfeldsensor mit Detektionsrichtung

Die Messung erfolgte im Rastersondenverfahren. Da die Stege senkrecht zur Magnetisierungsrichtung der Probe erzeugt wurden, treten an den Strukturkanten Magnetfeldlinien senkrecht aus bzw. ein (Abb. 4, links). Die Stege wurden durch eine Relativbewegung parallel zur Magnetisierungsrichtung des spintronischen Schichtstapels abgerastert, wobei immer nach einer Strecke von 2,5 μ m ein Messwert aufgenommen wurde. Die Relativbewegung wurde durch piezoelektrische Linearachsen realisiert. Die an den Strukturkanten aus- und eintretenden Magnetfeldlinien lagen dabei in der Detektionsrichtung des Sensors (Bild 4, links). An

den Strukturkanten traten in den Messkurven daher positive und negative Peaks auf (Abb. 5), wobei die Maxima auf austretende und die Minima auf eintauchende Magnetfeldlinien hinwiesen. Auf diese Weise war die qualitative Bestimmung der Magnetisierungsrichtung in den Stegen möglich.

In den Untersuchungen wurden die Laserparameter Pulsdauer, Pulsüberlapp und Pulsspitzenintensität in den in Tab. 2 aufgeführten Bereichen variiert.

Tab. 2: Variation der Laserparameter

Pulsdauer	Pulsüberlapp	Pulsspitzenintensität
58 ns	30%	0,9 MW/cm ² – 7,6 MW/cm ²
160 ns	50%	0,45 MW/cm ² – 4,2 MW/cm ²
	70%	

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen zeigten, dass die Magnetisierung der Stege und damit das Exchange Bias Feld ab einer bestimmten Intensität zunächst stark abgeschwächt wurden bis schließlich keine Magnetisierung mehr detektiert werden konnte (Abb. 6). Erst ab einer höheren Intensität wurde die magnetische Vorzugsrichtung im Schichtstapel umgepolt, was an einer umgekehrten Reihenfolge der Maxima und Minima an den Stegkanten erkennbar war (Abb. 7). Als Ursache für die Abschwächung der Magnetisierung bei kleineren Intensitäten wurde vermutet, dass es zunächst zur Aufhebung der antiferromagnetischen Kopplung einiger Domänen im pinned layer kommt. Mit steigender Intensität und Temperatur werden schließlich erste Domänen umgepolt, während andere noch in der ursprünglichen Richtung verharren. Ab einer bestimmten Intensität kompensieren sich die beiden Magnetisierungsrichtungen, so dass keine Magnetisierung mehr detektiert werden konnte. Bei ausreichend hohen Intensitäten werden letztlich alle Domänen umgepolt und es kann eine umgekehrte Magnetisierung detektiert werden. Diese Annahmen konnten durch Messungen mittels Kerr-Magnetometrie bestätigt werden.

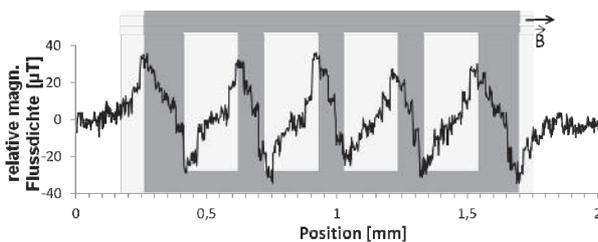


Abb. 5: Messkurve der relativen magnetischen Flussdichte über der Struktur vor der Laserstrahl-Modifikation

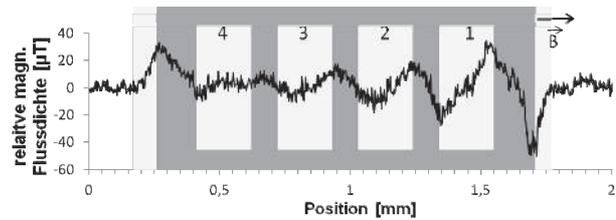


Abb. 6: Messkurve der relativen magnetischen Flussdichte über der Struktur nach der Modifikation mit Laserstrahlung mit Pulsdauer 58 ns, Pulsüberlapp 30% und den Intensitäten: 1: 3,0 MW/cm², 2: 3,7 MW/cm², 3: 4,4 MW/cm², 4: 5,1 MW/cm²

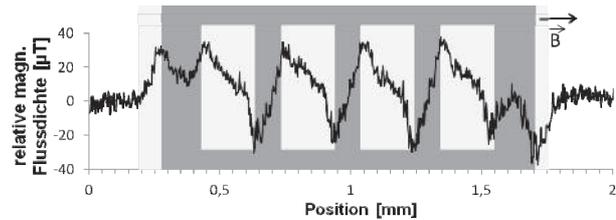


Abb. 7: Messkurve der relativen magnetischen Flussdichte über der Struktur nach der Modifikation mit Laserstrahlung mit Pulsdauer 58 ns, Pulsüberlapp 30% und der Intensität 6,9 MW/cm²

In Abb. 8 und 9 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Laserstrahl-Modifikation der magnetischen Vorzugsrichtung mit den Pulsdauern 58 ns und 160 ns dargestellt. Darin wird deutlich, dass die Intensitätsschwellen, ab denen es zur Abschwächung, zur Auslöschung bzw. zur Neuorientierung der magnetischen Vorzugsrichtung in den Stegen kommt, für die kürzeren Pulse deutlich größer als für die längeren Pulse waren.

In [4] und [5] wurde bereits diskutiert, dass das Exchange Bias Feld bei der Beeinflussung mittels zu kurzer Laserstrahlungspulse nicht vollständig umgepolt werden kann. Die für den zeitlichen Temperaturanstieg verantwortliche Intensität kann nur bis unter den Wert für die Abtragschwelle erhöht werden, da sonst die Schicht zerstört würde. Aufgrund der Kürze der Laserstrahleinwirkung kann es somit sein, dass die Haltezeit oberhalb der Blocking-Temperatur zu kurz ist oder diese gar nicht erreicht wird.

Auch bei unseren Ergebnissen war zu vermuten, dass eine zu kurze Pulsdauer die Ursache für die höheren benötigten Intensitäten bei den kürzeren Pulsen war. Offenbar war die Temperaturhaltezeit bezogen auf die notwendigen 500 K bei gleicher Intensität wie den Pulsen mit einer Dauer von 160 ns zu kurz, um eine Neuausrichtung des Exchange Bias Feldes zu ermöglichen. Mit höheren Laserstrahlintensitäten werden jedoch höhere Temperaturen und eine kürzere Aufheizphase erreicht, sodass das System längere Zeit einer Temperatur oberhalb der Blocking-Temperatur ausgesetzt ist. Damit war eine Umpolung des Exchange Bias Feldes wieder möglich. Mit einem Pulsüberlapp von 30% gelang die Neuorientierung der magnetischen Vorzugsrichtung ab einer Pulsspitzenintensität von 6,9 MW/cm² und mit 50% Pulsüberlapp ab einer Spitzenintensität von

3,7 MW/cm². Bei einem größeren Pulsüberlapp von 70% funktionierte der Ausgleich der kurzen Pulsdauer durch höhere Intensitäten jedoch nicht. Als Ursache hierfür werden die stärkeren Diffusionsvorgänge bei den benötigten höheren Temperaturen vermutet. Bei großem Pulsüberlapp kann die Teilchendiffusion von Puls zu Puls fortschreiten, da die bestrahlten Bereiche mehrmals von Laserpulsen getroffen werden, und zum Funktionsverlust des Schichtstapels führen.

Unter Verwendung der Pulsdauer 160 ns und einem Pulsüberlapp von 50% wurde das Exchange Bias Feld bereits ab einer Spitzenintensität von 2,1 MW/cm² neuorientiert. Mit einem Pulsüberlapp von 70% waren nur 1,3 MW/cm² notwendig.

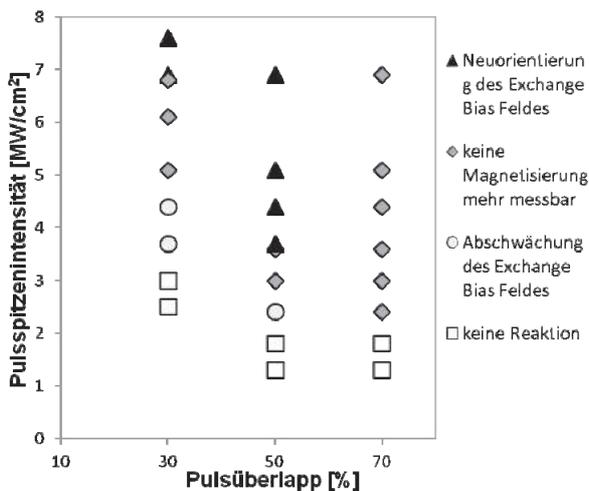


Abb. 8: Ergebnisse der Untersuchungen zur Laserstrahl-Modifikation des Exchange Bias Feldes in Abhängigkeit von Spitzenintensität und Pulsüberlapp mit einer Pulsdauer von 58 ns

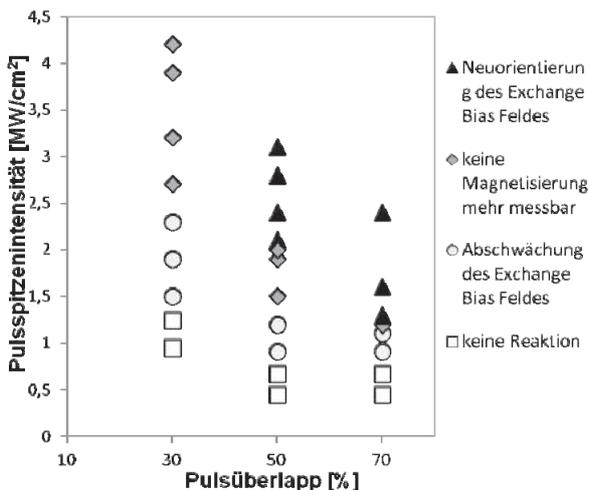


Abb. 9: Ergebnisse der Untersuchungen zur Laserstrahl-Modifikation des Exchange Bias Feldes in Abhängigkeit von Spitzenintensität und Pulsüberlapp mit einer Pulsdauer von 160 ns

4. Zusammenfassung und Ausblick

In den Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Bestimmung der Magnetisierungsrichtung in den isolierten Stegen durch Messung mithilfe eines spintronischen Magnetfeldsensors im Rastersondenverfahren möglich ist. Die aus diesen Messungen geschlussfolgerten Ergebnisse konnten durch Kerr-Magnetometrie bestätigt werden. Zur Verbesserung des Messsystems wird zukünftig eine spezielle Messschaltung angewandt, die eine höhere Frequenz bei der Messwertaufnahme erlaubt.

Für die Modifizierung der magnetischen Vorzugsrichtung mittels im Scanverfahren eingesetzter gütegeschalteter Laserstrahlung wurden erste Parametergrenzen ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass durch eine längere Pulsdauer die notwendige Spitzenintensität gesenkt werden konnte. Weitere Untersuchungen zur Modifizierung mit schnell gescannter kontinuierlicher Laserstrahlung sind geplant.

Die Versuche wurden an isolierten Stegen mit einer Breite von 200 µm durchgeführt und damit die Selektivität des Verfahrens gezeigt. Im Hinblick auf die angestrebte Anwendung in Sensorsystemen sind perspektivisch weitere Untersuchungen zur Minimierung der Strukturgröße notwendig.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden dankenswerterweise aus Mitteln der Europäischen Union (Europäischer Fond für regionale Entwicklung – EFRE) und des Freistaates Sachsen im Rahmen des Projektes „Erzeugung und Untersuchung spintronischer Schichtsysteme – Spintronik“ finanziert. Die Autoren danken weiterhin der AG Albrecht am Institut für Physik der TU Chemnitz für die sehr gute Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- [1] M. N. Baibich et al., Giant Magnetoresistance of (001)Fe / (001)Cr Magnetic Superlattices, Phys. Rev. Lett., Vol. 61, No. 21, 1988.
- [2] G. Binasch et al., Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange, Phys. Rev. B, Vol. 39, No. 7, 1989.
- [3] Andreas Hochstrat, Extrinsische Kontrolle des Exchange Bias in Metall-Isolator Heteroschichtstrukturen, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2007.
- [4] Andreas Paetzold, Thermische Stabilität und Modifizierung der magnetischen Austausch-anisotropie in Schichtsystemen, Universität Kassel, Dissertation, 2002.
- [5] Andrew Johnson, Spin Valve Systems for Angle Sensor Applications, Universität Darmstadt, Dissertation, 2003.

LASERPULSABSCHIEDUNG VON METALLISCHEN SCHICHTSTAPELN

Johannes Maus¹, Steffen Weißmantel¹, Günter Reißer²

¹ Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

² Laserinstitut Mittelsachsen e.V., Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Die Ergebnisse von grundlegenden Untersuchungen zur Erzeugung von metallischen Schichten und Nanometerschichtstapeln mittels Laserpulsabscheidung werden vorgestellt. Für die Erzeugung des schichtbildenden Teilchenstromes wurde ein KrF-Excimerlaser mit einer Wellenlänge von 248 nm verwendet. Durch Variation der Abscheidungsparameter wurden die Oberflächeneigenschaften von dünnen Metallschichten für die Erzeugung von spintronischen Schichtstapeln optimiert. Die Abhängigkeit der Schichtaufwachsrate, der Oberflächenrauigkeit und der Partikulatflächendichte von der Laserpulsfluenz bzw. der Schichtdicke wird vorgestellt. Unter Nutzung der optimierten Prozessparameter konnte ein metallischer Schichtstapel mit Bottom Spin-Valve Layout und scharfen Grenzflächen bei niedrigen Grenzflächenrauigkeiten von unter 3,2 nm bei 10 Subschichten mit Dicken zwischen 5 und 50 nm hergestellt werden.

1. Einleitung

Durch den permanent wachsenden Bedarf der Datenmengenspeicherung im kommerziellen Marktumfeld wie auch in der klassischen Informationstechnologie werden immer höhere Anforderungen an neue Speichertechnologien bezüglich Speicherkapazität und Datenmengenverarbeitungsgeschwindigkeit gestellt. Die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstandes (engl. giant magnetoresistance, GMR) [1,2] sowie Entwicklung und Realisierung von GMR-Leseköpfen bis zum technischen Einsatz ermöglichte eine große Erhöhung der Speicherdichte. Ein vielversprechender Anwendungsbereich des GMR-Effektes ist neben der Sensorik der Einsatz von magnetoresistiven Systemen als magnetische Arbeitsspeicher (Magnetic Random Access Memory, MRAM). Entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen und etablierten Speichertechnologien sind vor allem die nicht flüchtige Informationsspeicherung und die hohe Geschwindigkeit verbunden mit einer hohen Integrationsdichte. Aktuelle Untersuchungen im Bereich der Spinelektronik beschäftigen sich mit der Forschung an metallischen Schichtstrukturen, z.B. im Bereich der GMR-Sensoren. Das Ziel ist dabei, die Entwicklung neuer Schichtstrukturen mit größeren GMR-Effekten, die Verbesserung der Prozesstechnologien für die Schichtabscheidung und das Designen von neuen Sensorsystemen für unterschiedliche Applikationen. Die für die Erzeugung der spintronischen Schichtstapel besonders relevanten Vorteile sind dabei speziell das für das PLD-Verfahren in weiten Parameterbereichen charakteristische atomlagenweise (layer-by-layer) Wachstum von Schichten. Damit ist es möglich, die Abscheidung von sehr dünnen geschlossenen und dichten Schichten mit Dicken von wenigen Monolagen zu realisieren, wie Dietsch [3] schon erfolgreich nachweisen konnte.

2. Methoden

Für grundlegende Untersuchungen der Schichtaufwachs- und Abtragsraten pro Laserpuls sowie der mittleren Schichtoberflächenrauigkeit und Partikulatdichte werden 300 bis 700 nm dicke Schichten auf Silizium-Substraten ohne Relativbewegung zwischen ablatierten Teilchen und Substrat abgeschie-

den. Im Anschluss an die Voruntersuchungen besteht das Ziel, bei optimierten Beschichtungsparametern die Substrate schichtdickenhomogen zu beschichten. Um dies zu ermöglichen wird eine Relativbewegung zwischen dem ablatierten Teilchenstrom und dem Substrat mittels eines in die Beschichtungskammer integrierten Substrat-Bewegungssystems realisiert. Ausgehend von einer 100 nm dicken Metallschicht, bei welcher der Schichtdickenverlauf mit einem Oberflächenprofilometer in der x- und y-Richtung ausgemessen wurde, kann durch Variation der Repetitionsrate f und der ermittelten Abscheidungsrate pro Laserpuls eine definierte Schichtdicke eingestellt werden. Die so erzeugten 10 nm dicken Einzelschichten und Schichtstapel werden auf $35 \times 20 \text{ mm}^2$ großen Si-(111)- bzw. SiO_2 -Substraten abgeschieden. Um die Strahlungsverluste für die Abscheidung von mehreren Schichtstapeln in Folge einer Innenbeschichtung des Einkoppelfensters gering zu halten, wird nach jeder zweiten Subschicht eine Fensterreinigung durch Argon-Ionenbeschuss durchgeführt. Das abgeschiedene Schichtsystem entspricht dem eines Spin-Ventil-Systems mit Bottom Spin-Valve Layout:

Substrat / Ta (5 nm) / NiFe₁₉ (2 nm) / IrMn (5 nm) / CoFe₁₀ (2,1 nm) / Cu (2,054 nm) / CoFe₁₀ (1 nm) / NiFe₁₉ (2 nm) / Ru (0,4 nm) / Cu (0,5 nm) / Ta (3,0 nm).

3. Experimenteller Aufbau

Die Ablation der Metalltargets erfolgt unter Verwendung des KrF-Excimerlasers LPX Pro 305 ($\lambda = 248 \text{ nm}$, Pulsdauer 25 ns, max. Pulsenergie 1200 mJ) der Firma Coherent GmbH bei einer maximalen Repetitionsrate von 50 Hz. Durch die Variation des Laserstrahlquerschnittes A auf dem Target zwischen 2,3 und 6,4 mm^2 kann die Laserpulsfluenz im Bereich von 2,2 bis 13 J/cm^2 eingestellt werden. Für die Beschichtung von verschiedenen Targets ist ein 6-facher Targetwechsler in den Rezipienten integriert (Abb. 1). Das Target wird bei stehendem Laserstrahl spiralförmig mit konstanter Vektorgeschwindigkeit bewegt, wobei der Laserstrahl unter einem Einfallswinkel von 45° auf das Target trifft. Eine Vorreinigung der Substrate ist durch Argon-

Ionenbeschuss mit einer Kaufmann-Ionenquelle möglich. Der Basisdruck im Rezipienten beträgt stets weniger als 10^{-4} Pa.

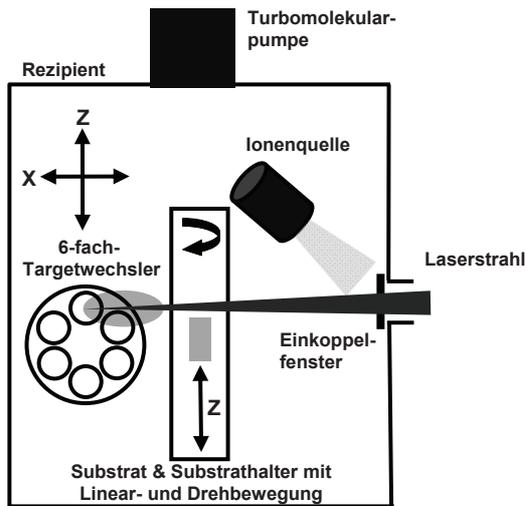


Abb. 1: Experimenteller Aufbau.

4. Ergebnisse und Diskussion

Für alle untersuchten Metalle sind in Abb. 2 die Abtragsraten pro Laserpuls vom Target in Abhängigkeit von Laserpulsfluenz bei Beschuss des Targets mit 350 Laserpulsen, einer Repetitionsrate von 1 Hz und einem Laserstrahlquerschnitt von $2,3 \text{ mm}^2$ in Abhängigkeit der Laserpulsfluenz dargestellt. Erhöht man die Laserpulsfluenz bei konstantem Laserstrahlquerschnitt, so erhöht sich auch der Energieeintrag im Material, wodurch mehr Teilchen mit höherer kinetischer Energie vom Target ablatiert werden. Zwischen Abtragsrate pro Laserpuls und Laserpulsfluenz besteht ein logarithmischer Zusammenhang.

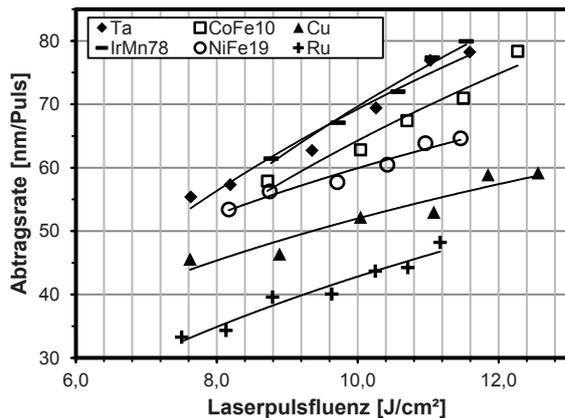


Abb. 2: Abtragsraten pro Puls in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz bei konstantem Laserstrahlquerschnitt und konstanter Repetitionsrate ($A = 2,3 \text{ mm}^2$, $f = 1 \text{ Hz}$).

In Tab. 1 sind die experimentell ermittelten Schwellfluenzen bei der verwendeten Laserwellenlänge von $\lambda = 248 \text{ nm}$ zusammengefasst. Vergleichbare Angaben wurden für die untersuchten Übergangsmetalle in der Literatur nicht gefunden, jedoch

wird in [4] ein Bereich für die Abtragsschwellen von Übergangsmetallen zwischen 1 und 2 J/cm^2 angegeben.

Tab. 1: Abtragsschwellen der untersuchten Materialien bei $\lambda = 248 \text{ nm}$ für 350 Einzelpulse und $A = 2,3 \text{ mm}^2$.

Material	Schwellfluenz [J/cm²]
Ta	3,0
CoFe ₁₀	3,3
Cu	1,7
Ru	3,0
IrMn ₇₈	3,6
NiFe ₁₉	1,6

Die Schichtaufwachsrate wurde für jedes Material unter Variation der Laserpulsfluenz bei $A = 2,3 \text{ mm}^2$ (Abb. 3) bestimmt. Die minimal und maximal erreichbaren Schichtaufwachsrate lagen in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz zwischen 15 (Cu) und 163 nm/min (Ta).

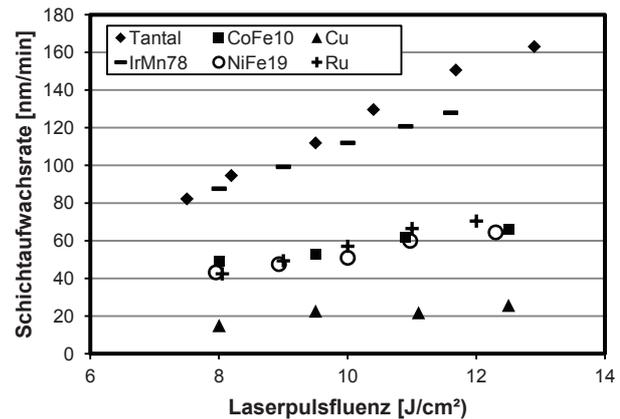


Abb. 3: Schichtaufwachsrate in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz bei konstantem Laserstrahlquerschnitt und konstanter Repetitionsrate ($A = 2,3 \text{ mm}^2$, $f = 50 \text{ Hz}$).

Für eine Schichtabscheidung bei optimierten Parametern ($8-10 \text{ J/cm}^2$) und einer Substratfläche von 7 cm^2 wurden folgende Schichtaufwachsrate ermittelt: Ta: 95 nm/min ; CoFe₁₀: 49 nm/min ; Cu: 15 nm/min ; IrMn₇₈: 100 nm/min ; NiFe₁₉: 51 nm/min ; Ru: 49 nm/min . Unter Berücksichtigung der Repetitionsrate von $f = 50 \text{ Hz}$ ergaben sich für die untersuchten Metalle mittlere Schichtdickenzunahmen pro Puls von $0,05$ bis $0,32 \text{ \AA}$. Da die mittlere Schichtdickenzunahme pro Laserstrahlpuls weniger als dem 3 bis 20-fachen einer Atomlage entspricht, ist eine exakte Einstellung der Schichtdicke über die regelbare Pulszahl des Lasers möglich. Die mittlere Oberflächenrauigkeit in Abb. 4 wurde für jedes Material in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz bei konstantem Laserstrahlquerschnitt von $A = 2,3 \text{ mm}^2$ zwischen 8 und 13 J/cm^2 bestimmt.

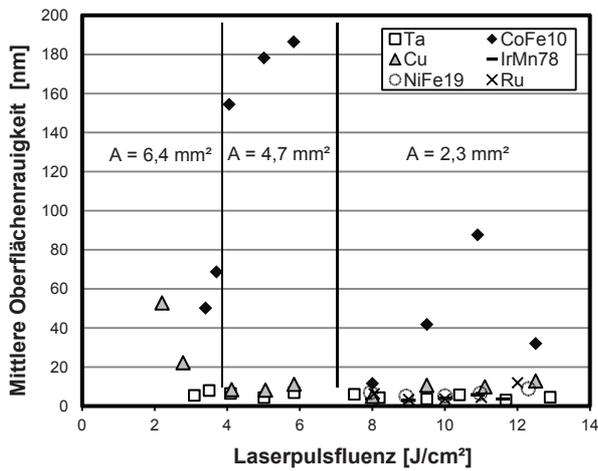


Abb. 4: Mittlere Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz und des Laserstrahlquerschnittes von $A = 6,4 \text{ mm}^2$, $A = 4,7 \text{ mm}^2$ und $A = 2,3 \text{ mm}^2$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Für die Metalle Ta, Cu sowie CoFe_{10} wurde die mittlere Oberflächenrauigkeit zusätzlich unter Variation des Laserstrahlquerschnittes und der Laserpulsfluenz, bei $A = 4,7 \text{ mm}^2$ zwischen 4 und $5,8 \text{ J/cm}^2$ bzw. bei $A = 6,4 \text{ mm}^2$ zwischen $2,2 \text{ J/cm}^2$ und $3,7 \text{ J/cm}^2$, experimentell ermittelt (Abb.4). Bei Nutzung eines konstanten Laserstrahlquerschnittes nehmen die mittleren Schichtoberflächenrauigkeiten tendenziell mit steigender Laserpulsfluenz mit Ausnahme von Tantal und Kupfer bei $A = 6,4 \text{ mm}^2$ zu. Ein optimaler Laserpulsfluenz-Bereich wurde für Ta, Cu, CoFe_{10} , Ta, Ru und IrMn_{78} zwischen 8 und 9 J/cm^2 und für NiFe_{19} bei 10 J/cm^2 bestimmt. Oberflächenprofilometermessungen mittels DEKTAK ergaben an 300 bis 700 nm dicken Schichten mittlere Oberflächenrauigkeiten zwischen 4 und 12 nm in Abhängigkeit vom Schichtmaterial. Einen bedeutenden Einfluss auf die mittlere Oberflächenrauigkeit der Schichten haben die in den mittels PLD abgeschiedenen Schichten enthaltenen Partikulate, die durch den Beschuss der Targetoberfläche mittels Laserpulsen neben den schichtbildenden Teilchen emittiert werden. Die Partikulatflächendichte, das heißt die prozentuale mit Partikulaten besetzte Schichtfläche, die auf einer Schichtfläche von $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ für jedes Material mittels Digitalmikroskop ermittelt wurde, lag im Bereich von 0,1 (Ta) bis 5,8 % (CoFe_{10}) für Laserpulsfluenzen zwischen 8 und 12 J/cm^2 .

In Abb. 5 ist die Partikulatflächendichte beispielhaft für CoFe_{10} und Cu für einen konstanten Laserstrahlquerschnitt sowie verschiedene Fluenzen dargestellt. Generell ist festzustellen, dass die Partikulatflächendichte aufgrund der Partikulatakkumulation nahezu linear mit steigender Schichtdicke zunimmt. Bei optimierten Prozessparametern ergaben sich für spintronische Anwendungen benötigte dünne Schichten in Abb. 6 sehr niedrige Partikulatflächendichten zwischen 0,02 % (Ta, Ru) und 0,15 % (IrMn_{78}). Die Partikel­flächendichte des aus zehn Subschichten aufgebauten Metallschichtstapels mit einer Gesamtdicke von 23 nm in Abb. 6 wird daher vor allem durch die erhöhte Bedeckung

der Schichtoberfläche mit Partikulaten bei den Subschichten Cu, CoFe_{10} und IrMn_{78} verursacht. Mittels REM konnten an 10 nm dicken Schichten nur vereinzelt Partikulate nachgewiesen werden. Ob diese Partikulate, deren Größe allgemein im Bereich weniger 100 nm und teilweise im Mikrometerbereich liegen, für die spintronischen Bauelemente störend wirken, müssen nachfolgende Untersuchungen noch zeigen.

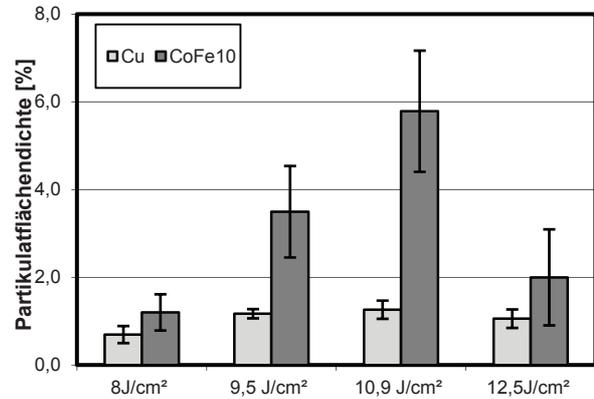


Abb. 5: Mittlere Partikulatflächendichte (10 Messungen) von CoFe_{10} und Cu in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz für ($A = 2,3 \text{ mm}^2$, Dicke: 300 bis 500 nm).

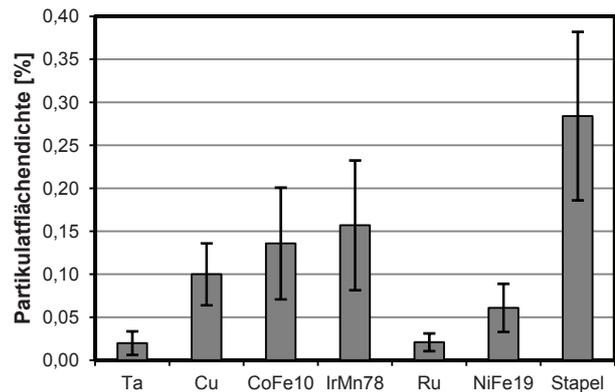


Abb. 6: Mittlere Partikulatflächendichte (10 Messungen) für Metallschichten ($d = 5 \text{ nm}$ für Ta, Cu, CoFe_{10} und $d = 10 \text{ nm}$ für IrMn_{78} , Ru, NiFe_{19}) und Metallschichtstapel (Dicke: ca. 23 nm, 10 Subschichten) bei optimalen Prozessparametern ($A = 2,3 \text{ mm}^2$, Fluenz: 8-10 J/cm^2).

Ein GMR-Effekt bei einem Spin-Valve ist nur dann messbar, wenn die vorgegebenen Dicken der Metallschichtstapel exakt eingehalten werden und die Grenzflächen eine geringe Oberflächenrauigkeit besitzen. Um die Grenzflächenrauigkeit eines PLD-Metallschichtstapels zu bewerten, wurde eine Probe nach Vorgabe des in Kapitel 2 beschriebenen Spin-Valve mit 10-fach größerer Subschichtdicke hergestellt. In Abb. 7 ist die TEM-Analyse eines Querschnittpräparates, abgedünnt mittels Ionenstrahlätzen, dargestellt. Aufgrund des zu geringen Bildkontrastunterschiedes der Schichten 4 bis 7 fanden im Rahmen der Untersuchungen zusätzlich EDX-Punktmessungen statt. In Tab. 2 sind die ermittelten Peak-to-Valley Grenzflächenrauigkeiten R_{pv} dargestellt. Die Rauigkeit des SiO_2 -Substrates beträgt $R_{pv} = 1 \text{ nm}$.

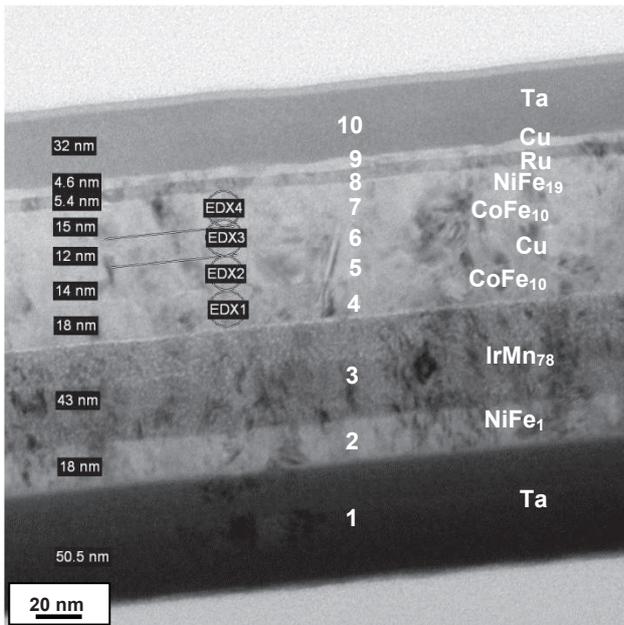


Abb. 7: TEM-Aufnahme im Hellfeld eines Metallschichtstapels im Querschnittsprofil mit 10-fach größerer Subschichtdicke.

Tab. 2: Grenzflächenrauigkeiten R_{pv} des Metallschichtstapels in Abb. 7 mit einer Gesamtdicke von 212,5 nm (Messfehler +/- 1 nm).

Metallstapel	R_{pv} [nm]
Ta	1,8
Cu	2,6
Ru	2,3
NiFe ₁₉	2
CoFe ₁₀	nicht bestimmbar
Cu	3,2
CoFe ₁₀	2
IrMn ₇₈	< 1
NiFe ₁₉	1,5
Ta	1

Der PLD-abgeschiedene Metallstapel in Abb. 7 weist scharfe Schichtgrenzflächen auf, wobei die Messergebnisse der Grenzflächenrauigkeiten gut mit den Grundlagenuntersuchungen bzgl. der mittleren Oberflächenrauigkeit und der Partikulatflächendichte der Einzelschichten korrelieren. Die Grenzflächenrauigkeit von Cu kann durch Absenkung der Laserpulsfluenz bzw. der mittleren kinetischen Energien der schichtbildenden Teilchen für die ersten 2 bis 4 nm einer aufwachsenden Metallschicht verringert werden [6]. Durch Schichtabscheidung in einer Inertgasatmosphäre (0,04 mbar für Ar, 0,4 bar für He) ist es ebenfalls möglich, die Grenzflächenrauigkeit von NiFe₁₉ zu optimieren [5]. Die derzeit

auffretende Beeinflussung der Schichtaufwachsrates durch die Verunreinigung des Einkoppelfensters kann zukünftig durch eine permanente Fensterreinigung mittels einer separaten Ionenquelle verhindert werden. Die exakte Einhaltung der vorgegebenen Subschichtdicken ist mittels In-situ-Schichtdickenmessung möglich. Des Weiteren besteht bei dem genutzten Substratbewegungssystem noch Optimierungspotential, da die einzelnen Schichtstapel eine Schichtdickenabweichung von derzeit 10 % aufweisen. Die untersuchten Metallschichten in Abb. 7 sind mit Ausnahme von Tantal polykristallin, wobei an der obersten Kupfer-Schicht nicht kristalline Bereiche zu beobachten sind. Ein eindeutiges kolumnares Kristallwachstum konnte nicht festgestellt werden. Ob es an den Grenzflächen Diffusionsbereiche gibt, lässt sich wegen der zu geringen Subschichtdicke nicht eindeutig mittels EDX-Messungen bestimmen, da die Größe des Elektronenstrahldurchmessers immer auch zur Anregung benachbarter Bereiche führt, welche ebenfalls detektiert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnten mittels PLD-Verfahren bei geeigneten Prozessparametern metallische Schichten und Schichtstapel mit Bottom Spin-Valve Layout erzeugt werden. Als günstige Prozessparameter haben sich ein Laserstrahlquerschnitt von 2,3 mm² und eine Laserpulsfluenz zwischen 8 und 10 J/cm² erwiesen. Die mittleren Schichtdickenzunahmen pro Puls lagen zwischen 0,05 und 0,32 Å, womit metallische Schichtstapel mit scharfen Grenzflächen und Grenzflächenrauigkeiten von unter 3,2 nm erreicht werden konnten. Um die Laserpulsfluenzen auf der Targetoberfläche künftig konstant zu halten, soll eine Fensterreinigung durch eine separate Ionenquelle in den Rezipienten implementiert werden. Um die Schichtdickenhomogenität der Metallschichten weiter zu verbessern, finden derzeit Untersuchungen zur Schichtdickenverteilung mit einem optimierten Substratbewegungssystem statt, das zukünftig die Herstellung von GMR-Schichtsystemen auf 4 Zoll-Substraten ermöglichen soll.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Finanzierung des Projektes aus den Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen.

Literaturverzeichnis

- [1] M.N. Baibich et al., Phys. Rev. Lett. **61** (1988), 2472
- [2] G.Binasch et al., Phys. Rev. B **39** (1989), 4828
- [3] R. Dietsch et al., Appl. Surf. Sci. **127-129** (1998) 451
- [4] J. Shen et al., Surf. Sci. Rep. **52** (2004), 163
- [5] T. Scharf et al., J. Appl. Phys. **94** (2003), 4273
- [6] M. Krieger et al., Appl. Phys. A **78** (2004) 327

ANWENDUNG VON TA-C SCHICHTEN BEI DER SPANENDEN BEARBEITUNG

Stefan Scholze, Eckhard Wißuwa, Katja Günther, Steffen Weißmantel
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Um die Zerspaltung von verstärkt eingesetzten Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen und Aluminium im Automobilbau und der Luft- und Raumfahrt trotz steigender Rohstoffpreise für Werkzeuge weiterhin wirtschaftlich zu gestalten, sind neue Werkzeugkonzepte notwendig. Die Funktionsschicht ta-C (tetraedisch amorpher Kohlenstoff) läßt sich als neue Werkzeugschicht zur Lösung spezifischer Herausforderungen einsetzen. Die durchgeführten Einsatzuntersuchungen zum Spanungsverhalten erfolgten an der Aluminiumgusslegierung AlSi12(Cu) mit ta-C beschichteten Bohr- und Fräs Werkzeugen. Die mittels PLD-Verfahren (Pulsed Laser Deposition) bei unter 100°C abgeschiedenen ta-C Schichten ermöglichen es sowohl Schnellarbeitsstahl als auch Hartmetall ohne Beeinflussung des Grundgefüges prozesssicher zu beschichten. Auf Grund der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von tetraedisch amorphen Kohlenstoffschichten zeigte sich, dass mit ta-C beschichteten Werkzeugen aus Schnellarbeitsstahl und Hartmetall höhere Schnittwerte und Standmengen erreichbar sind.

1. Einleitung und Zielstellung

Die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe stellen bei der spanenden Bearbeitung differenzierte Anforderungen an die Werkzeuggestaltung. Zur Gewährleistung einer wirtschaftlichen Fertigung ist daher das Werkzeug, die Bearbeitungsstrategie und -parameter dem Werkstück anzupassen.

Der Einsatz neuer Werkstoffe zur Bewältigung gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Herausforderungen, bspw. zur CO₂-Reduktion, kann durch Gewichtsreduktion mit dem Einsatz von Werkstoffen wie kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, Aluminium-Legierungen und hochfesten Stahlsorten erreicht werden. [1, 2, 3]

Die Zerspaltung von Nichteisen-Metallen und faserverstärkten Kunststoffen (bspw. CFK) wird in der industriellen Anwendung durch Hartmetall (HM)-Werkzeuge und Diamant bestückten HM-Werkzeugen realisiert. Auf Grund der Tatsache, dass 91% des weltweiten Ausgangsmaterials für Wolframkarbid (WC)-Hartmetalle, Ammoniumparawolframat (APT), aus China stammen und der wirtschaftliche Aufschwung ab Ende 2010 zu einem deutlichen Anstieg der Rohstoffpreise führte (Bild 1), sind neue Werkzeugkonzepte notwendig [4, 5].



Bild 1: Preisentwicklung von APT 2007-2012 [5]

Nach Christoffel [6] sind die Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beim Spanen im Bezug auf das Werkzeug:

1. Die Verringerung der Werkzeugkosten;
2. Die Steigerung der Werkzeug-Standzeit;
3. Die Steigerung der Schnittwerte, so dass die Schnittzeit beim Spanen verkürzt wird. Dabei zeigt sich, dass die Reduzierung der Werkzeugkosten um 30% oder die Steigerung der Standzeit um 50% die Werkstückkosten um lediglich 1% reduziert. Im Gegensatz dazu werden die Stückkosten bei einer Steigerung der Schnittwerte um 20% um bis zu 15% gesenkt.[6]

Zur Verbesserung des Einsatzverhaltens und Steigerung der Schnittwerte am Werkzeug unter Berücksichtigung der Fertigungsstrategie stehen die Entwicklungsschwerpunkte (Bild 2) unter der Restriktion des zu bearbeitenden Werkstoffes im Vordergrund. Ziel der Untersuchungen ist es für die Bearbeitung von Nichteisenmetallen die Funktionsschicht ta-C auf spanenden Werkzeugen für den industriellen Einsatz zu testen.

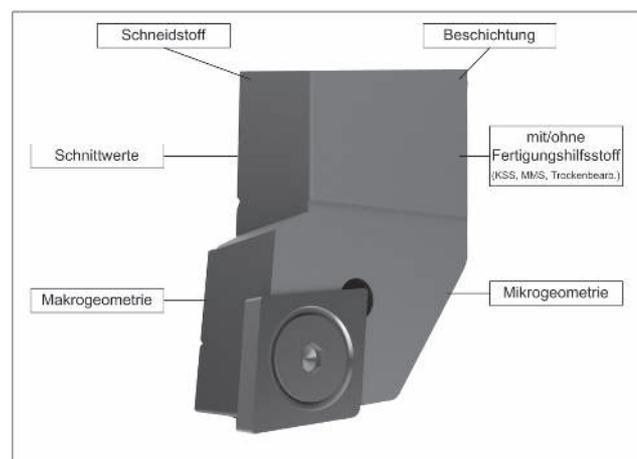


Bild 2: Entwicklungsschwerpunkte am Schneidteil [nach 7]

2. Grundlagen

Die industrielle Bearbeitung von Nichteisenmetallen und Kunststoffen wird wie o. g. überwiegend mit unbeschichteten Hartmetall- und Diamant-Werkzeugen realisiert. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Schneidstoffe sowie die Werkzeugoberflächengüte sollen für eine geringe Reibung beim Ableiten des Spans über die Spanfläche sorgen, um somit Verschleiß und Kräfte gering zu halten. Nach einer unveröffentlichten Patentrecherche der Fakultät Maschinenbau, Fachgruppe Fertigungstechnik, gewinnen beschichtete Werkzeuge in diesem Zusammenhang zunehmend an Bedeutung. Gegenüber bekannten, geeigneten Schichten hat die wasserstofffreie tetraedisch amorphe Kohlenstoffschicht den Vorteil einer hohen Härte und chemischen Inertheit gegenüber Säuren und Chemikalien (Bild 3). Nachteile sind die Graphitisierung ab $>600^\circ\text{C}$ und die Karbidbildung mit Eisen, weshalb die Bearbeitung von Eisenmetallen nur unter besonderen Bedingungen möglich ist.

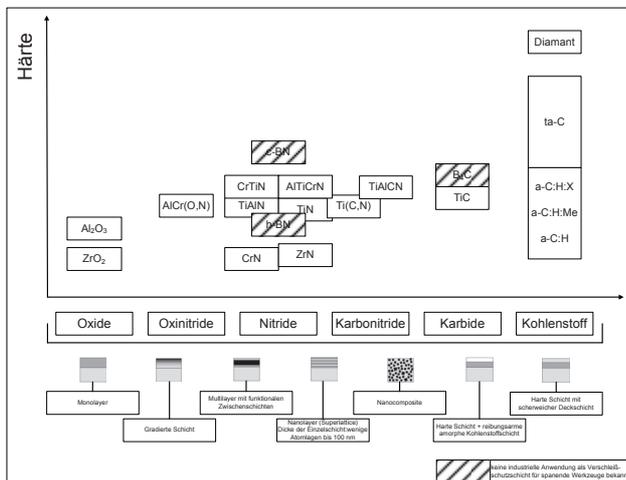


Bild 3: Schematische Darstellung üblicher Funktionsschichten und Schichtsysteme für spanende Werkzeuge

Im Rahmen der Untersuchungen wurden daher zum einen Hartmetall-Wendeschneidplatten für das Fräsen mit der superharten und glatten ta-C Schicht versehen. Zum anderen wurden Wendelbohrer aus zähem Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (Biegefestigkeit $\leq 4700\text{ MPa}$) mit ta-C beschichtet. Die untersuchten Bohr- und Fräswerkzeuge wurden mit einer $4\ \mu\text{m}$ starken tetraedisch amorphen Kohlenstoffschicht, als Monolayer, mit einer 160 nm starken WC-Haftschrift mittels PLD-Verfahren, mit einer Abscheiderate von bis zu 100 nm/min beschichtet. Die hartesten und partikulatarmen ta-C Schichten weisen eine Härte im Bereich von $60 - 65\text{ GPa}$ auf [8]. Der schichtbildende Teilchenstrom wird durch die Laserpulsablation eines pyrolytisch hergestellten Graphittargets mit einem KrF-Excimerlaserstrahl ($\lambda = 248\text{ nm}$, Repititionsrate max. 50 Hz , Pulsdauer 25 ns) erzeugt (Bild 4).

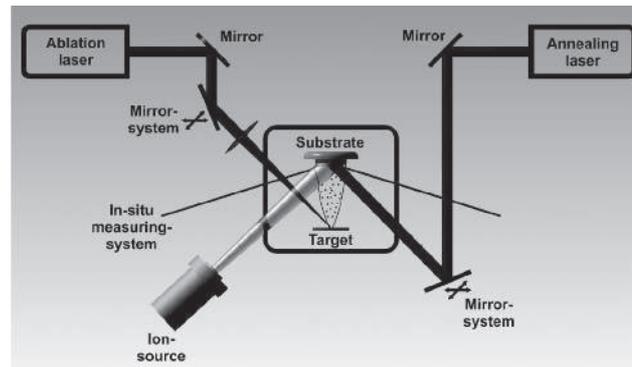


Bild 4: Schematische Darstellung der Beschichtungsanlage [8]

3. Versuchbedingungen

Die Bohr- und Fräsversuche wurden auf der CNC-Fäsmaschine DMU50, mit einer max. Spindeldrehzahl von 14.000 min^{-1} , durchgeführt. Zur Kraft- und Momentenmessung wurde der 3-Komponenten-Dynamometer Typ 9255B der Firma Kistler verwendet. Die Werkzeugkonzepte wurden an der adhäsiven und abrasiven Aluminiumgusslegierung Al-Si12(Cu) mit einem Siliziumanteil von 12% getestet.

Fräsen: Für die Einsatzuntersuchungen wurden an unbeschichteten und mit ta-C beschichteten Wendeschneidplatten beim Planfräsen ohne Fertigungshilfsstoff (Trockenbearbeitung) mit einem Einstellwinkel $\kappa_r = 90^\circ$ getestet (Tabelle 1). Der untersuchte Schnittwertebereich lag bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 700\text{ m/min}$ (Empfehlung für unbeschichtete Wendeschneidplatten vom Hersteller) und $v_c = 1400\text{ m/min}$. Der Vorschub je Zahn betrug $f_z = 0,15\text{ mm}$, welches einem Gesamtvorschub von $f = 0,6\text{ mm}$ entsprach. Mit einer Schnitttiefe $a_p = 1\text{ mm}$ und einem Arbeitseingriff von $a_e = 30\text{ mm}$, welcher 75% des Werkzeugdurchmessers D_{WZ} entspricht, lag das Zeitspannungsvolumen Q zwischen:

$$Q_{v_c=700\text{ m/min}} = a_e * a_p * v_f = 30\text{ mm} * 1\text{ mm} * 334,23\text{ mm/min} = 10,03\text{ cm}^3/\text{min}$$

$$Q_{v_c=1400\text{ m/min}} = a_e * a_p * v_f = 30\text{ mm} * 1\text{ mm} * 668,45\text{ mm/min} = 20,05\text{ cm}^3/\text{min}$$

Zur Auswertung wurde die gesamte Aktivkraft $F_{a,ges}$ durch die vektorielle Addition (1) der durch die Messplattform aufgenommenen Komponenten F_x und F_y und der Schneidkantenversatz SV_y genutzt.

$$F_{a,ges} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad [N] \quad (1)$$

Als Standkriterium wurde ein Schneidkantenversatz in Richtung Spanfläche von $SV_y = 0,1\text{ mm}$ festgelegt.

Tabelle 1: Ausgewählte Versuchsbedingungen beim Fräsen

Werkzeug	Planfräser z = 4; $D_{WZ} = 40 \text{ mm}$; $\kappa_r = 90^\circ$
Wendeschneidplatte	APHX 160404
Schneidstoff	WC-Hartmetall
Beschichtung	unbeschichtet, 4 μm ta-C unter 90° 4 μm ta-C unter 45°
Schnittgeschwindigkeit v_c	700; 1400 m/min
Vorschub f	0,60 mm
Schnitttiefe a_p	1 mm
Arbeitseingriff a_e	30 mm
Fertigungshilfsstoff	Trockenbearbeitung

Bohren: Zur Verbesserung des Bohrverhaltens wurde ausgehend von den empfohlenen Schnittwerten für unbeschichtete HSS-Wendelbohrer ($v_c = 50 \text{ m/min}$, $f = 0,19 \text{ mm}$) die Schnittgeschwindigkeit v_c erhöht (Tabelle 2). Zur Herstellung der Sacklochbohrungen mit einer Tiefe von $l_f = 20 \text{ mm}$ wurde eine Minimalmengenschmierung (MMS) mit einem Volumenstrom $\dot{V}_{MMS} = 15 \text{ ml/h}$ verwendet. Als Standkriterium wurde ein maximales Schnittmoment von $M_c = 20 \text{ Nm}$ festgelegt.

Tabelle 2: Ausgewählte Versuchsbedingungen beim Bohren

Werkzeug	Bohrer DIN 338–8,0-R-N–118–A-HSS
Schneidstoff	HS6-5-2C
Beschichtung	unbeschichtet, 4 μm ta-C
Schnittgeschwindigkeit v_c	50; 100; 200; 300 m/min
Vorschub f	0,19
Bohrtiefe l_f	20 mm
Volumenstrom \dot{V}_{MMS}	15 ml/h

4. Ergebnisse Fräsen

Ausgehend von der Herstellerempfehlung zur Schnittgeschwindigkeit ($300 \text{ m/min} \leq v_c \leq 700 \text{ m/min}$) und zum Vorschub ($0,40 \text{ mm} \leq f \leq 0,72 \text{ mm}$) von unbeschichteten Hartmetall-Wendeschneidplatten wurden in einer ersten Versuchsreihe die Schnittwerte $v_c = 700 \text{ m/min}$ und $f = 0,6 \text{ mm}$ gewählt. Ziel der Untersuchungen war es, das Einsatzverhalten der unbeschichteten gegenüber den beschichteten Wendeschneidplatten zu testen. Ebenso steht der Einfluss der Beschichtungsstrategie im Fokus, so wurden die Wendeschneidplatten mit zwei verschiedenen Ablationswinkeln (45° und 90°) zur Spanfläche beschichtet. Durch die unterschiedlichen Ablationswinkel wurde

bei 90° hauptsächlich die Spanfläche und unter 45° sowohl Span- als auch Freifläche beschichtet. In der ersten Versuchsreihe, zeigte sich, dass das Standkriterium von $SV_V = 0,1 \text{ mm}$ nach einer Schnittzeit von 15 min sowohl von der unbeschichteten als auch den beschichteten Wendeschneidplatten nicht erreicht wurde. Am Verschleiß- und Kraftverlauf wird ersichtlich, dass der Anstieg der unbeschichteten Wendeschneidplatten deutlich größer als der der Beschichteten ist (Bild 5 und 6).

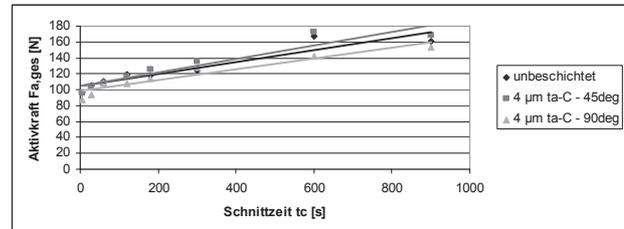


Bild 5: Kraftverlauf von unbeschichteten und beschichteten Fräswerkzeugen bei $v_c = 700 \text{ m/min}$ über die Schnittzeit t_c

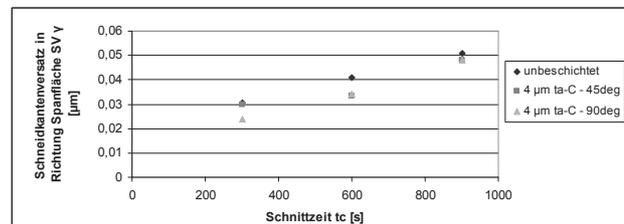


Bild 6: Verschleiß SV_V über die Schnittzeit t_c von unbeschichteten und beschichteten Fräswerkzeugen bei $v_c = 700 \text{ m/min}$

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Schnittgeschwindigkeit von 700 m/min auf 1400 m/min verdoppelt. Diese liegt somit im oberen Bereich der von den Werkzeugherstellern angegebenen Schnittwerte für PKD-Werkzeuge von $400 \text{ m/min} \leq v_c \leq 1900 \text{ m/min}$. Analog zu den Versuchen in der ersten Versuchsreihe zeigt sich, dass der Verschleiß und die gesamt Aktivkraft beim unbeschichteten Fräser stärker ansteigen als bei den beschichteten Wendeschneidplatten. Auf Grund der höheren Belastung ist die aufgebrachte Kraft beim Fräsen deutlich größer als beim Versuch mit $v_c = 700 \text{ m/min}$. Der damit einhergehende Verschleiß überschreitet nach 240 Sekunden bei unbeschichteten Wendeschneidplatten das Standkriterium von $SV_V = 0,1 \text{ mm}$. Bei den beschichteten Wendeschneidplatten ist das Verschleißkriterium erst nach 300 Sekunden (ta-C unter 90°) bzw. 360 Sekunden (ta-C unter 45°) überschritten (Bild 7).

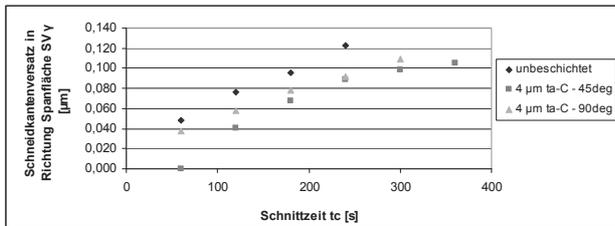


Bild 7: Verschleiß SV_V über die Schnittzeit t_c von unbeschichteten und beschichteten Fräswerkzeugen bei $v_c = 1400$ m/min

Kraftanstieg und Verschleiß machen deutlich, dass neben der Beschichtung auch die Beschichtungsstrategie von erheblicher Bedeutung für die Standzeit der Werkzeuge ist (Bild 8). Neben der Beschichtungsstrategie hat auch die Werkzeugpräparation einen signifikanten Einfluss auf das Standvermögen der Werkzeuge, so kann bspw. die Standzeit in Abhängigkeit des Schneidkantenradius nahezu vervielfacht werden [9].

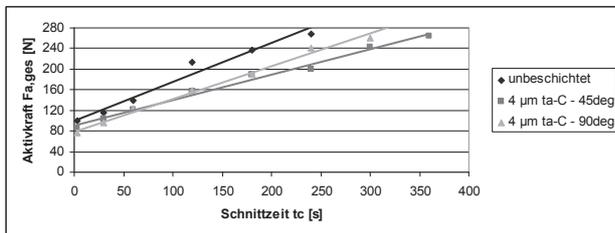


Bild 8: Kraftverlauf von unbeschichteten und beschichteten Fräswerkzeugen bei $v_c = 1400$ m/min über der Schnittzeit

5. Ergebnisse Bohren

Zur Einsatzcharakterisierung der beschichteten Bohrer wurde die Abhängigkeit des Werkzeugverschleißes und der Schnittmomente von der Schnittgeschwindigkeit beurteilt. In der ersten von zwei Versuchsreihen wurden unbeschichtete und beschichtete HSS-Bohrer mit denen vom Hersteller empfohlenen Schnittwerten für unbeschichtete HSS-Bohrer ($v_c = 50$ m/min; $f = 0,19$ mm) getestet. Es zeigte sich, dass unter Einsatz von Minimalmengenschmierung die unbeschichteten HSS-Bohrer nach einem maximalen Vorschubweg von $l_f = 0,8$ m das Standkriterium von $M_c = 20$ Nm überschritten (Bild 9). Im Gegensatz dazu erreichten die beschichteten Bohrer das Standkriterium auch nach $l_f = 4,8$ m nicht. Die Standmenge N konnte um mindestens 500% gesteigert werden.

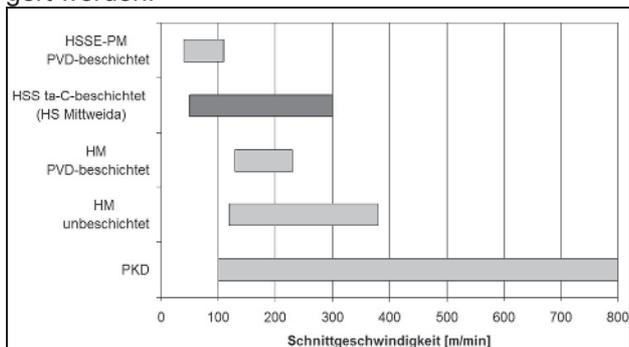


Bild 10 Schnittwertbereiche unterschiedlicher Schneidstoffe und Beschichtungen zum Bohren von Aluminiumlegierungen mit einem Siliziumanteil >10% [10]

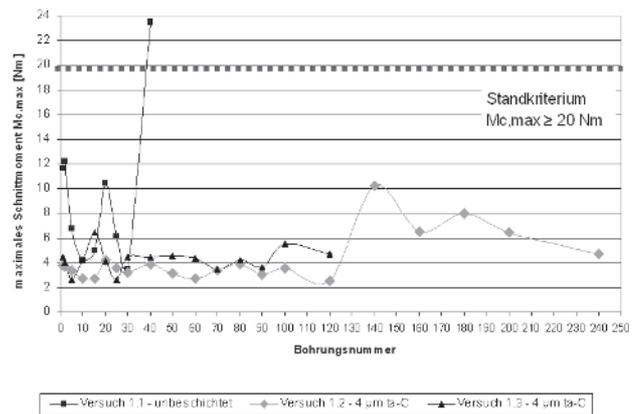


Bild 9: maximale Schnittmomente M_c von unbeschichteten und ta-C beschichteten Bohrern mit $v_c = 50$ m/min

In der zweite Versuchsreihe wurde zur Steigerung der Produktivität die Schnittgeschwindigkeit von ursprünglich $v_c = 50$ m/min auf 100, 200 und 300 m/min bei gleichem Vorschub ($f = 0,19$ mm) erhöht. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass auch mit steigender Schnittgeschwindigkeit der Standweg für unbeschichtete Bohrer von $l_f = 0,8$ m überschritten wird. Beim Vergleich des Werkzeugverschleißes wird deutlich, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Aufbauschneide auf der Spanfläche deutlich geringer ausfällt (Tabelle 3). Neben der Steigerung der Standmenge konnte auch die Schnittzeit von $t_{c50m/min} = 3,17$ s auf $t_{c300m/min} = 0,53$ s je Bohrung gesenkt werden.

Tabelle 3: Vergleich des Spanflächenverschleißes bei ta-C beschichteten Bohrern nach $l_f = 2,0$ m bei unterschiedlicher Schnittgeschwindigkeit

Versuch 2.1	Versuch 2.2	Versuch 2.3
$v_c = 100$ m/min	$v_c = 200$ m/min	$v_c = 300$ m/min
		
$Q = 38$ cm ³ /min	$Q = 76$ cm ³ /min	$Q = 114$ cm ³ /min
Standzeitende nicht erreicht		

Die mit ta-C beschichteten HSS-Bohrern erzielbaren Schnittwerte übertreffen die von mit klassischen PVD-Schichten verbesserten Schnellarbeitsstahlbohrern erzielten deutlich. Ebenso werden Schnittwerte, mit denen sonst nur mit Hartmetall- und PKD-Bohrern prozesssicher gespannt wird, erzielt (Bild 10). Ein weiteres Wettbewerbsvorteil sind die gegenüber Hartmetall- und PKD-Werkzeugen deutlich geringeren Beschaffungskosten für HSS-Bohrer weniger als einem Zehntel (Bild 11).

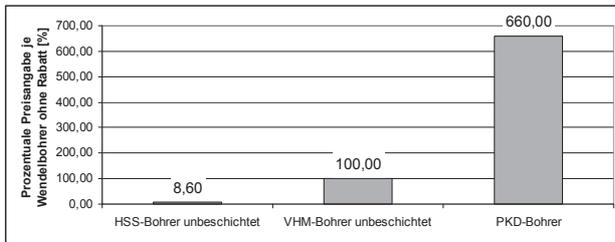


Bild 11: Beispielhafter prozentualer Preisvergleich von Wendelbohrern ohne Rabatt

6. Zusammenfassung

Zielstellung der Untersuchungen war es, die tetraedisch amorphe Kohlenstoffschicht als Funktionsschicht für Präzisionswerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide für den industriellen Einsatz zu testen. Zur Durchführung realitätsnaher Untersuchungen wurde die abrasiv adhäsiv wirkende Aluminiumgusslegierung AlSi12(Cu), welche zumeist im Automobil- und Maschinenbau eingesetzt wird, ausgewählt und zerspannt. Dabei zeigte sich, dass Präzisionswerkzeuge zum Fräsen und Bohren aus den Schneidstoffsubstraten Hartmetall und Schnellarbeitsstahl mit einer 4 µm starken ta-C Schicht zur spanenden Bearbeitung von AlSi12(Cu) geeignet sind. Durch die Beschichtung sind deutliche Steigerungen der Standzeit bzw. -menge realisierbar. Ferner ist mit ta-C beschichteten Werkzeugen eine deutliche Steigerung der Produktivität auf Grund des erweiterten Schnittwertebereichs möglich.

Danksagung

Die Autoren danken dem Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst, dem Freistaat Sachsen sowie dem Europäischen Sozialfond für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes ‚LAMIS‘ (Laserspulsabscheidung von Schichten und Mikrostrukturierung von Festkörpermaterialeien; Projekt Nummer: 080937862/ PRANO: 1236340295926).

Literaturverzeichnis

- [1] Wolff, J.: Porsche nimmt's leicht. Zeit online., 24.07.2012 URL: <http://www.zeit.de/auto/2012-07/leichtbau-porsche>
- [2] URL: http://www.bmw-i.de/de_de/concept/ Stand: 29.06.2012
- [3] Schiffers, C: Diamantschichten zur Zerspannung von CFK und Composites. Workshop, Schmalkalden – 21.06.2012
- [4] Hackelber S.; Heilemann G.: Mitteilung der Geschäftsleitung. Stuttgart: Hahn+Kolb Werkzeug GmbH, 7.07.2011
- [5] URL: <http://www.bloomberg.com/quote/MBWEOEUFM:IND/chart> verfügbar am 27.06.2012
- [6] Christoffel, K.: Entwicklungstrends beim Drehen und Fräsen – Schneidstoffe und Werkzeuge. VDI-Seminar: Optimierungspotentiale in der Spanenden Fertigung. – Düsseldorf – 09./10.06.2011
- [7] Wißuwa, E.; Scholze, S.: Höhere Effektivität durch beschichtete Werkzeuge. In: Maschinenmarkt . Das Industriemagazin. – Würzburg: Vogel Business Media GmbH Co. KG. – 37/2010, S. 92 – 94
- [8] Günther, K. et al.: Schichtdickenverteilung von tetraedisch gebundenen amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C-Schichten) unter Verwendung der Laserspulsabscheidung. IWKM 2011: Scientific Report – Mittweida – Nr. 9, 2011, S. 47-50 – ISSN 1437 – 7624
- [9] Cselle, T: Platit - Compendium 2011. 45th Edition – Firmenschrift. – Selzach: Platit AG – 2011, S. 33
- [10] Scholze, S.; Wißuwa, E.: Einsatzuntersuchungen von ta-C beschichteten HSS-Bohrern. In: Diamond Business: Eltmann – Verlag Diamond Business KG – 2/2011 (Heft 37), S. 40 – 47 – ISSN 1619-5558

GEPULSTER FASERLASER MIT EINSTELLBAREN ZEITLICHEN PARAMETERN

Stefan Mauersberger, Bernhard Steiger
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Kurzfassung: Die freie Variation der zeitlichen Strahlverteilung einer Laserquelle bietet die Möglichkeit der gezielten Parameterwahl zur Optimierung vieler Prozesse der Lasermaterialbearbeitung. Diesbezüglich wurde am Laserinstitut der Hochschule Mittweida (LHM) ein gepulstes Faserlasersystem aufgebaut und dessen Fähigkeit zur zeitlichen Formung der Laserstrahlung untersucht. Die technische Umsetzung des Faserlasers sowie die erhaltenen Ergebnisse werden in diesem Artikel kurz erläutert, zusammengefasst und diskutiert.

1. Einleitung

Die zeitliche Verteilung der Laserstrahlung hat im hohen Maße Einfluss auf das Ergebnis vieler laserapplizierten Verfahren. So gibt es für jeden Bearbeitungsprozess mit gepulster Laserstrahlung, je nach Anforderung und bei gegebenen Randbedingungen, einen optimalen Zeitparameterbereich. Zu diesen Randbedingungen zählen u. a. die optischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Materials, die räumlichen und spektralen Parameter der Laserstrahlung und das verwendete Prozessgas. Der zeitliche Verlauf der Laserstrahlung umfasst die Größen Pulsenergie, Repetitionsrate, Pulsspitzenleistung und Pulsdauer. Diese sind bei vielen Lasergeräten in gewissen Grenzen einstellbar, korrelieren jedoch oftmals miteinander, vor allem bei gütegeschalteten Systemen. Eine unabhängige Regelung, z. B. von Pulsenergie und Pulsdauer, ist für den Anwender bei vielen Geräten somit nicht möglich. Noch weniger Einfluss hat der Nutzer auf die zeitliche Form der Laserpulse, die abhängig vom Laserprinzip meist vorgegeben ist. Um diesen Umstand zu umgehen und gezielten Einfluss auf die Pulsform zu erhalten, werden in der Praxis verschiedene Methoden der aktiven Laserpulsformung angewendet. Eine Variante ist die Quasipulserzeugung durch Modulation von kontinuierlicher (cw) Laserstrahlung mit resonatorexternen Modulatoren, z. B. AOM, oder EOM. Bei dieser Methode ist die Pulsspitzenleistung jedoch auf den Wert der cw-Leistung begrenzt, weshalb, je nach Prozessanforderung, Laser mit sehr hoher cw-Leistung erforderlich sind. Außerdem steht der Wirkungsgrad im direkten Zusammenhang mit dem Verhältnis von Pulsdauer zu Pulspause (Ansteuerungsgrad, engl.: duty cycle), so dass gegebenenfalls nur ein kleiner Bruchteil von der gesamten Laserenergie zur Bearbeitung genutzt wird. Eine weitere Methode ist die Pulsformung durch die gezielte Ansteuerung der Pumpquelle eines Lasers, denn der zeitliche Verlauf der erzeugten Laserstrahlung entspricht bei vielen Laseranordnungen im Wesentlichen dem der Pumpquelle. Die Spezifikation der Pumpquelle bestimmt in diesem Fall die zeitlichen Parameter des Lasersignals. Die dritte Variante zur aktiven Pulsformung ist die Verwendung von Oszillator-Verstärker-Systemen (engl.: Master Oscillator Power Amplifier, kurz: MOPA). Dabei werden vom

Oszillator Laserpulse kleiner Leistung mit der gewünschten Form generiert und anschließend in der Verstärkerstufe des Lasers auf die geforderten Werte leistungsverstärkt. Diese Anordnung erlaubt die Erzeugung von einstellbaren Pulsen oder Pulszügen, im Leistungsbereich der Materialbearbeitung, mit Änderungen der Pulsform im einstelligen ns-Bereich (etwa 1 GHz analoge Modulationsfrequenz [1]). Die Nachteile dieser Systeme liegen darin, dass die Form des Lasersignals beim Durchlaufen der Verstärkerstufe, in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter, stark verändert werden kann und dass Effekte wie verstärkte Spontanemission (engl.: Amplified Spontaneous Emission, kurz: ASE) oder verstärkte rücklaufende Laserstrahlung die Leistungsfähigkeit des Lasers begrenzen. Trotz der genannten Nachteile, scheint das MOPA-Prinzip aber das größte Potenzial zur aktiven Pulsformung, insbesondere bei ns- und μ s-Pulsen, bei gleichzeitig hohen Ausgangsleistungen zu besitzen. Aus diesen Überlegungen heraus wurde am LHM ein Faserlasersystem, bestehend aus einem akustooptisch modulierten Faseroszillator und einem kontinuierlich gepumpten Faserverstärker, aufgebaut, um die Möglichkeiten und Grenzen der aktiven Pulsformung bei der Verwendung von faserbasierten MOPA-Systemen zu untersuchen.

2. Faserlaseraufbau

2.1. Allgemein

Das entwickelte Lasersystem besteht vollständig aus fasergekoppelten Einzelkomponenten, die mittels Lichtbogenspleißen stoffschlüssig miteinander verbunden wurden, was den gesamten optischen Aufbau eine hohe mechanische Stabilität verleiht. Sowohl der Oszillator, der auch als Seedlaser bezeichnet wird, als auch der Verstärker basieren auf Ytterbium dotierten Doppelkernfasern als Lasermedium. Beide Laserfasern werden bei einer Wellenlänge um 976 nm optisch gepumpt.

Tab. 1: verwendete Laserfasern und Pumpdioden

	Seedlaser	Verstärker
Pumpquelle	9 W Pumpdiode mit 125 μ m Faser	25 W Pumpdioden mit 125 μ m Faser
Laserfaser	Laser-/ Pumpkern $\varnothing = 6 / 125 \mu\text{m}$ NA = 0.14 / 0.46	Laser-/ Pumpkern $\varnothing = 20 / 400 \mu\text{m}$ NA = 0.06 / 0.46

2.2. Seedlaser

Der Resonator des Oszillators besteht aus der Laserfaser (Tab. 1) und zwei Faser-Bragg-Gittern (Bild 1). Die angespleißte Pumpdiode emittiert kontinuierlich, so dass in der aktiven Faser ein cw-Lasersignal mit 1070 nm Zentralwellenlänge und einer spektralen Bandbreite von etwa 0,3 nm generiert wird. Die cw-Ausgangsleistung wird anschließend mittels fasergekoppeltem AOM moduliert. Aufgrund der spezifizierten Zerstörungsschwelle des AOMs, ist die Leistung des cw-Signals auf 3 W begrenzt. Zur Vermeidung einer Rückkopplung von Strahlung aus dem Verstärker in den Seedlaser, befindet sich am Ende der Oszillatoranordnung ein fasergekoppelter optischer Isolator. Auf Grund von Verlusten im AOM und im optischen Isolator, reduziert sich die Leistung auf einen Maximalwert von 2 W am Seedlaserausgang.

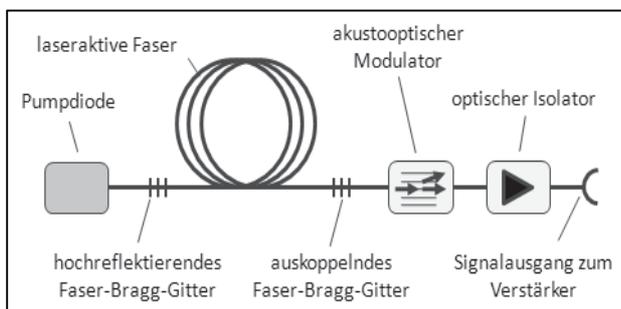


Bild 1: schematischer Aufbau des Seedlasers

Durch die Verwendung eines programmierbaren Funktionsgenerators und der analogen Ansteuerung des AOMs ist es möglich, Laserpulse mit determinierter zeitlicher Verteilung zu erzeugen, welche nur durch die Anstiegs- bzw. Abfallzeit des AOMs von jeweils etwa 30 ns und der Spitzenleistung des Seedlasers von 2 W begrenzt werden.

2.3. Faserverstärker

Um das erzeugte Seedlasersignal zu verstärken, ist dem Oszillator eine Verstärkerstufe nachgeschaltet. Deren Herzstück bildet eine 20 m lange LMA-Laserfaser (Tab. 1), die über einen (6+1)x1-Combiner mit drei 25 W Pumpdioden und der Signalfaser des Seedlasers verbunden ist (Bild 2). Der Aufbau des Combiners bewirkt, dass die Strahlung der Pumpdioden in den Pumpkern und das optische Signal des Oszillators in den Laserkern der Verstärkerfaser gelangt.

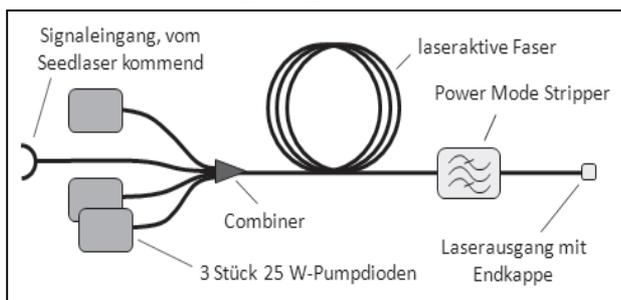


Bild 2: schematischer Aufbau des Faserverstärkers

Außerdem befinden sich zu Untersuchungszwecken an zwei offenen Pumpports des Combiners

(in Bild 2 nicht dargestellt) jeweils ein Spektrometer und ein Leistungsmesskopf, um ASE bzw. rückläufige Laserstrahlung detektieren zu können. Am Ende der Verstärkerfaser entfernt ein Power Mode Stripper im Pumpkern vorhandene Strahlanteile, wie Pumpstrahlung, ASE oder Leckstrahlung von Spleißstellen, so dass am Ende nur noch Strahlung aus dem Laserkern die Faser verlässt. Abschließend ist der Aufbau mit einer schräg geschliffenen Endkappe versehen, um die Intensität der Strahlung am Ausgang abzusenken und um direkte Reflexionen von der Grenzfläche Glas-Luft zurück in den Laserkern der Verstärkerfaser zu verhindern.

3. Experimentelle Details zur Pulsformung

Zur Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des Lasersystems wurde ein Pulszug, bestehend aus fünf Einzelpulsen (Bild 3) mit einer gaußförmigen Einhüllenden verwendet.

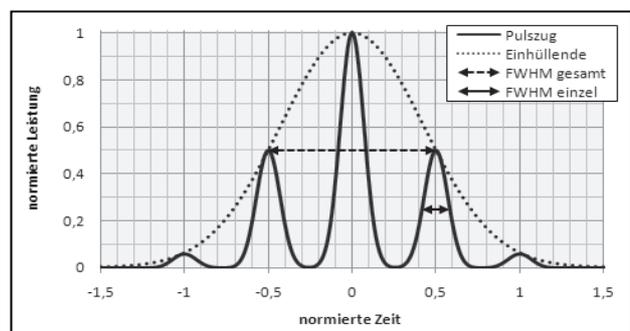


Bild 3: gaußförmiger Pulszug mit fünf Einzelpulsen
 $FWHM_{\text{einzel}} = 1/6 FWHM_{\text{gesamt}}$

Anhand dieses Pulszuges sollte die Umsetzung der vorgegebenen Funktion in ein kongruentes optisches Signal des Seedlasers untersucht werden. Dazu wurden die unterschiedlichen zeitlichen Parameter Pulsdauer, Pulsspitzenleistung, Repetitionsrate und Ansteuerungsgrad variiert und deren Einfluss auf die Pulsform überprüft. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen zur Form des Seedlasersignals, sollte anschließend eine Leistungsverstärkung der Laserpulse erfolgen und dabei der Einfluss der Verstärkerstufe auf die Pulsform ermittelt werden.

4. Ergebnisse und Diskussion

In den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine Pulsformung mittels resonatorexternen AOM sehr gut möglich ist. Die vorgegebene Funktion konnte vom Seedlaser exakt in ein optisches Signal umgesetzt werden. Als Beispiel ist in Bild 4 der Zeitverlauf für einen Pulszug mit 600 ns Halbwertsbreite ($FWHM$) und einer Spitzenleistung von 0,89 W dargestellt. Die Repetitionsrate betrug 100 kHz. Das Ziel war eine Pulsenergie von 0,2 μJ bzw. eine mittlere Leistung von 20 mW. Diese Werte konnten in der Messung sehr genau nachgewiesen werden. Die Repetitionsrate und der Ansteuerungsgrad spielten für die Umsetzung der gewünschten Pulsform keine Rolle. Bei sehr kurzen Pulsen, bzw. bei sehr schnellen Änderungen innerhalb des Laserpulses, die im

Bereich der Anstiegs-/ Abfallzeit des AOMs lagen, kam es zu Abweichungen vom vorgegebenen Verlauf, da der AOM dann der Funktion nicht mehr genau folgen konnte.

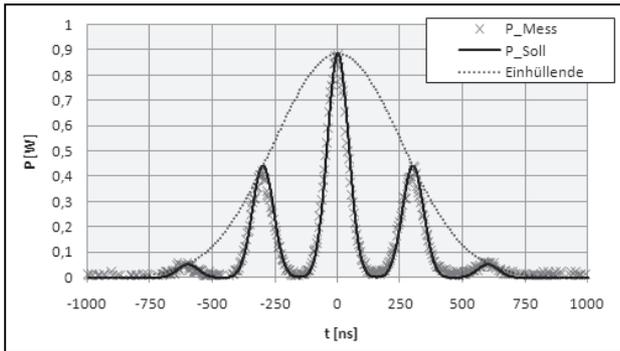


Bild 4: Seedlasersignal (Pulszug mit 600 ns Halbwertsbreite der einhüllenden Gaußkurve)

Bei der Nachverstärkung der erzeugten Laserpulse musste primär auf die Begrenzung der ASE geachtet werden, da diese parasitäre Strahlung im ungünstigsten Fall zur Zerstörung des Laseraufbaus führen kann. Auf den Anteil der ASE in der Verstärkerfaser hatten zwei Parameter entscheidenden Einfluss. Ein Punkt war die mittlere Leistung des Oszillators. Diese musste ausreichend groß sein, so dass die Besetzungsinversion in der Verstärkerfaser mit einem Durchlauf des Seedlasersignals vollständig abgebaut werden konnte. Je höher die Pumpleistung des Verstärkers war, umso größer musste die mittlere Leistung des Seedlasers zur Vermeidung von ASE sein. Bei konstanter mittlerer Leistung des Seedlasers stieg die ASE exponentiell mit der Pumpleistung des Verstärkers an (Bild 5).

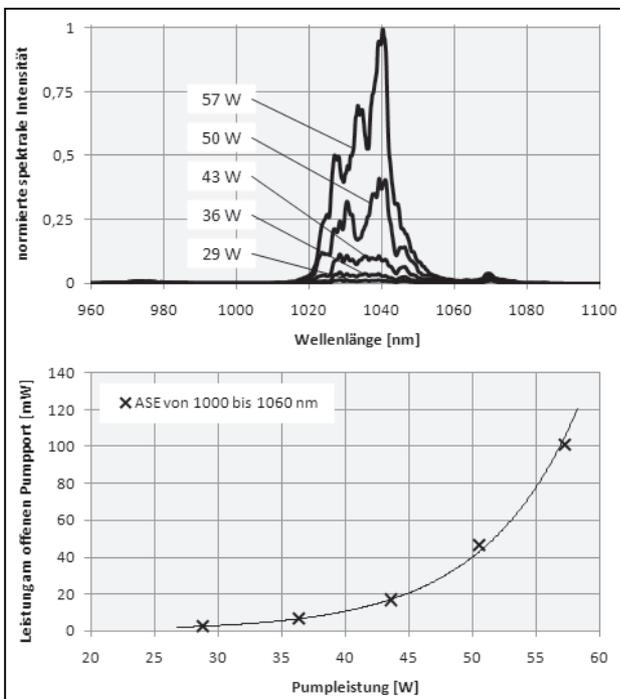


Bild 5: spektrale Verteilung (oben) und gemessene Leistung (unten) der ASE bei unterschiedlichen Pumpleistungen, $P_{av,Seed} = 20 \text{ mW}$; $f_P = 100 \text{ kHz}$

Der zweite Punkt, der zu verstärkter Spontanemission im Lasersystem führte, war eine zu große

Pause zwischen zwei Laserpulsen. Die Lebensdauer der angeregten Elektronen im oberen Laserniveau einer mit Ytterbium dotierten Glasfaser beträgt etwa 1-2 ms [2]. Demzufolge war in diesem Zeitbereich die Entstehung von ASE zu erwarten. Durchgeführte Messungen mit variiert Pulspause bestätigten diese Vermutung, wobei ein Einsetzen der ASE schon ab Pulspausen von etwa 100 μs nachgewiesen wurde. Die mittlere Leistung des Seedlasers blieb während der Messung konstant bei 20 mW. Die Pumpleistung des Verstärkers betrug 12 W. Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse zur Entstehung von ASE im verwendeten Laseraufbau, wurden für die Untersuchungen zur Leistungsverstärkung der generierten Seedlaserpulse folgende Laserparameter benutzt.

Tab. 2: verwendete Laserparameter

Parameter	Wert
$P_{av,Seed}$	20 mW
$P_{Pump,Verstärker}$	12 W
Pulspause	$\leq 100 \mu\text{s}$

Der Pulszug (Bild 3) wurde bei unterschiedlichen Repetitionsraten und konstantem Ansteuerungsgrad mit den Parametern aus Tab. 2 leistungsverstärkt. Die Messreihe zeigte, dass bei Repetitionsraten von $f_P \geq 100 \text{ kHz}$ kaum eine qualitative Änderung der Pulsform in Bezug auf das Seedlasersignal (Bild 6) erfolgte.

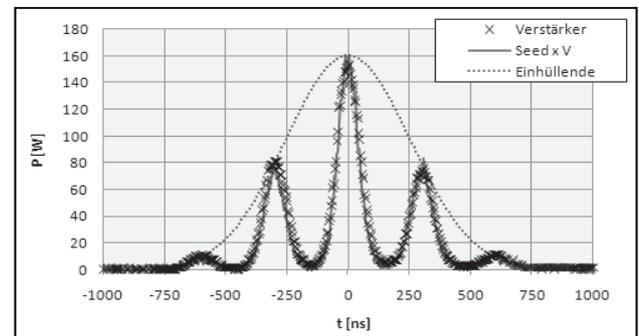


Bild 6: Lasersignal nach Verstärkung bei 100 kHz

Mit geringer werdenden Repetitionsraten, fand eine zunehmende Formänderung des Lasersignals statt. Dabei wurde der Anfang mehr verstärkt als das Pulsende (Bild 7). Insgesamt blieb die Verstärkung der Pulsenergie bzw. der mittleren Leistung unabhängig von der Repetitionsrate bei etwa $V = 180$ konstant.

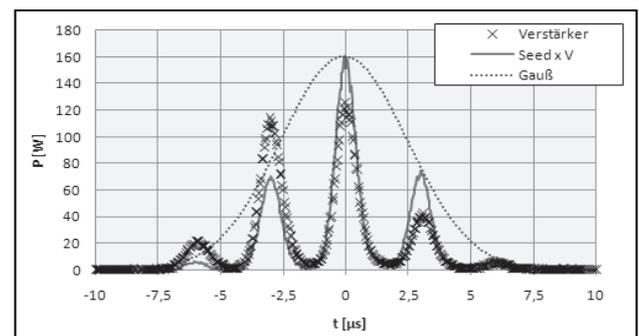


Bild 7: Lasersignal nach Verstärkung bei 10 kHz

Um auch bei niedrigen Repetitionsraten, z. B. 10 kHz, die ursprünglich vorgegebene Pulsform erhalten zu können, wurde die verzernde Wirkung des Verstärkers auf das Lasersignal berücksichtigt. Es erfolgte eine Korrektur des Seedlasersignals, indem die Leistung des Pulszuges am Anfang reduziert und mit zunehmender Pulsdauer erhöht wurde (Bild 8). Die Pulsenergie blieb gegenüber dem nicht korrigierten Signal konstant.

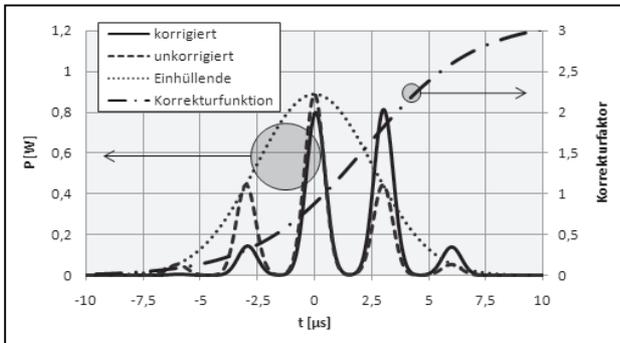


Bild 8: Korrektur des Seedlasersignals bei 10 kHz

Nach der Verstärkung des korrigierten Seedlasersignals stellte sich der ursprünglich gewünschte Funktionsverlauf des Pulszuges ein (Bild 9). Die Verstärkung der Pulsenergie bzw. der mittleren Leistung betrug auch in diesem Fall etwa $V = 180$.

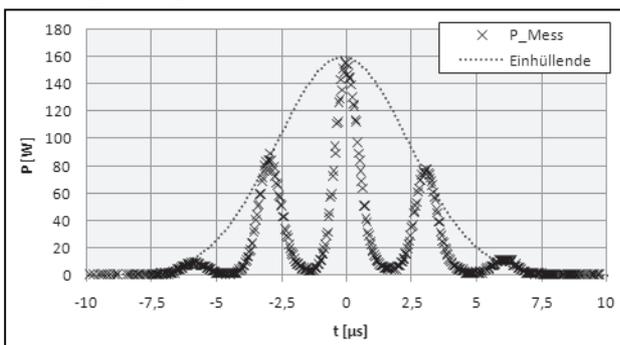


Bild 9: korr. Lasersignal nach Verstärkung bei 10 kHz

Weitere Messungen zeigten, dass die Korrekturfunktion für unterschiedliche Pulsformen und für diverse Laserparameter spezifisch ist. Demnach muss für jede Zeitverteilung eine passende Korrektur des Seedlasersignals erfolgen, damit das verstärkte Lasersignal kongruent mit der gewünschten Funktion verläuft.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein gepulstes Faserlasersystem vorgestellt, mit dem in gewissen Grenzen die Generierung freier Pulsformen möglich war. Anhand eines Pulszuges mit gaußförmiger Hüllkurve wurde der Einfluss der Verstärkerstufe auf die Pulsform bei unterschiedlichen Laserparametern untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass sich bei der Verstärkung die Form des Laserpulses ändert. Bei konstantem Ansteuerungsgrad und gleichem Verhältnis von mittlerer Seedlaserleistung zu Pumpleistung des Verstärkers, wurde für geringere Repetitionsraten eine stärkere Verzerrung der Pulsform beobachtet als bei größeren Puls-

wiederholfrquenzen. Diese parameterspezifische Änderung der Pulsform konnte durch ein korrigiertes Seedlasersignal soweit berücksichtigt werden, dass am Laserausgang das verstärkte Signal mit der gewünschten Zeitverteilung vorlag. Die Entstehung von verstärkter Spontanemission begrenzte die Leistungsfähigkeit des Lasersystems. So wurde die Pumpleistung in den durchgeführten Versuchen mit dem Pulszug mit gaußförmiger Einhüllenden auf 12 W begrenzt, so dass sich keine ASE im Verstärker ausbilden konnte. Die mittlere Leistung des Oszillators betrug dabei 20 mW. Bei höheren mittleren Leistungen des Seedlasers (im cw-Betrieb bis zu 2 W) war eine Erhöhung der Pumpleistung bis auf maximal 75 W möglich, ohne dass dabei ASE entstand. Bedingt durch das angewendete Prinzip der resonatorexternen Modulation zur Erzeugung von Laserpulsen, standen aber je nach Pulsform und Ansteuerungsgrad nur wenige mW an mittlerer Leistung am Ausgang des Seedlasers zur Verfügung.

Um die Ausgangsleistung im gepulsten Regime weiter erhöhen zu können, müsste zwischen Oszillator und Verstärkerfaser noch eine Zwischenverstärkerstufe eingebracht werden. Diese würde das Seedlasersignal soweit verstärken, dass auch im gepulsten Betrieb die maximal mögliche Pumpleistung des Lasers genutzt werden könnte, ohne dass ASE entsteht. Der Aufbau einer solchen mehrstufigen Oszillator-Verstärker-Anordnung wird in zukünftigen Projekten am LHM angestrebt. Dieses Lasersystem verfüge dann über für die Materialbearbeitung relevante Leistungswerte, so dass damit der Einfluss unterschiedlicher Pulsformen auf den Bearbeitungsprozess untersucht werden könnte. Des Weiteren bietet die computergestützte Simulation von dynamischen Laserprozessen die Möglichkeit, die Signalverzerrung in Verstärkerstufen zu ermitteln und so die spezifische Korrekturfunktion bzw. das korrigierte Seedlasersignal für unterschiedliche Laserparameter zu berechnen.

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde am LHM das Verständnis von faserbasierten Oszillator-Verstärker-Systemen weiter verbessert. Darauf aufbauend soll zukünftig die Faserlaserentwicklung, insbesondere im gepulsten Regime mit arbiträrer zeitlicher Verteilung, weiter forciert werden.

Danksagung

Wir danken dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) für die Förderung der durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Forschungscluster im Exzellenzbereich Laser – Entwicklung neuer Lasertechnologien“ (AZ: 4-7531.60-02-5140-11/6).

Literatur

- [1] Datenblatt des Diodentreibers LDP-VR 005 von Picolas
- [2] R. Paschotta: Encyclopedia of Laser Physics and Technology (Online Encyclopedia)

KOPPLUNG EINES CHROMATISCHEN SENSORS AN EINE PIKOSEKUNDEN-LASERANLAGE ZUR VERMESSUNG GENERIERTER MIKROSTRUKTUREN

Marco Smarra, Jens Hildenhagen, Klaus Dickmann
Laserzentrum FH Münster (LFM), Stegerwaldstr. 39, D-48565 Steinfurt

Die präzise Fertigung von Mikrostrukturen bildet die Grundlage vieler moderner Techniken. Ultrakurzpulslaser mit hoher mittlerer Leistung bieten sich hier als besonders flexibel an. Durch den Einsatz von Messsystemen für die Oberflächentopographie kann das Auffinden von Abtragsparametern und das Detektieren von Fehlstellen vereinfacht und automatisiert werden.

Many modern technologies are based on high precision microstructures. The use of ultra short pulse laser systems with a high average power is a flexible option. By using a topography measurement system the analysis of parameter settings and the detection of defects can be done easily and automatically.

1. Einleitung

Präzise gefertigte Mikrostrukturen bilden die Grundlage vieler moderner Produkte in der Elektronik, Sensorik, Medizintechnik bis hin zur Solarzellenfertigung. Die Anforderungen an Material und Oberfläche definieren dabei das Fertigungsverfahren. Als besonders effizient und flexibel hebt sich die Bearbeitung mittels Ultrakurzpulslasern hervor. Durch die geringe Wechselwirkungszeit und die hohen Intensitäten ergeben sich sehr gute Bearbeitungsqualitäten [1] und definierbare Abtragstiefen [2].

Das unmittelbare Abtragsverhalten variiert dabei jedoch je nach Werkstoff- und Laserparameter [3]. Präzise, hochauflösende Messsysteme können diese Schwankungen ermitteln. Hier bieten sich optische, berührungslose Verfahren an. Sie punkten durch Vorteile in der Geschwindigkeit und der Auflösung [4] und können zum Teil während der Laserbearbeitung messen [5].

Die vorliegende Studie zeigt, dass sich durch die Kopplung von Pikosekundenlaser und chromatischen Sensor die Wirkung von Prozess- und Werkstoffparametern automatisiert auswerten lässt. Aufwändige und langwierige Messreihen können vom System selbstständig durchgeführt werden. Außerdem wurden Ansätze erprobt, die zeigen, dass grundsätzlich das Strukturieren anhand von CAD-Daten möglich ist.

Für die Studie wurde ein Pikosekundenlaser der Fa. Trumpf (TruMicro 5050 Compact, Ausgangsleistung: 50 W, Pulsfolgefrequenz: 800 kHz, Pulsdauer: 8 ps, Wellenlänge: 1030 nm) verwendet. Die Strahlablenkung erfolgte über ein Scannersystem (Scanlab Hurryscan 15) mit einer Brennweite von 57 mm.

2. Auswahl eines geeigneten Messsystems

Zur Analyse der entstehenden Strukturen bietet sich aufgrund der oben genannten Vorteile die Wahl eines optischen Messverfahrens an. Für die durchgeführte Studie haben sich konfokale Messsysteme gegenüber anderen optischen Verfahren als vorteilhaft erwiesen. Diese messen senkrecht zur Oberfläche des Objektes. Im Gegensatz zu Triangulationsverfahren tritt keine

Abschattung an Kanten auf. Zudem ist bei der Triangulation eine hohe Tiefenauflösung nur durch entsprechend große Winkel möglich. Ebenfalls senkrecht zur Oberfläche arbeiten interferometrische Messverfahren. Sie besitzen eine höhere Auflösung entlang der Messachse, können allerdings nur auf hoch reflektierende Oberflächen angewendet werden.

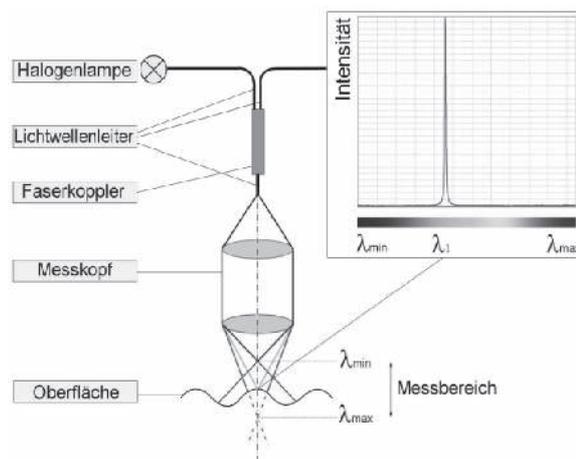


Abb. 1: Aufbau eines chromatischen Sensors [6]: Über ein Linsensystem wird gezielt ein chromatischer Fehler erzeugt, der den Fokusbereich wellenlängenabhängig aufspaltet. Die Wellenlänge, für die sich das Objekt im Fokus befindet, wird am stärksten zurückgestreut und kann mittels eines Spektrometers detektiert werden. Sie ist ein Maß für den Abstand.

Konfokale Messsysteme arbeiten mit der Abbildungsgleichung. Eine Punktlichtquelle beleuchtet den Messpunkt. Befindet sich dieser Punkt im Fokus des Systems, ist die Detektorintensität am höchsten. Chromatische Sensoren nutzen zudem den Farbfehler eines Linsensystems aus. Dieser sorgt dafür, dass der Fokus wellenlängenabhängig variiert, da blaues Licht stärker gebrochen wird als rotes. Die Objektoberfläche streut das Licht in alle Richtungen. Da der optische Weg umkehrbar ist, wird der Messpunkt der Oberfläche über das Linsensystem erneut abgebildet. Die Wellenlänge, für die sich die Objektoberfläche im Fokus befindet, wird am stärksten vom Linsensystem wieder eingefangen und kann über ein Spektrometer analysiert werden. Sie ist damit ein Maß für den Abstand, s. Abb. 1.

Durch unterschiedliche Linsenkonfigurationen lassen sich verschiedene Messbereiche und entsprechende Auflösungen erzielen.

Bei dem chromatischen Sensor handelt es sich um einen Punktsensor. Um eine Oberfläche zu vermessen, muss die Probe unter dem Sensor verfahren werden. Für die vorliegende Testreihe wurde dies mit einer x/y/z-Verfahreinheit gelöst, welche über Schrittmotoren angesteuert wird. Über eine Schnittstelle werden die Messdaten mit den Achskoordinaten gekoppelt, um die komplette Oberflächeninformation zu erhalten.

Über das Achssystem kann zudem das Werkstück zwischen Lasersystem und Messsystem bewegt werden. Somit ist eine quasi-online-Messung, ohne den Verlust der Bezugskoordinaten, möglich.

3. Analyse von Prozessparametern

Mit der Kopplung des chromatischen Sensors über ein Achssystem an eine Pikosekundenlaseranlage wird das Analysieren von Prozessparametern vereinfacht. So ist es möglich, die generierten Strukturen über eine Bildverarbeitung „quasi-online“ auszuwerten. Interessant hierbei sind beispielsweise entstehende Rand- oder Untergrundstrukturen. So ergeben sich werkstoffabhängige Flankenstrukturen: Kanten an Keramiken sind abgerundeter (Abb. 2), an metallischen Proben sind sie geneigt.

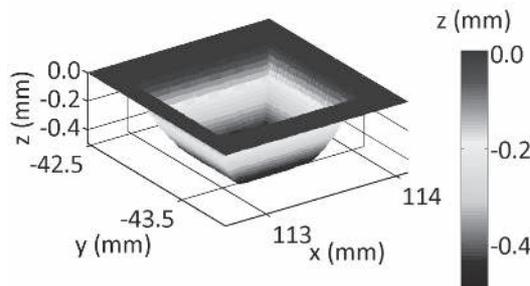


Abb. 2: 3D Ansicht einer mittels Picksekundenlaser bearbeiteten Keramik. Die unterschiedliche Färbung zeigt eine abgerundete Kantenstruktur.

Bei metallischen Werkstücken entstehen häufig Randvertiefungen, die tiefer sind als das eigentlich erzeugte Tiefenplateau. Die Analyse unterschiedlicher Laser- und Werkstückparameter konnte beispielhaft demonstriert werden.

Steigende Rauigkeiten am Strukturgrund können je nach Auflösung des Messsystems nur schwer ermittelt werden. Allerdings lässt sich durch die Streuung der Messwerte um den Tiefenwert eine Veränderung ermitteln. Hierzu werden die Häufigkeiten der auftretenden Messwerte in einem Histogramm dargestellt. Durch das Vergleichen der Messwertstreuungen im Bereich der Oberfläche und des Strukturgrunds ergeben sich Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Rauigkeiten. Sie zeigen sich im Histogramm durch unterschiedliche breite Peaks, s. Abb. 3.

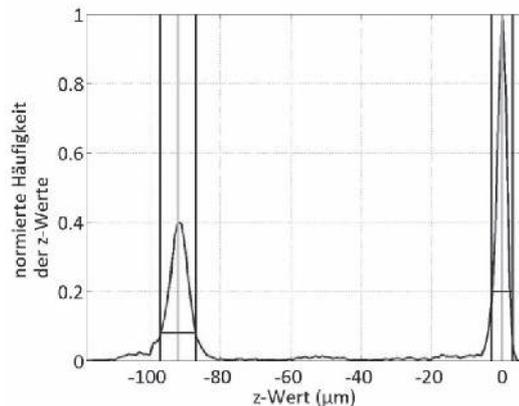
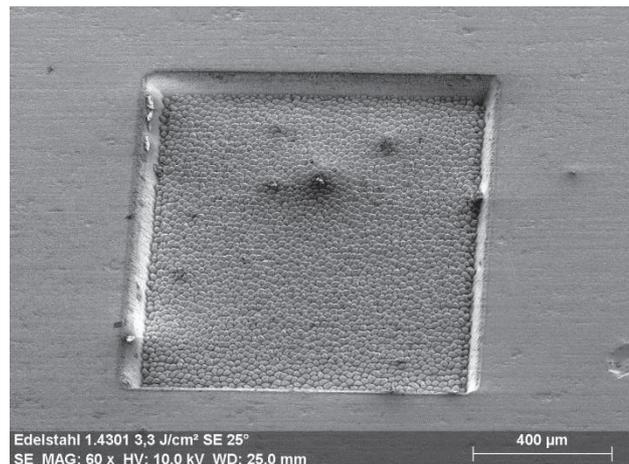
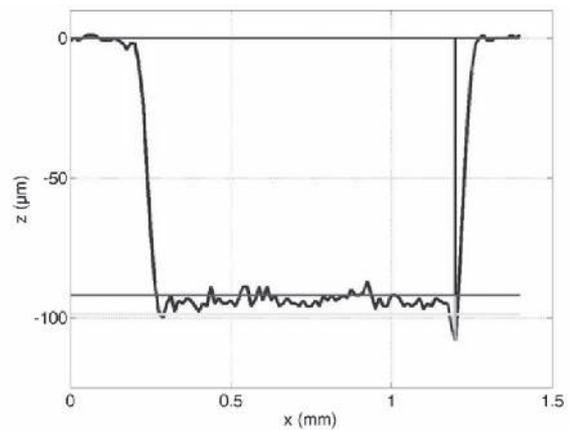


Abb. 3: Beispiel einer metallischen Abtragsstruktur. Die Schnittdarstellung (oben) zeigt Randvertiefungen und eine raue Untergrundstruktur, wie sie auch im REM-Bild (mitte) zu sehen ist. Des Weiteren zeigen sich im Histogramm (unten) unterschiedlich breite Peaks, die ebenfalls auf einen rauen Untergrund hinweisen.

Durch wiederholtes Strukturieren und anschließendes Vermessen einer vorgegebenen Kontur, beispielsweise eines Rechtecks, kann eine Abtragskurve erstellt werden. In dieser werden die Abtragstiefen der Anzahl an Strukturierungsdurchläufen gegenübergestellt. Da Sensor, Laser und Achssystem zentral über einen PC gesteuert werden, ist es so möglich Abtragskurven automatisch zu erstellen, s. Abb. 4.

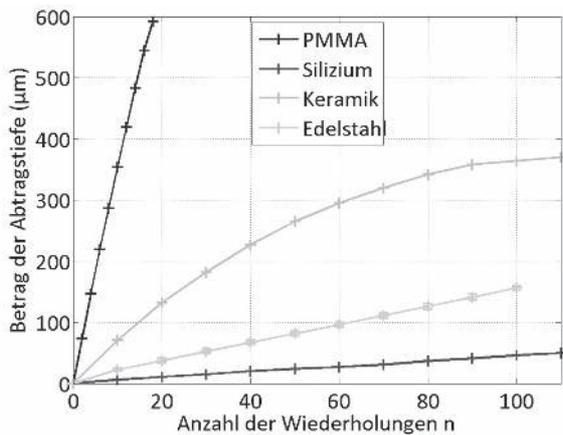


Abb. 4: Durch die Kopplung von chromatischem Sensor und ps-Laser lassen sich Abtragskurven vollautomatisch erstellen, wie hier am Beispiel von vier Werkstoffen dargestellt [7].

4. Erzeugung von Mikrostrukturen

Anhand der gespeicherten Abtragskurven kann jeder gewünschten Strukturtiefe ein Parametersatz zugeordnet werden. Dieses ist ein wichtiger Schritt bei der maßgenauen Übertragung von CAD-Daten in eine reale Struktur. An dieser Stelle sollen die Möglichkeiten mittels einer einfachen Treppenstruktur demonstriert werden, s. Abb. 5.

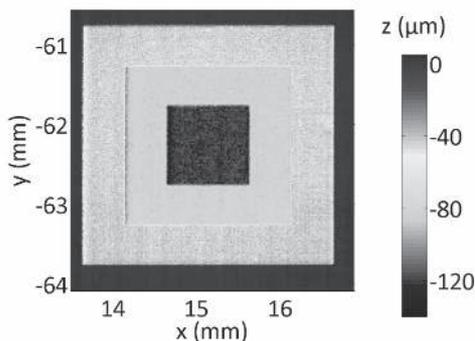


Abb. 5: Erzeugte Treppenstruktur, deren Anzahl an Wiederholungen durch eine Abtragskurve vorgegeben wurde.

Nach der Laserstrukturierung kann die generierte Struktur ebenfalls vermessen und mit der CAD-Vorlage verglichen werden. Im Differenzbild werden Abweichungen zur Vorlage sichtbar, s. Abb. 6. Diese liegen ausschließlich an den jeweiligen Kanten zur nächsten Ebene und sind begründet in der unzureichenden Möglichkeit, senkrechte Flanken zu erzeugen.

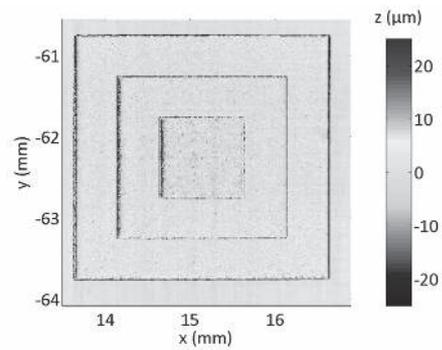


Abb. 6: Differenzbild von Modell und produzierter Struktur. Anhand der dunklen Bereiche an den Kanten der Stufen zeigt sich, dass dort noch Abweichungen auftreten.

Darüber hinaus können auch Vorlagen mit dem Messsystem erfasst und als Positiv oder Negativ Kopie in unterschiedlichste Materialien übertragen werden.

5. Zusammenfassung

Durch die Kombination von Oberflächenmesssystemen und Pikosekundenlaser können erzeugte Strukturen unmittelbar vermessen werden. Die Automatisierung von Prozessabläufen erleichtert dabei die Analyse der Wirkung von Prozess- und Werkstoffparametern. Systematische Analysen können so im großen Umfang durchgeführt werden. Anhand der gewonnenen Parameterdatenbanken können Oberflächen präzise erzeugt und analysiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann: *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*. Appl. Phys. A , 63, 109-115 (1996).
- [2] R. Poprawe: *Lasertechnik für die Fertigung*. Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [3] U. Engelhardt: *Methoden zur Vermeidung von Nebeneffekten bei der Mikrobearbeitung mittels Pikosekundenlaser*, LFM, Steinfurt, 2011.
- [4] D. Ferger: *Topografiemessung von Mikromerkmalen*, Hanser Verlag, München, 2012.
- [5] P. Klinger, G. Häuser: *On-Line Ablation Measurement for Laser Material Processing and its Applications*. University of Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2002.
- [6] Precitec Optronik GmbH: *Bedienungsanleitung Optischer Sensor CHRcodile S. Rodgau*, 2010.
- [7] M. Smarra: *Kopplung eines chromatischen Sensors an eine Pikosekundenlaseranlage*, LFM, 2011.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF POLYMER PHOTONIC SENSORS AND DEVICES

Patricia Scully^{1,2}, Mohammed Akmez Nabeerasool^{1, 2}, Phyllis Fiadzomor^{1,2},
John Vaughan^{1,2}, Nurgie Nurgiyatna³,
Christine Brown-Wilson⁴, Med Benyezzar¹, Bruce Grieve³, Krikor Ozanyan^{1,3}
¹Photon Science Institute, ²School of Chemical Engineering and Analytical Science,
³School of Electrical and Electronic Engineering, ⁴School of Nursing, Midwifery and Social Work.
The University of Manchester, Oxford Road, Manchester, M13 9PL, UK.

This presentation focuses on recent polymer optical sensors and devices developed at The University of Manchester to measure a range of parameters, and their applications. The devices have been sensitised with functional coatings for evanescent sensing of pH, moisture, glucose and H₂ gas detection, or by laser or mechanical inscription to create waveguide and diffractive structures that can sense external measurands. Polymer chemically sensitive coatings have been designed to clad polymer optical fibres to sensitise them to a measurand to affect the evanescent field and thus the light guided within the fibre.

1. Introduction

Polymer optical sensors and devices have been developed at The University of Manchester to measure a range of mechanical and chemical parameters. For the sensors reported here, the 1mm diameter, step index, polymer optical fibres (POF) have been sensitised with functional coatings to enable evanescent sensing of pH, moisture, and hydrogen gas detection. Polymer chemically sensitive coatings have been designed to clad polymer optical fibres to sensitise them to a measurand to affect the evanescent field and thus the light guided within the fibre. Mechanical and optical coupling of substrates to the fibre has been optimised to sense deformation.

Current applications that will be described in detail include:

- Palladium coated hydrogen sensor that is immune to humidity variations.
- SensorMat to measure gait and footfall for healthcare technology applications.
- Distributed sensing for soil monitoring and e-Agriculture.

2. Hydrogen Sensor

A Palladium coated PMMA (Poly Methyl Methacrylate) optical sensor was evaluated to define its response to ambient humidity and temperature. The sensor has an estimated lower detection limit of 15 ppm hydrogen and can detect hydrogen down to 1% in 80% Relative Humidity. Cross sensitivity tests have shown that the sensor shows limited response to 25 ppm H₂S and 50 ppm CO.

On exposure to Hydrogen, Palladium undergoes a chemical change to form Palladium hydride. This process is reversible and depends on the thickness of the Palladium layer on the substrate. The novel aspect of the sensor was that, unusually for Palladium, it was unaffected by humidity, enabling it to detect hydrogen releases into wet environments at the low concentration of 0.35%, limited by the flow rate of mass flow controllers used and the volume of

the gas flow chamber used to characterise the sensor. The sensor response time to detect a change 9.1% H₂ in transmission was 6s and 7.2s in reflection.

For this sensor, the Palladium was coated onto a Poly methyl methacrylate (PMMA) substrate, interrogated using 1mm diameter polymer optical fibres so was an extrinsic sensor arrangement, but the Palladium could be coated directly on the fibre in a finalized version. Target applications for the proposed sensor are in environments where hydrogen releases are to be measured in damp conditions, such as fuel cell cabinets that are exposed to all weathers, industrial process plants, submarines that generate electricity from sea water, nuclear fuel power generation and decommissioning plants where spent fuel rods are stored in water cooling tanks.

The sensor shows limited response to Relative Humidity, H₂S and CO; and has the potential to detect hydrogen as low as 15 ppm. The robustness and reliability of the sensor has been tested and demonstrated by subjecting the sensor to extreme conditions (Relative Humidity 0-100%) and using the same sensor over 5 months. The final version of the sensor will involve the sputter coating of the end of a POF fibre with the appropriate Palladium thickness and using lower flow rate MFCs to further investigate the Limit of Detection of the sensor.

3. SensorMat

A plastic optical fibre (POF) sensor for imaging deformation of a 2-D surface in the form of a sensitized mesh of optical fibres integrated into a mat or carpet. This can measure the shape and pressure involved when a weight is placed on the mat. Healthcare applications include imaging the shape and size of pressure distributions, such as footprints or a prone body on the floor. This technology could be used to detect and record the positions of a step sequence (gait analysis), or whether an elderly person has fallen on the floor, or their motion and position during the day.

The sensor mat relies on Hough transform-based centre-of-mass imaging from data acquired with small area demonstrators using a fibre mesh. In this work, targeting the dynamic imaging of human footprints, we show results from small area prototypes using tomographic projections designed to reduce the bending-induced background which is not object-specific. Reconstructions of bare feet and shoes footprints have been implemented using a 2x1 m² demonstrator. Measurements are taken with red LEDs and photodiodes on each line integral and images are reconstructed using the iterative Landweber technique. The results are discussed in terms of the capability of such imaging technology to study variations in gait and walking patterns, as well as the footprint of a human body lying in various positions.

This technology is of interest for monitoring the mobility of elderly people, because the proportion of elderly people in the European population, is steadily increasing, making this age group the largest consumers of health and social care. Elderly people suffering from dementia, require ongoing support to maintain independent living within the community. Assistive technologies are required to reduce the cost of long term care and promote independence, improve safety and reduce caregiver stress; as well as for use in supported living environments to reduce accidents through surveillance; improve clinical care; and reduce staff burden. The technology needs to be user friendly, and monitor behaviour such as increased wandering or, agitation that is a precursor to a catastrophic event such as falling or elopement. However, sensor technology needs to be: unobtrusive; inexpensive; resistant to contamination by bodily fluids, able to measure a number of parameters simultaneously and communicate an adverse event in real-time, preventing further deterioration in a person's condition.

4. Soil Sensor

Sensitised Polymer Optical Fibre (POF) sensors have been developed to measure moisture and pH in a variety of environments; but this application in soil sensing and e-agriculture aims to monitor spatial differences around the root systems of developing plants. Mapping localised variations and temporal changes in moisture and pH provide a method for imaging soil behaviour and the effect of soil micro-organisms, enabling optimization of crop yield.

Tests were performed using water, foam, sand, and agricultural soil with moisture levels between 10 and 40% W/W, and pH range from 5 to 8 pH units using a length of polymer optical fibre (POF) with a decladded or sensitised region along its length. Continuous wave (CW) optical sources (either laser or LED based) were used to interrogate the fibres and each fibre type was characterised to demonstrate its response to moisture and pH.

By alternating various procedures which expose and then remove the decladded or sensitised fibres from the experimental measurement setup, high repeatability and measurement accuracy were demonstrated; providing an accurate means for deploying either single sensors as an array or interrogating distributed sensors using optical time domain reflectometry (OTDR).

Acknowledgements

Manchester Interdisciplinary Collaboration Research into Ageing (MICRA). University of Manchester EPSRC Knowledge Transfer Account and Additional Funding: Pathways to Impact, Syngenta, University of Manchester Photon Science Institute Pump Prime Fund.

LASER PATTERNING OF ORGANIC LEDs

Tino Petsch, Jens Hänel, Bernd Keiper, Maurice Clair, Christian Scholz
3D-Micromac AG, Technologie-Campus 8, 09126 Chemnitz, Germany

Abstract

OLED lighting is expected to be one of the fastest growing markets in the area of organic electronics. The state of the art production is mainly based on vacuum deposition processes, which, in order to simplify the material handling, will most probably be embedded in a roll-to-roll environment. While reducing the handling costs this also implies challenges to the patterning of the several OLED layers. Laser micromachining applying ultra-short pulsed laser sources has the potential to fully satisfy the requirements. Within this Paper the results of the investigations of the separate scribing steps P1, P2 and P3 will be presented.

OLED Beleuchtung wird als Markt mit höchsten Wachstumsraten im Bereich der organischen Elektronik angesehen. Die aktuelle Technik beruht dabei hauptsächlich auf Vakuumbeschichtungsprozessen, welche zur Vereinfachung der Materialhandhabung wohl in eine Rolle-zu-Rolle-Umgebung eingebunden werden. Neben der Reduzierung der Handhabungskosten sind damit auch Herausforderungen bei der Strukturierung der einzelnen OLED-Schichten verbunden. Die Lasermikrobearbeitung mittels Ultrakurzpulslaser hat das Potential, die Anforderungen vollständig zu erfüllen. In dieser Arbeit werden die Untersuchungsergebnisse der einzelnen Strukturierungsschritte P1, P2 und P3 vorgestellt.

1. Introduction

Organic LED (OLED) lighting is expected to be one of the fastest growing markets in the area of organic electronics in the following years [1]. One approach to satisfy the forecast demand is to move production for OLED lighting to a manufacturing chain embedded in a roll-to-roll (R2R) environment incorporating all the required process steps such as deposition techniques and patterning processes. While reducing the handling costs this also implies challenges to the overall production of OLED devices. While a sheet or batch wise production enables the use of static processes, such as mechanical scribing, for the generation of 2D patterns a continuously moving web is providing additional challenges – especially for the generation of scribes in cross web direction. For these patterning steps it is furthermore of utmost importance that they can be applied under different conditions, e.g. vacuum, and allow for a layer selective ablation with close to perfect results, what, in the case of OLED production, equals a minimization of particle generation and the bulge formation at the scribing edge as well as the avoidance of heat induced stress which could damage the interfaces and electrical properties of the multilayer systems.

The process of laser micromachining applying ultra-short pulsed laser sources has the potential to fully satisfy these requirements [2]. Within this paper the results of the investigations of 3D-Micromac AGs research and development department towards the realization of the separate scribing steps P1, P2 and P3 will be presented.

2. Experimental Setup

2.1. Laser setup

For the experiments an ultra-short pulsed picosecond laser with a pulse duration of < 12 ps and an M^2 of 1.5 was used. A wave length of 1064 nm with a maximum average power of 50 W and a maximum repetition rate of 1000 kHz was applied. Besides this

fundamental wavelength frequency conversion modules were integrated giving access to the frequency doubled wavelength 532 nm (maximum average power 25 W) and also the frequency tripled wavelength 355 nm (maximum average power 16 W).

All experiments were realised using high-performance galvanometer scanners in combination with appropriate f-theta lenses (focal length approx. 100 mm) achieving focal diameters of approx. 20 μ m at a speed of 1000 mm/s. The experimental results were evaluated using an optical microscope (Leica) and a Veeco DEKTAK 8 profilometer.

2.2. Layout of OLED device

The laser experiments were carried out using an OLED layout as depicted in fig. 1. The carrier substrate provided consisted of an aluminium foil with a thickness of 500 μ m. In order to avoid shorts the foil was passivated with an additional isolating layer (2 μ m). The bottom electrode (anode) was formed by a metal layer (100 nm) while the actual light emitting part was build of a multilayer small molecules stack (200 nm). The transparent top cathode consisted of a 15 nm metal layer.

For the generation of an OLED device three different scribes, shown in figure 1, are required. The first scribe (P1) isolates the back contact to generate separate cells. This scribe has very high requirements concerning the quality of the cut. For P1 it is essential that the isolating layer underneath is not damaged. It is furthermore necessary to avoid the generation of conducting particles or pikes at the edge of the scribe which later on could short the device or simply influence follow up process steps.

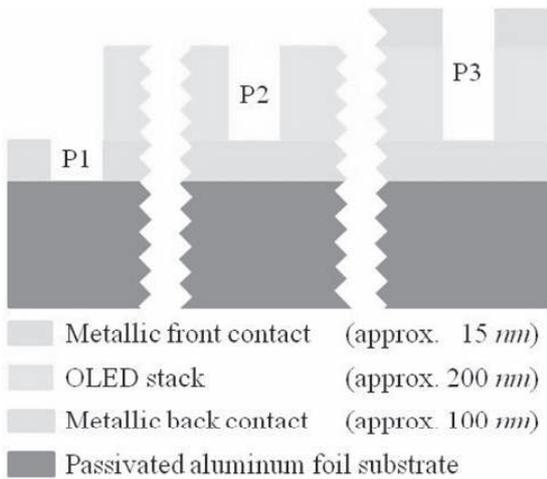


Fig. 1: Principle drawing of OLED layout and laser scribes

The P2 scribe is done after the deposition of the multilayer stack and supposed to uncover the back contact by fully ablating the organic stack. The main requirements for this scribe are a minimal heat affected zone which can potentially damage the stack and a bulge at the edge which is either very small (< 10 nm) or, in case this specification cannot be met, has a rounded shape with smooth transitions and a very low roughness. This is necessary as the thin front contact (15 nm) has to form a conducting layer on top of this bulge to achieve the wished contact to the back electrode. To finalize the electrical connection of the separate cells a third scribe (P3) is required. In this particular scribe the front contact needs to be cut to isolate the short generated during the deposition process. To achieve this isolation it is broadly accepted that the OLED stack below the laser cut can be damaged, a full ablation of this stack can even benefit the performance of the device. Particle generation and the generated bulge are judged to be less critical as long as they don't create shorts or damage of the front contact.

3. Results and discussion

3.1 P1 Scribe

The patterning trials for P1 were started with a wavelength of 1064 nm. In the course of these tests a processing window for the layer selective ablation could not be obtained. Before the thin metal layer could be ablated the ablation threshold of the aluminium substrate was exceeded, damaging both substrate and more importantly the passivation layer.

When applying a wavelength of 532 nm the result could be improved significantly. Some examples of the achieved scribes are shown in fig. 2 and 3.

Within the process window generated bulges were well below 20 nm at a maximum scribing speed of 4.000 mm/s. At the same time the amount and size of generated debris was judged to be acceptable as well as the achieved electrical isolation. Comparable results could be generated using a wavelength of 355 nm with the limitation of the bulge measuring up to 50 nm.

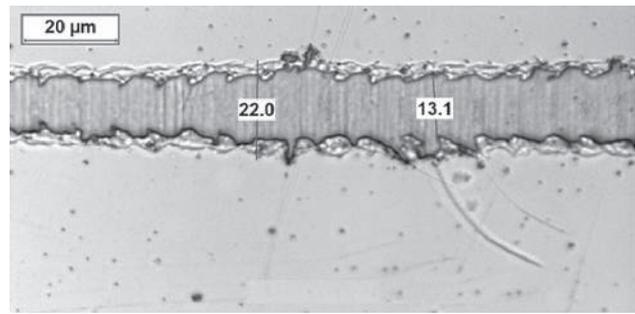


Fig. 2: Optical microscope image of a P1 scribe by ps-Laser with a wavelength of 532 nm.

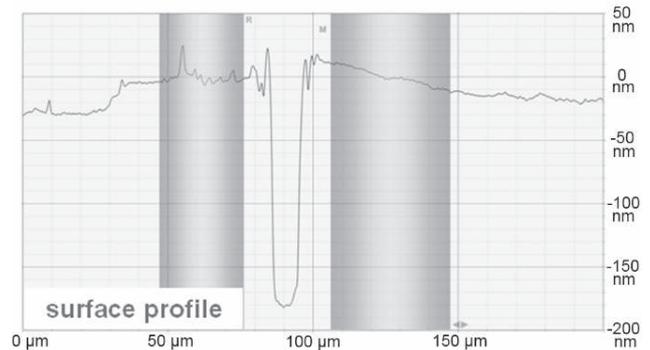


Fig. 3: Surface profile of a P1 scribe by ps-Laser with a wavelength of 532 nm.

3.1. P2 Scribe

When performing the P2 scribe good results could be demonstrated using a wavelength of 1064 nm. At a scribing speed of 2.500 mm/s an ablation with almost no bulge could be generated. The back electrode could however not be fully uncovered with this process.

This disadvantage could again be countered applying 532 nm. At scribing speeds of up to 7.000 mm/s the majority of the material could be removed, leaving only few areas of the back electrode covered (see fig. 4).

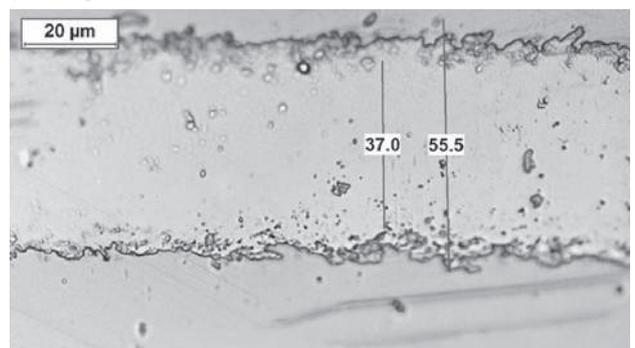


Fig. 4: Optical microscope image of a P2 scribe with a ps-Laser and a wavelength of 532 nm.

A view at the provided surface profile (see fig. 5) shows also that the edge of these scribes transitions very smoothly to the surface of the OLED stack with a bulge well below 10 nm.

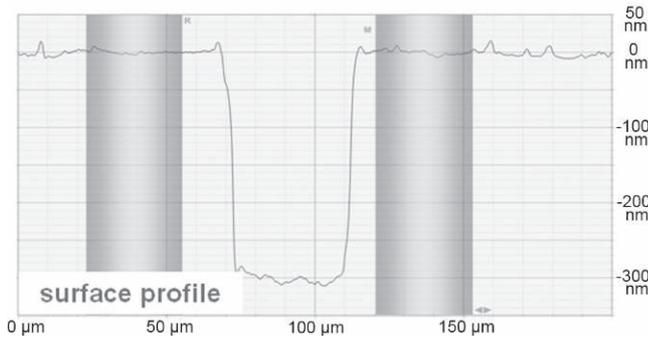


Fig 5: Surface profile of a P2 scribe with a ps-Laser and a wavelength of 532 nm.

The use of a wavelength in the UV range (355 nm) provided also very good results with scribing speeds up to 5.000 mm/s. In most cases the surface profiles showed no bulge at all but due to the Gaussian energy distribution in the beam and the absorption characteristics of the several materials in the stack a step wise ablation was achieved. Whether this effect has an influence on the device (be it positive or negative) could not be investigated thus far.

3.2. P3 Scribe

The tests on the P3 scribe were also performed using all three available wavelengths. Although a selective ablation of the front contact from the OLED stack underneath could not be achieved as intended, the machining results were very satisfying. Applying the fundamental wavelength a scribe with bulges less than 50 nm could be achieved with scribing speeds of up to 1.500 mm/s. For these scribes a stepwise ablation of the separate layers was also observed. In the outer reaches of the scribe the front contact was ablated from the OLED stack without significant damage to it. In the center of the scribe the OLED stack was also removed while not fully uncovering the back electrode - comparable to the results observed on the P2 scribe with this wavelength.

With maximum scribing speeds of 2.000 mm/s isolation cuts and bulges less than 20 nm along the edge the best results for the P3 scribe could, once more, be demonstrated using the frequency doubled wavelength of 532 nm. An example of these observations is shown in fig. 6 and 7 in which the metal front contact including the OLED stack could be fully removed while achieving a smooth cutting edge.

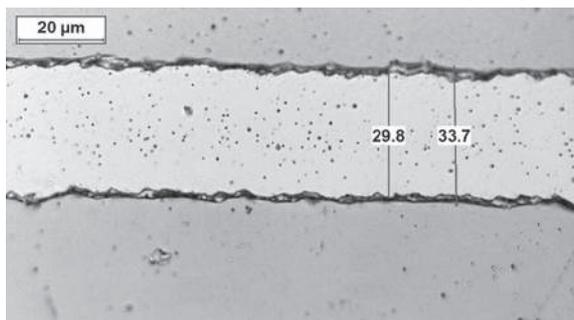


Fig. 6: Optical microscope image of a P3 scribe with a ps-Laser and a wavelength of 532 nm.

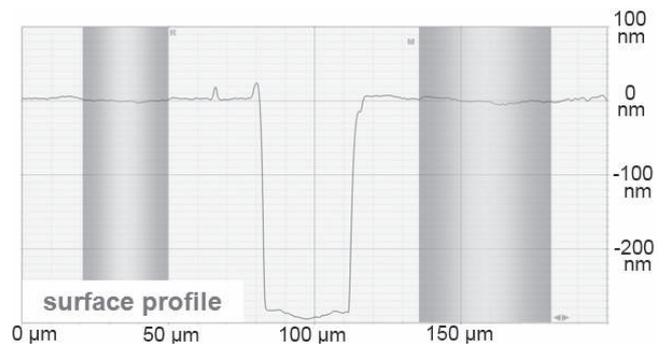


Fig 7: Surface profile of a P3 scribe with a ps-Laser and a wavelength of 532 nm.

The ablation of the metal front contact by use of 355 nm provided the worst results, compared to the other wavelengths. Generally spoken the ablation is based mainly on the introduction of energy to the OLED stack. This conclusion can be derived from experiments using low fluencies in which the OLED stack is fully removed whereas the thin metal layer is delaminated and blown away instead of ablated directly. These delaminated parts are very brittle and carry a high risk for later shorts. This effect could be countered by an increase of the fluency which led to bulges in the range of 50 nm to 100 nm.

4. Summary

It could be demonstrated that the necessary scribing steps P1, P2 and P3 can be achieved in a satisfying quality by the use of ultra-short pulsed lasers sources. In most of the experiments a ps-Laser with a wavelength of 532 nm is to be preferred for the micro machining of the material system at hand. Only in the case of the P3 scribe another wavelength (1064 nm) can be applied. Based on the parameters used for the experiments the currently optimal achievable scribing speeds using different optical systems and therefore limited to the available laser sources could be interpolated. For the P1 scribe this limit is set at approximately 8.000 mm/s, for P2 the limit is probably at 14.000 mm/s and for P3 the maximum is estimated to be around 4.000 mm/s.

Acknowledgements

The work presented in this paper has received financial support from the BMBF (German Federal Ministry of Education and Research) within the project no. 13N11062. We would like to thank all our partners in the aforementioned project.

References

- [1] Rahu Das, OE-A brochure 1st edition, 2006, pp. 7-8
- [2] D. Kanarkis; Mechanistic aspects of selective laser patterning multilayered thin-film structures in OLED fabrication, LOPEC 2010 proceedings, 2010

UNTERSUCHUNG ZUM ABTRAGSVERHALTEN VON OPTISCHEN GLÄSERN MITTELS UKP-LASERSTRAHLUNG

Sebastian Wächter¹, Jan Giesecke¹, Maria Friedrich¹, Manuel Harrantdt¹,
Christian Schindler², Jens Bliedtner², Volkmar Giggel³

¹ifw - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH, Otto-Schott-Str.13, D-07745 Jena;

²Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, FB SciTec, Carl-Zeiss-Promenade 2, D-07745, Jena;

³Carl Zeiss Jena GmbH, Carl-Zeiss-Promenade 10, D-07745, Jena

Für die Entwicklung neuer Produkte in Zusammenhang mit miniaturisierten asphärischen optischen Flächen stellt die konventionelle Fertigung solcher Freiformflächen zunehmend ein Problem dar. Auf Grund der nichtlinearen Absorption an transparenten Materialien verbunden mit athermischen Abtragsverhältnissen rücken die Ultrakurzpuls (UKP)-Laser für die Optikkfertigung dabei in den Blickpunkt des Interesses. Die Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung polierfähiger, präzisionsoptischer, freigeformter Bauelemente mittels UKP-Laserabtrag ist somit eine interessante Aufgabenstellung für die Zukunft. Mit einem 25W Lasersystem (<10ps) wurden Abtragsuntersuchungen an vier repräsentativen Vertretern optischer Gläser durchgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse stets vor dem Hintergrund der gesamten Prozesskette zur Herstellung von optischen Bauelementen hinsichtlich erreichbarer Rauheit, Formgenauigkeit und minimaler Tiefenstörungen bewertet. Als Resultat zeigt sich das Potential der UKP Laserbearbeitung zur Anfertigung von 2 ½ dimensional Oberflächen auf spröden und harten optischen Materialien.

Non-linear absorption and athermal ablation effects are two of the most attractive benefits of ultra short pulsed (USP) laser radiation for optics manufacturing. The conventional generation of complex shapes still is a challenging problem for engineers and constrains the outcome of new products and applications in combination with aspheric and freeform optical shapes. To create a process chain for these shapes based on USP will be the definition of task in future. We accomplished experiments with a 25W laser system (<10ps) and analysed ablation strategies on four representative optical glasses. Therefore dependent variables like roughness (RMS), sub surface damages (SSD) and irregularities (IRR) in terms of shape accuracy give suggestions for parametrical improvements. The investigation gives an insight in the potential of usp laser ablation for shaping 2 ½ dimensional surfaces on brittle and hard optical glasses.

1. Einleitung

Aktuelle Trends der Produktentwicklung wie Miniaurisierung, Effizienz und Funktionsintegration stehen in engem Zusammenhang mit dem Einsatz asphärischer, präzisionsoptischer Baugruppen, deren Fertigung mit traditionellen Mitteln jedoch zunehmend an Grenzen stößt.

Die Bearbeitung sprödharter optischer Materialien mittels Ultrakurzpuls (UKP) –Laser, gekennzeichnet durch athermische Abtragsverhältnisse ohne mechanische Krafteinwirkung und die Freiheit, nahezu jede Oberflächenkontur herstellen zu können, stellt eine interessante Alternative dar. Denkbar ist, den Formgebungsprozess von Optikkomponenten mit einem modifizierten UKP-Laserabtragsprozess zu realisieren und bestehende Fertigungsverfahren, wie das mechanische Feinschleifen, Mikrofräsen, US-Schleifen in der Prozesskette zur Herstellung polierreifer, präzisionsoptischer, freigeformter Bauelemente zu ersetzen.

Um eine Bewertung des Laserabtrages im Vergleich zum konventionellen Schleifen von optischen Bauelementen vornehmen zu können, muss der Laser als Werkzeug zunächst definiert werden. Dazu wurden an verschiedenen optischen Gläsern Ablationsschwelle und Abtragsrate bestimmt. Weiterhin wurden in Vorbereitung für nachfolgende Sliceprozesse, das Abtragsverhalten in Abhängigkeit von Fluenz und Anzahl der Überfahrten ermittelt. Die Ergebnisse wurden dabei stets vor dem Hintergrund der gesamten Prozesskette zur Herstellung von optischen Bauelementen hinsichtlich erreichbarer Rauheit,

Formgenauigkeit und minimaler Tiefenstörungen bewertet.

2. Versuchsanordnung

Im Allgemeinen gilt für UKP-Laser, je kürzer die Pulse, desto feiner erzeugbare Strukturen und desto geringer unerwünschte Nebeneffekte, je länger die Pulse, desto höher erzielbare Abtragsraten. Mit Hinblick auf die spätere Nutzung wurde für die anstehenden Untersuchungen ein Pikosekunden-System genutzt, mit welchem sich auch wirtschaftlich verwertbare Abtragsraten erzielen lassen.

Die Untersuchungen wurden mit einer Mikromaterialbearbeitungsanlage microSTRUCT vario /Fa. 3DMicromac, ausgestattet mit einem UKP-Laser HyperRapid 25 /Fa. Lumera (25W, 7...9ps), 5-Achs-System und Scannern für 1064nm und 355nm Wellenlänge durchgeführt.

Qualitative Bewertung und Messung von Abtrags-tiefe, Kontur und Rauheit erfolgten mit einem digitalen Messmikroskop Keyence VHX-1000 und Tastschnittgerät Taylor Hobson - FormTalysurf S2.

Für die grundlegenden Untersuchungen wurde mittels Scanner durch das Abfahren parallel versetzten Linien ein flächiger, rechteckiger Abtrag erzeugt, dessen Tiefe über die Anzahl an Wiederholungen variiert wurde. Ausschlaggebend für ein homogenes Abtragsergebnis ist ein gleichmäßiger Pulsabstand in Scannrichtung (Pitch) und von Spur zu Spur (Hitch). In Vorversuchen haben sich Pulsüberlappungen von 60...80% als günstig erwiesen. Da sich

der Pitch aus dem Quotienten von Scannvorschub und Repetitionsrate ergibt, kann das Parameterfeld auf Scannvorschübe von 500...1000mm/s und Repetitionsraten von 100...200kHz eingeschränkt werden.

3. Materialauswahl

Für die Untersuchungen wurden vier repräsentative Vertreter optischer Gläser ausgewählt. Es handelt sich um gefloatetes Borosilikatglas B33, Borosilikatglas N-BK7, Phosphatglas SFPL-51 und Bleiglas SF6.

Die Borosilikatgläser mit niedrigen Ausdehnungskoeffizienten und hoher thermischer Wechselbeständigkeit gehören zu den weitverbreitetsten optischen Gläsern. SF6 weist eine niedrige Transformationstemperatur auf und nimmt auf Grund der hohen Brechzahl eine Sonderstellung ein. Das Phosphatglas als Vertreter der nicht-silicatischen Gläser wird als Filterglas eingesetzt und weist eine geringere chemische Beständigkeit auf. Alle anderen gehören zur Gruppe der oxidischen Gläser.

Alle Versuchsgläser besitzen im Bereich zwischen 320-1100nm eine Transmission >92%, lediglich das SF6 hat im UV-Bereich eine nennenswerte Absorption.

4. Experimentelle Untersuchungen

Ablationsschwelle und Abtragsraten

Die Schwellfluenz, bei der der Ablationsprozess einsetzt, hängt neben dem Material auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Glases ab. Eine höhere Rauigkeit begünstigt das Einkoppelverhalten und senkt somit die Ablationsschwelle. Für die Untersuchungen wurden somit polierte ($R_q < 0,01\mu\text{m}$) und geschliffene ($R_q > 0,4\mu\text{m}$) Proben bearbeitet. Bei den im Folgenden ermittelten Fluenzen handelt es sich um die Ablationsschwelle, bei der ein gleichmäßiger flächiger Abtrag einsetzt. Auf Grund der durch Pulsüberlappung im Einwirkungsbereich bereits veränderten Oberfläche können diese Werte deutlich unter der Einzelpuls-Zerstörschwelle liegen.

Während sich die Ablationsschwellwerte der Gläser pro Wellenlänge ähneln, unterscheiden sich die Abtragsraten für die einzelnen Gläser stark. Auffällig ist, dass mit UV (355nm) und IR (1064nm) bei maximaler Leistung gleiche Abtragsraten erzielt werden, obwohl IR dabei mit der 2,5 fachen Fluenz einwirkt (Tabelle 2). Als Erklärung hierfür kann der nichtlineare Absorptionsmechanismus an transparenten Materialien, basierend auf Mehrphotonen- oder Tunnelionisation herangezogen werden. Da die Photonenenergie im UV ($E_p = 3,495\text{eV}$) nahezu 3 fach höher ist wie im IR ($E_p = 1,166\text{eV}$) wird im IR die entsprechend höhere Anzahl an Photonen benötigt.

Eine Ausnahme hierbei bildet das SF6, bei dem auf Grund des hohen Bleianteiles im Glas hiervon abweichende Absorptionsmechanismen wirken.

Oberfläche	1064nm		355nm	
	poliert	geschl.	poliert	geschl.
Borofl. 33	3	<2	0.75	<0.25
N-BK7	3	<1	<0.75	<0.25
S-FPL51	<3	<2	<0.25	<0.25
SF6	<2	<2	<1	<0.75

Tabelle 1: Ablationsschwellfluenz in J/cm^2

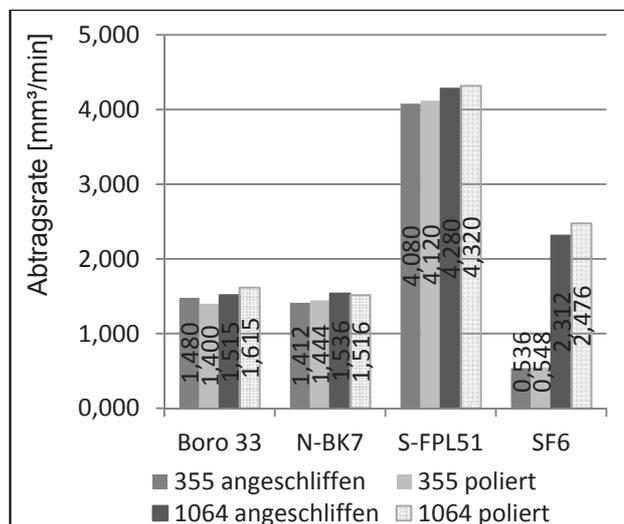


Tabelle 2: Abtragsrate je Wellenlänge bei max. Fluenz: 355nm @ $4\text{J}/\text{cm}^2$ und 1064nm @ $10\text{J}/\text{cm}^2$

Mit steigender Fluenz nimmt im linearen Verhältnis die Abtragsrate zu. Tabelle 3 zeigt dies stellvertretend für IR. Ebenso nimmt jedoch die Ablagerung von Sublimat zu, was beim wiederholten Abscannen der Flächen ein Problem darstellt, da die Laser-

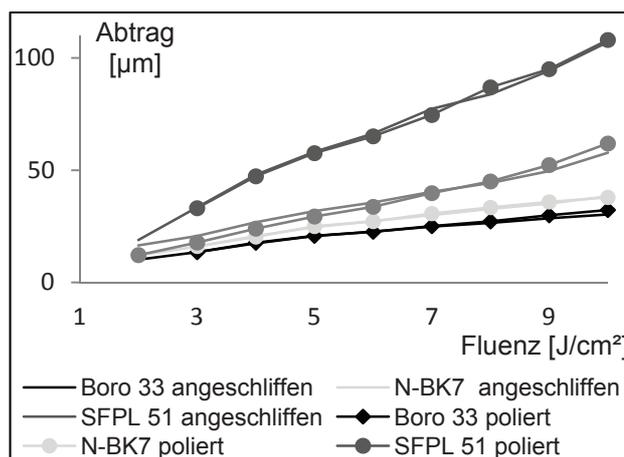


Tabelle 3: Abtrag in Abhängigkeit der Fluenz bei 1064nm

strahlung dadurch zum Teil absorbiert wird. Um dies zu vermeiden ist mit möglichst geringen Fluenzen zu arbeiten. Die folgenden Untersuchungen beschränkten sich deshalb auf Bearbeitung mit 355nm, weil bei geringen Fluenzen hier ein effektiverer Abtrag zu erzielen ist.

Einfluss Materialoberfläche auf Ablationsergebnis

Ausgehend vom prägnanten Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Ablationsschwellwerten wurde untersucht, inwieweit sich die Ausgangsrauheit auf die Rauheit der bearbeiteten Flächen auswirkt.

Es ist festzustellen, dass unabhängig von der Ausgangsrauheit des Glasmaterials, untersucht wurden polierte Oberfläche ($R_p < 0,005 \mu\text{m}$) und verschiedene Läppgrade ($R_p = 0,4 \mu\text{m}/1,2 \mu\text{m}/3,5 \mu\text{m}$), die Rauheit der bearbeiteten Flächen mit der Anzahl an Überfahrten sich einem Sättigungswert annähert, im vorliegenden Beispiel $R_p = 0,55 \mu\text{m}$ (Tabelle 4). Dabei gilt: bei Ausgangsrauheiten $<$ Sättigungswert wird letzterer bereits nach wenigen Überfahrten erreicht. Bei Rauheiten $>$ Sättigungswert bedarf es dazu deutlich mehr Überfahrten, wobei deren Anzahl tendenziell mit dem Rauheitswert steigt.

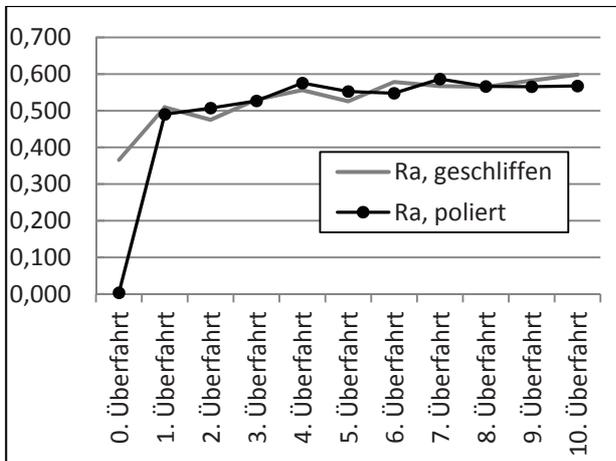


Tabelle 4: Oberflächenrauheit R_p auf Boro 33 Oberfläche entsprechend Anzahl Überfahrten mit Laser

5. Ergebnisse des optimierten Abtrages

Die weiterführenden Untersuchungen konzentrierten sich auf N-BK7, einem Standardmaterial für optische Komponenten.

Entsprechend der Zielsetzung „Anfertigung optischer Funktionsflächen“, wurde der UKP-Abtragsprozess hinsichtlich minimaler Rauheitswerte und Störtiefenschädigungen (SSD; sub surface damages) sowie konstanter Abtragsraten optimiert. Es wurden abweichende Parametersätze ermittelt, die nur einem Ordnungspunkt folgen: die Fluenz verringert sich mit zunehmender Nummerierung.

Bei den Rauheitswerten zeigt sich eine deutliche Parameterabhängigkeit des Sättigungswertes, welcher sich spätestens nach 40 Überfahrten einstellt (Tabelle 5). Tendenzuell gilt: je geringer die Fluenz, desto geringer die Rauheit, desto geringer aber auch die Abtragsrate (Tabelle 6). Dies erfordert bei späteren Anwendungen eine Entscheidung zu Gunsten von Qualität oder Quantität.

Für eine Konturerzeugung mittels Slice-Verfahren ist eine gleichbleibende, reproduzierbare Abtragsrate erforderlich. Die Konturtreue wird dadurch bestimmt,

wie exakt die Abtragsrate über den gesamten Bearbeitungsprozess dem vorab festgelegten Schnittebenenabstand des Modells entspricht. Wie der lineare Verlauf der Abtragstiefe in Tabelle 6 zeigt, erfüllen die ermittelten Parameter diese Anforderung. Voraussetzung hierfür ist eine zyklische Fokussachführung.

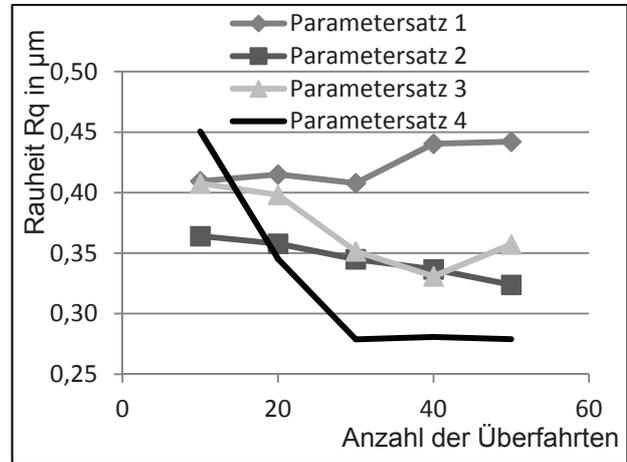


Tabelle 5: Parameterabhängige Tendenz für Oberflächenrauheit R_p entsprechend Laserüberfahrten

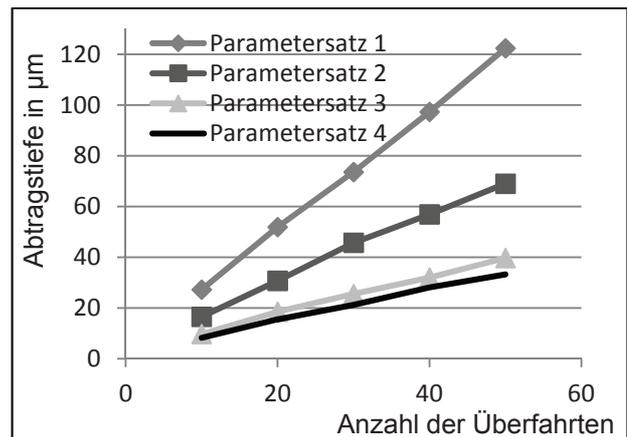


Tabelle 6: Parameterabhängige Abtragsraten entsprechend Laserüberfahrten

Eine weitere Zielgröße bei der Optimierung des Abtragsprozesses war eine minimale SSD-Schichtdicke. SSD sind vereinfacht ausgedrückt Mikrorisse im Strukturuntergrund, welche bei der Bearbeitung sprödharter optischer Materialien durch Schleif- und Läppprozesse und eben auch durch die UKP Abtragsprozesse entstehen. Da die SSD geschädigte Schicht komplett im nachfolgenden Polierprozess abgetragen werden muss, sind geringe SSD-Schichtdicken Zielvorgabe.

Die zuverlässigste Störtiefenanalyse besteht nach wie vor darin, das Material stufenweise bis in den SSD-freien Bereich auszupolieren. Nach jeder Politurstufe erfolgt Reinigung und Inspektion.

Bild 1 zeigt Ausgangszustand und 2 Politurstufen einer derartigen Analyse einer N-BK7 Probe, welche mit 30 Überfahrten flächig mittels optimierter Parameter abgetragen wurde. Die hierbei ermittelten

Störtiefen entsprechen mit $19\mu\text{m}$ in etwa denen, die beim Feinstschleifen entstehen.

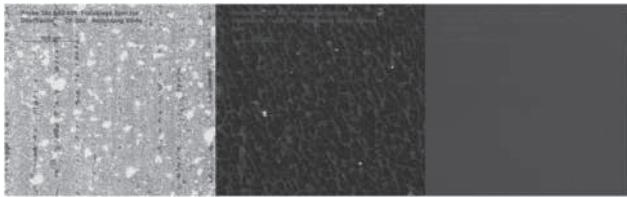


Bild 1: Störtiefenanalyse durch Auspolitur.
links: Fläche nach Laserablation, mittig: Abtragstiefe von $5\mu\text{m}$, rechts: SSD-frei nach $19\mu\text{m}$

6. Verifikation der Untersuchungsergebnisse

An zwei verschiedenartigen $2\frac{1}{2}$ D-Strukturen sollen die bisher gewonnenen Ergebnisse verifiziert werden.

In einer Glasronde $D=30\text{mm}$, N-BK7 wurde eine Kanalkontur, 15mm breit und $450\mu\text{m}$ tief erzeugt, die seitlich mit 30° Schrägen ausläuft. Die Kontur wurde durch 200 Überfahrten erzeugt. Die entstandene ebene Fläche weist einen Rauheitswert $R_p=0,47\mu\text{m}$ auf, was den Erwartungen entspricht. Bei den 30° Schrägen, gebildet durch die treppenartige Überlagerung der einzelnen Slice-Schichten war von besonderem Interesse, inwieweit sich alternierende Strukturen in der entstehenden Oberfläche ergeben und ob die Rauheit dadurch beeinflusst wird. Alternierende Strukturen konnten nicht nachgewiesen werden und die Rauheit betrug $R_p=0,5\mu\text{m}$.



Bild 2: flächiger Abtrag in Glasronde $D=30\text{mm}$



Bild 3: 3D Vermessung von Detail 1: 30° Schrägen

Im zweiten Beispiel wurde ein sphärischer Kugelausschnitt aus der Ebene durch Abtrag des umlie-

genden Materials herausgearbeitet. Von Interesse war hierbei die erzielbare Konturtreue. Beim Vermessen der entstandenen $2\frac{1}{2}$ D Kontur konnten zwar Formabweichungen von der geometrischen Vorgabe des Slice-Modells nachgewiesen werden, allerdings nur in einem geringen Maße. Angesichts dessen, dass dies die erste sphärische Kontur, erzeugt mit den für flächigen Abtrag optimierten Parametern war, ein vielversprechendes Ergebnis.



Bild 4: sphärische Linse, herausgearbeitet aus Ebene

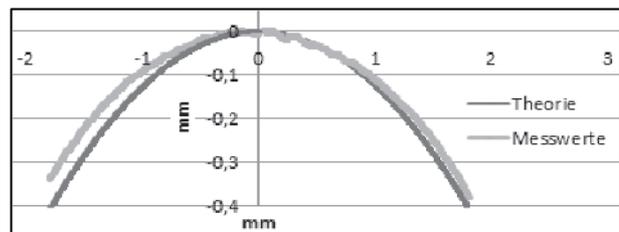


Bild 5: Formabweichung Soll-Ist der Linsenform

Die beiden abschließenden Experimente zeigen, welches Potential in der UKP-Laserablation als Werkzeug zur Bearbeitung optischer Glaswerkstoffe steckt und man dies in Zukunft durchaus als eine Alternative zum konventionellen Schleifen in Betracht ziehen kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Giggel, V.; Workshop on Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms: Process Chain for Ultra Precise Freeform Optic Components, 2010
- [2] Bliedtner, J.; Graefe, G; Hector, R; Optical Technologies, McGraw-Hill Companies Inc.; 2011
- [3] Schott AG – Advanced Optics; Optisches Glas - Glaskatalog; Schott; 2012
- [4] Brüning, S., E.; Berichte aus der Lasertechnik: Ultrakurzpuls-Laser zur 3D Mikrostrukturierung von Druck- und Prägeformen; Shaker Verlag; 2012
- [5] Schindler, C., et al.; SPIE Photonics Europe „Micro-Optics“: Controlled USP Laser Ablation Strategies for Shaping Optics; 2012
- [6] Dirscherl, Manfred. Ultrakurzpuls-Laser – Grundlagen und Anwendungen. Erlangen : s.n., 2005.

3D-MIKROSTRUKTURIERUNG VON QUARZGLAS MITTELS FEMTOSEKUNDENLASERSTRAHLUNG UNTERSCHIEDLICHER WELLENLÄNGEN

Andy Engel, Manuel Pfeiffer, René Böttcher, Steffen Weißmantel
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Es werden Ergebnisse der Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von hochreinem Quarzglas durch Bestrahlung mittels Ultrakurzpuls-Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen präsentiert. Für die Untersuchungen wurde eine Femtosekundenlaseranlage mit einem integrierten Clark-MXR CPA 2010 (Lasersystem: Wellenlänge 775 nm, 387 nm bzw. 258 nm, Repetitionsrate 1 kHz, Pulsdauer < 200 fs) genutzt. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die Bestimmung der erzielbaren Qualität (z.B. Oberflächenrauheit) der eingebrachten Mikrostrukturen in Abhängigkeit von den applizierten Laserstrahl- und Prozessparametern (Wellenlänge, Fluenz, Pulsüberlappungsgrad usw.). Auf Grundlage der durchgeführten Abtragsuntersuchungen erfolgten die Optimierung der Strukturierungsparameter und die Erstellung von 3D-Demonstratorstrukturen zur Verdeutlichung der erzielbaren Qualität der Mikrostrukturen. Als Demonstratorstrukturen wurden Pyramiden, Halbkugeln, Kegel und Zylindergeometrien ausgewählt. Die Entfernung des, prozessbedingt auf der Materialoberfläche verbleibenden, Debris erfolgte durch eine nasschemische Nachbehandlung der laserstrukturierten Proben.

1. Einleitung

Quarzglas ist aufgrund seiner Beschaffenheit unter die Materialien mit hohen Energiebandlücken (wide bandgap Material) zu zählen. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen handelt es sich speziell um hochreines Quarzglas mit der Bezeichnung Corning 7980 HPFS Standard-Grade. Mit einer Energiebandlücke zwischen dem Leitungs- und Valenzband von 9 eV [1] ist es für die Wellenlänge von 775 nm nahezu vollständig transparent. Die Photonenenergie bei dieser Wellenlänge beträgt nur 1,6 eV. Eine Bearbeitung mit dem Femtosekundenlaseranlage ist aufgrund der ultrakurzen Laserstrahlungspulse mit einer Pulsdauer von 150 fs dennoch möglich. Bei diesen ultrakurzen Laserstrahlungspulsen und den daraus resultierenden sehr hohen Spitzenleistungen von bis zu 6,7 GW setzen in dem wide bandgap Material nichtlineare Absorptionsmechanismen (Multiphotonenabsorption) ein, in deren Folge es zu einem Materialabtrag kommt. Die, bei diesen Versuchen zur Verfügung stehende, Femtosekundenlaseranlage bietet außerdem die Möglichkeit der Frequenzverdopplung und -verdreifung. Durch die Frequenzkonversion ist eine Erhöhung der mittleren Photonenenergie möglich, wodurch für den Ionisationsprozess der Materialien weniger Photonen benötigt werden. Wird die Frequenz verdoppelt, also die mittlere Wellenlänge λ halbiert, wird nur eine 3-Photonenabsorption benötigt um das Bandgap von 9 eV bei Quarzglas zu überbrücken. Im Fall von frequenzverdreifung reicht schon eine 2-Photonenabsorption aus.

Die Zielstellung der Untersuchungen war zum einem die Ermittlung grundlegender Abtragsparameter aber auch eine Beurteilung der Strukturqualität (Kantenqualität, Rauigkeitswerte, ...) bei den einzelnen, verfügbaren Wellenlängen.

Aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen sollten bei den einzelnen Wellenlängen dreidimensionale Mikrostrukturen erzeugt werden.

2. Experimentelle Vorgehensweise

Die Herstellung der komplexen 3D-Mikrostrukturen erfolgt durch schichtweisen Abtrag. Hierfür wird ein der Strukturgeometrie entsprechendes, konstruiertes 3D-Modell mit Hilfe einer Konvertersoftware in einzelne Schichten zerlegt, welche anschließend an der Femtosekundenlaseranlage umgesetzt und abgearbeitet werden können. In Abhängigkeit der an die resultierende 3D-Struktur gestellten Anforderungen, ist es notwendig, die Strukturierungsparameter auf der Grundlage von im Vorfeld ermittelten Abtragswerten auszuwählen. Im Fall der durchgeführten Abtragsuntersuchungen wurden quadratische Testfelder mit einer Kantenlänge von 400 μm x 400 μm und mit vier Abtragschichten erzeugt (siehe Abb. 1).

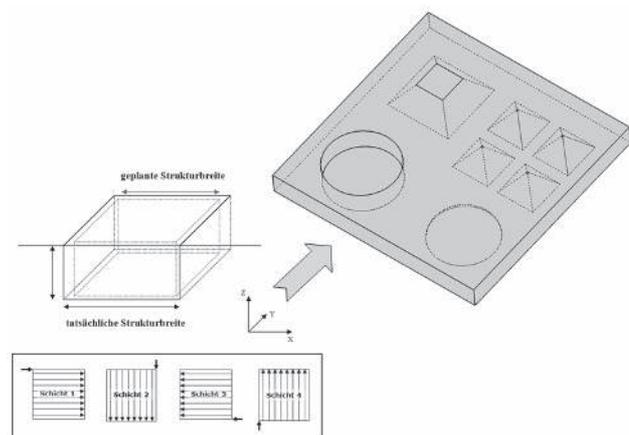


Abb. 1: Schematische Darstellung für die Erzeugung von dreidimensionalen Mikrostrukturen.

Die Auswertung der Proben erfolgte mittels taktiler Oberflächenprofilometrie und lieferte u.a. die gemittelte Abtragtiefe pro Schicht, die mittleren Rauigkeitswerte R_a am Strukturgrund und den Struktur-Offset, welcher aufgrund der geometrischen Ausdehnung des Laserstrahls entsteht und bei der späteren 3D-Mikrostrukturierung zur Einhaltung der Maßvorgaben mit berücksichtigt werden muss.

3. Experimenteller Aufbau

Für die Versuche wurde eine Femtosekundenlaseranlage FS-150-10 der Firma 3D Micromac AG (Chemnitz) mit einem integrierten Femtosekundenlaser vom Typ Clark-MXR CPA 2010 der Firma Clark-MXR INC. (USA) verwendet [2]. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

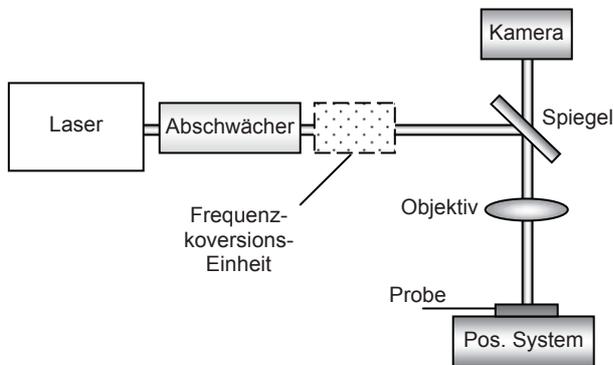


Abb. 2: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus für die Erzeugung von 3D-Mikrostrukturen durch Femtosekundenlaserstrahlungspulse.

Die Strukturierungsversuche zur Erzeugung von 3D-Mikrostrukturen erfolgten ausschließlich mittels Fokusabtragsverfahren. Die Probe wird dafür über ein Positionierungssystem unter einem stationären Laserstrahl bewegt. Der Fokus der Laserstrahlung liegt zu Beginn der Strukturierung auf der Probenoberfläche und wird dann von Schicht zu Schicht nachgeführt. Die Positioniergenauigkeit der hierfür eingesetzten X-Y-Koordinatentische beträgt $0,1 \mu\text{m}$. Das Zustellungssystem (Z-Achse) für das Objektiv und somit der Fokusslage besitzt eine Positioniergenauigkeit von $1 \mu\text{m}$. Weitere Laser- und Anlagenparameter bei der Nutzung der Grundwellenlänge sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Laser- und Anlagenparameter ohne Frequenzkonversion.

Parameter	Wert
Wellenlänge λ	775 nm
Pulswiederholfrequenz f_p	1 kHz
max. Pulsenergie Q	1 mJ
Pulsdauer τ_H	150 fs
Brennweite Objektiv f	100 mm
Fokussdurchmesser \varnothing_{86}	41,6 μm

Die mittlere Grundwellenlänge des Lasersystems beträgt 775 nm und kann bei Bedarf durch Frequenzkonversion auf 387 nm halbiert bzw. auf 258 nm gedrittelt werden. Hierfür wird zusätzlich eine Komponente zur Frequenzverdopplung (Modell Cool Blue, Clark-MXR INC.) im Strahlengang implementiert. Die Laser- und Anlagen-

spezifikationen für die durchgeführten Untersuchungen mit frequenzverdoppelten Laserpulsen sind in der nachfolgenden Tabelle 2 und für frequenzverdreifachte Laserstrahlung in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2: Laser- und Anlagenparameter bei Frequenzkonversion (Frequenzverdopplung).

Parameter	Wert
Wellenlänge λ	387 nm
Pulswiederholfrequenz f_p	1 kHz
max. Pulsenergie Q	380 μJ
Pulsdauer τ_H	200 fs
Brennweite Objektiv f	100 mm
Fokussdurchmesser \varnothing_{86}	25,2 μm

Tabelle 3: Laser- und Anlagenparameter bei Frequenzkonversion (Frequenzverdreifung).

Parameter	Wert
Wellenlänge λ	258 nm
Pulswiederholfrequenz f_p	1 kHz
max. Pulsenergie Q	55 μJ
Pulsdauer τ_H	200 fs
Brennweite Objektiv f	60 mm
Fokussdurchmesser \varnothing_{86}	$\sim 15 \mu\text{m}$

Für die Auswertung der Mikrostrukturen wurden ein digitales Lichtmikroskop (VHX-100, Keyence) und ein Rasterelektronenmikroskop verwendet.

4. Grundlagenuntersuchung

Um einen Kompromiss zwischen Qualität und Produktivität bei der späteren 3D-Mikrostrukturierung erreichen zu können, wurden als Zielgrößen Abtragsraten von $1 \mu\text{m}$ oder $2 \mu\text{m}$ pro Schicht ausgewählt. Anlagentechnisch bedingt war es außerdem nur möglich vergleichbare 3D-Strukturgrößen zu erzeugen, wenn die Puls-zu-Puls-Distanzen d im Bereich zwischen $d = 8 \mu\text{m}$ und $d = 10 \mu\text{m}$ lagen. Eine Auswahl der ermittelten Abtragstiefen pro Schicht in Abhängigkeit von der Fluenz H bei Puls-zu-Puls-Distanzen von $d = 8 \mu\text{m}$ ist in Abbildung 3 dargestellt.

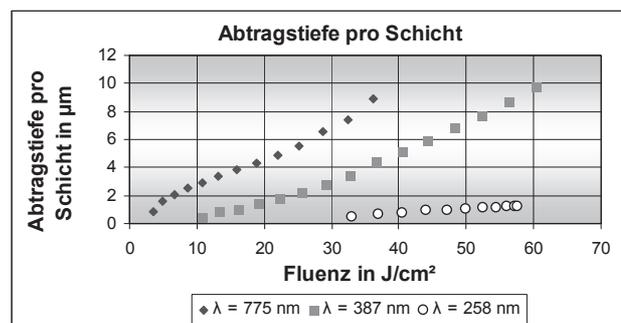


Abb. 3: Gemittelte Abtragstiefe pro Schicht von Corning 7980 HPFS Standard-Grade in Abhängigkeit von der Fluenz H und der verwendeten Laserstrahlwellenlänge.

Die in Abbildung 3 dargestellten Abhängigkeiten zeigen, dass mit abnehmender Laserstrahlwellenlänge bei gleichen Fluenzen deutlich geringere Abtragraten erreicht werden. Ursächlich hierfür ist, dass bei den unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedliche Objektive genutzt wurden (siehe Tabelle 1-3) und dadurch unterschiedliche Pulsüberlappungsgrade bei der Strukturierung resultieren. Im Fall von $\lambda = 775 \text{ nm}$ beträgt der Pulsüberlappungsgrad $\dot{U}_{\text{Puls}} = 69,7 \%$, bei $\lambda = 387 \text{ nm}$ beträgt $\dot{U}_{\text{Puls}} = 60,4 \%$ und für die Laserstrahlwellenlänge $\lambda = 258 \text{ nm}$ beträgt der Pulsüberlapp nur noch $\dot{U}_{\text{Puls}} = 35,5 \%$.

Ein Vergleich der Bodenbeschaffenheiten der Testfelder, welche mit unterschiedlichen Wellenlängen erzeugt wurden, kann aus den nachfolgenden Abbildungen 4-6 entnommen werden.

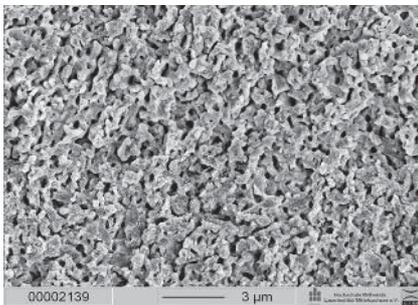


Abb. 4: REM-Aufnahme des Strukturbodens von Quarzglas (Strukturierungsparameter: $d = 10 \mu\text{m}$, $\lambda = 775 \text{ nm}$, $H = 3,56 \text{ J/cm}^2$). Die mittlere Rauigkeit betrug $R_a = 212 \text{ nm}$ bei einer Gesamtstrukturtiefe von $4 \mu\text{m}$.

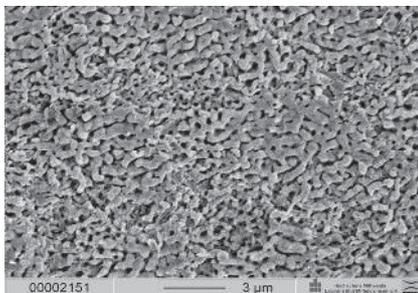


Abb. 5: REM-Aufnahme des Strukturbodens von Quarzglas (Strukturierungsparameter: $d = 8 \mu\text{m}$, $\lambda = 387 \text{ nm}$, $H = 26,89 \text{ J/cm}^2$). Die mittlere Rauigkeit betrug $R_a = 229 \text{ nm}$ bei einer Gesamtstrukturtiefe von $9 \mu\text{m}$.

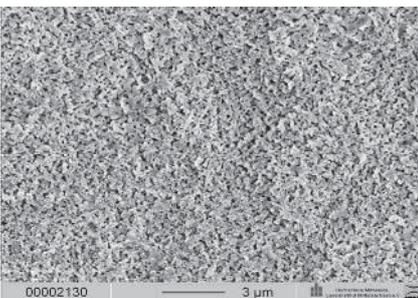


Abb. 6: REM-Aufnahme des Strukturbodens von Quarzglas (Strukturierungsparameter: $d = 8 \mu\text{m}$, $\lambda = 258 \text{ nm}$, $H = 57,67 \text{ J/cm}^2$). Die mittlere Rauigkeit betrug $R_a = 95 \text{ nm}$ bei einer Gesamtstrukturtiefe von $5 \mu\text{m}$.

Die Verwendung der Grundwellenlänge bewirkt eine relativ grobkörnige Bodenstruktur, die aber mit abnehmender Wellenlänge zunehmend feiner wird, was auch mit den einzelnen, ermittelten Rauigkeitswerten korrespondiert. Bei vergleichbaren Strukturturen erhält man bei Verwendung von frequenzverdreifachter Laserstrahlung gegenüber der Grundwellenlänge mindestens um Faktor 2 kleinere mittlere Rauigkeitswerte R_a .

5. Nachbehandlungsprozess

Um während der Strukturierung entstandenes, fest anhaftendes Debris zu entfernen, war es nötig die Testfelder und 3D-Mikrostrukturen in einer 1,7-molaren KOH-Lösung nachzubehandeln. Nach einer Nachbehandlungszeit von 30 Minuten ist das Debris vollständig entfernt, ohne dass dabei die Mikrostrukturen oder das Grundmaterial selbst beschädigt wurden (siehe Abb. 7).

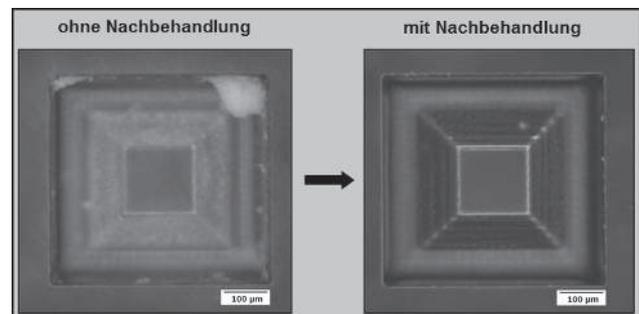


Abb. 7: Lichtmikroskopaufnahme einer mit KOH-Lösung nachbehandelten 3D-Mikrostruktur.

6. 3D-Mikrostrukturierung

Die für den Vergleich der Strukturqualität bei verschiedenen Wellenlängen angefertigten Mikrostrukturen haben eine Größe von $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ und eine Gesamttiefe im Bereich von ca. $90 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$. Für die Demonstratorstrukturen wurden beispielsweise Kugel-, Pyramidenstumpf-, Pyramiden- oder Zylinder-Geometrien ausgewählt. Die Auswahl der Strukturierungsparameter erfolgt auf der Grundlage der im Vorfeld durchgeführten Abtragsuntersuchungen.

Eine erzeugte 3D-Mikrostruktur für den Fall der Verwendung der Grundwellenlänge ($\lambda = 775 \text{ nm}$) ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Strukturierung wurden mit einem Transmissionsobjektiv mit einer Brennweite $f = 100 \text{ mm}$ durchgeführt, und die Strukturierungsparameter so gewählt, dass eine Abtragtiefe pro Schicht von $1 \mu\text{m}$ realisiert wird.

Im Allgemeinen konnten bei allen durchgeführten Parametervarianten die gewünschten Geometrieformen erzeugt werden. Bei der Verwendung der Grundwellenlänge konnte weiterhin festgestellt werden, dass es in den Randbereichen oder an den Strukturkanten der Mikrostrukturen zu unerwünschten Ausplatzungen mit Größen von bis zu $10 \mu\text{m}$ kommen kann.

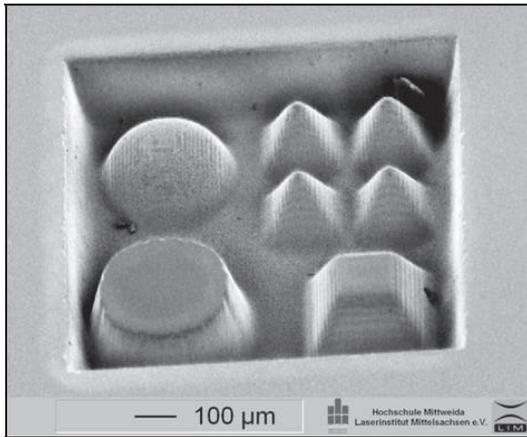


Abb. 8: REM-Aufnahme einer dreidimensionalen Mikrostruktur in Quarzglas (Strukturierungsparameter: $H = 4,23 \text{ J/cm}^2$ und $d = 10 \text{ µm}$, $\lambda = 775 \text{ nm}$, 90 Abtragschichten bei 1 µm Abtragstiefe pro Schicht).

Ein dreidimensionales Strukturierungsbeispiel, welches mit frequenzverdoppelter Laserstrahlung ($\lambda = 387 \text{ nm}$) erzeugt wurde, ist in Abbildung 9 aufgezeigt. Die Fluenzen auf der Probe bei dieser Wellenlänge wurden so gewählt, dass man eine Abtragstiefe pro Schicht von 2 µm erhält. Im Vergleich zu den Strukturen, welche mit der Grundwellenlänge erzeugt wurden, konnten Mikrostrukturen ohne Ausplatzungen hergestellt werden. Lediglich in einigen Randbereichen kam es in Folge des Strukturierungsprozesses noch vereinzelt zur Rissbildung.

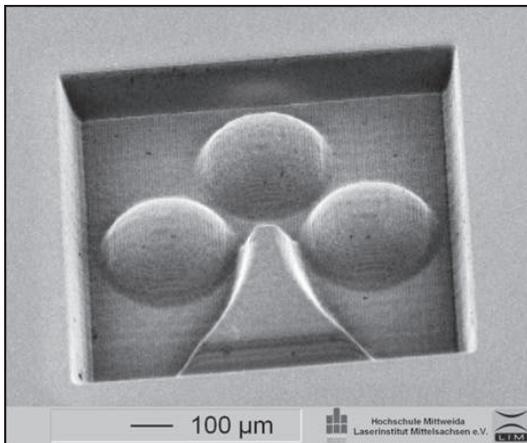


Abb. 9: REM-Aufnahme einer dreidimensionalen Mikrostruktur in Quarzglas (Strukturierungsparameter: $H = 23,85 \text{ J/cm}^2$, 50 Abtragschichten, Quarzobjektiv $f = 100 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ µm}$).

Bei den Mikrostrukturen, welche mit frequenzverdreifachter Laserstrahlung erzeugt wurden ($\lambda = 258 \text{ nm}$), konnten in den Randbereichen keine Ausplatzungen oder Rissbildungen festgestellt werden, wodurch sie, auch aufgrund der geringeren Rauigkeitswerte R_a am Strukturboden, dadurch im Vergleich zu den beiden anderen verwendeten Laserstrahlwellenlängen die besten Strukturqualitäten besitzen. Eine Verbesserung der Auflösung konnte dahingehend realisiert werden,

dass bei der Strukturierung ein Objektiv mit einer kleineren Brennweite verwendet wurde (siehe Tabelle 3). Ein Beispiel einer solchen Mikrostruktur ist in Abb. 10 aufgezeigt.

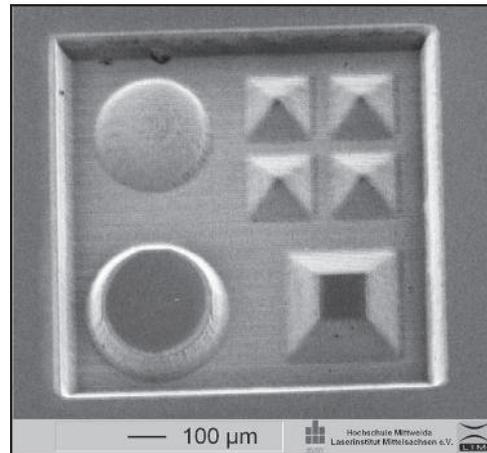


Abb. 10: REM-Aufnahme einer dreidimensionalen Mikrostruktur in Quarzglas erzeugt mit frequenzverdreifachter Laserstrahlung (Strukturierungsparameter: $\lambda = 258 \text{ nm}$, $H = 68,78 \text{ J/cm}^2$, 50 Abtragschichten, $d = 8 \text{ µm}$, Quarzobjektiv $f = 60 \text{ mm}$).

Zusammenfassung

An dem Material Quarzglas Corning 7980 HPFS Standard-Grade konnten bei Laserstrahlwellenlängen von $\lambda = 775 \text{ nm}$, $\lambda = 387 \text{ nm}$ und $\lambda = 258 \text{ nm}$ bei der Verwendung von Femtosekundenlaserstrahlungspulsen grundlegende Abtragsparameter ermittelt werden. Ausgehend davon konnten bei allen untersuchten Wellenlängen 3D-Mikrostrukturen erzeugt werden. Mit kleiner werdender Wellenlänge nehmen nicht nur die mittleren Rauigkeitswerte R_a am Strukturboden ab, ebenso verbessert sich die Qualität der Strukturanten hinsichtlich der Vermeidung von Ausplatzungen und Rissbildung. Durch eine Nachbehandlung in einer KOH-Lösung kann während der Strukturierung entstandenes, fest anhaftendes Debris vollständig entfernt werden ohne dabei die Mikrostruktur oder das Grundmaterial selbst zu schädigen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst, sowie dem Freistaat Sachsen für die finanzielle Unterstützung. Das Projekt wird durch Mittel des Europäischen Sozialfonds ESF finanziert.

Literaturverzeichnis

- [1] T. A. Laurence, J. D. Bude, et.al., Ultra-fast photoluminescence as a diagnostic for laser damage initiation; Boulder Damage Symposium (2009); 1-14
- [2] S. Weißmantel, et.al., In: Jahrbuch Oberflächentechnik; Band 64; Eugen G. Leuze Verlag; Bad Saulgau, Germany; ISBN 978-3-87480-245-1; (2008) 359–370.

FLUORLASERMIKROSTRUKTURIERUNG DIFFRAKTIVER OPTISCHER ELEMENTE IN QUARZGLAS

Michael Pfeifer, Falko Jahn, Steffen Weißmantel, Bernhard Steiger
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Die Fluorlasermikrobearbeitung ermöglicht die direkte Strukturierung diffraktiver optischer Elemente in Quarzglas, die zur Laserstrahlformung im weiten Wellenlängenbereich von 248 bis 1100 nm eingesetzt werden können. Demonstriert werden ausgewählte Phasenelemente zur Laserstrahlformung im sichtbaren Wellenlängenbereich. Des Weiteren wird ein Strahlformer für den KrF-Excimerlaser mit einer Wellenlänge von 248 nm vorgestellt. Theoretisch ist die Strahlformung mit nur einem diffraktiven optischen Element möglich, was den Strahlweg im Vergleich zur konventionellen Strahlformung mit Linsen und Spiegeln stark verkürzt. Die Fluorlasermikrostrukturierung bietet eine effektive Alternative zu Lithographieverfahren in Hinblick auf eine schnelle und kosteneffiziente Einzel- und Prototypenfertigung. Zudem ermöglicht sie die Bearbeitung von wide-bandgap Materialien.

1. Einleitung

Die Strahlformung mittels diffraktiver optischer Elemente (DOEs) gehört aktuell zu den Forschungsgebieten der Optik mit den größten Anwendungs- und Innovationspotentialen. Es wird zukünftig möglich sein, aus einem beliebigen Strahlprofil nahezu jede gewünschte Strahlverteilung zu formen. So ermöglichen DOEs die Homogenisierung von Excimerlaserstrahlen. Der Hauptvorteil gegenüber den aktuell genutzten Strahlhomogenisierungen auf der Basis von konventionellen Optiken ist deren viel kompaktere Bauweise. Des Weiteren sind speziell auf das Rohstrahlprofil angepasste DOEs denkbar, welche direkt die in der Bearbeitungsebene gewünschte Strahlgeometrie erzeugen, sodass keine Masken benötigt werden. Auf diese Weise kann die Laserleistung deutlich effizienter genutzt werden, da keine Strahlanteile verloren gehen.

Die Herstellung von einzelnen DOEs gestaltet sich derzeit aufwendig, da diese in mehreren Photolithographieprozessen erzeugt werden müssen, was ein hohes Maß an Positioniergenauigkeit erfordert. Die Fluorlasermikrostrukturierung eröffnet hier einen neuen Weg. Sie bietet eine schnelle und individuelle Methode zur kosteneffizienten Einzel- und Prototypenfertigung diffraktiver optischer Elemente, da beispielsweise im Vergleich zur Photolithographie keine speziellen Masken notwendig sind, die für jedes DOE neu angefertigt werden müssen. Im Falle von Strahlformern für die Excimerlaserwellenlängen 157 nm und 193 nm kommt vor allem Kalziumfluorid als Material für die DOEs in Frage, was aufgrund seiner Materialeigenschaften nur schwer mittels Lithographieverfahren strukturierbar ist. Die Fluorlasermikrostrukturierung bietet an dieser Stelle eine effektive Alternative.

2. Lasermikrobearbeitungsstation

Die Mikrostrukturierung erfolgt mittels einer vollautomatisierten hochpräzisen Mikrostrukturierungsstation, welche an der Hochschule Mittweida in Zusammenarbeit mit der Firma 3D-Micromac AG entwickelt und in Betrieb genommen wurde. In die Anlage ist der Fluorlaser LPF 220i der Firma Coherent GmbH integriert, welcher Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 157 nm, was einer Photonenener-

gie von 7,9 eV entspricht, bei einer maximalen Repetitionsrate von 200 Hz und einer Pulsdauer von 25 ns emittiert. Die maximale Pulsenergie beträgt 30 mJ. Aufgrund der Wellenlänge im VUV-Bereich muss die Strahlführung in sauerstofffreier Atmosphäre erfolgen. Dies zu ermöglichen, findet die Strahlformung und die Materialbearbeitung in zwei voneinander unabhängigen Vakuumkammern statt. Hierbei kann der Strahlengang bis auf einen Druck $< 1 \cdot 10^{-4}$ mbar und die Bearbeitungskammer im Bereich des Vorvakuums evakuiert werden. Anschließend werden die Kammern mit reinem Stickstoff (5.0) auf Normaldruck gefüllt. Dieser spezielle Aufbau bietet gegenüber einem spülenden System den entscheidenden Vorteil eines wesentlich geringeren Gasverbrauchs, da mit einer Füllung der Laserbetrieb für bis zu acht Stunden aufrechterhalten werden kann.

Die Lasermikrostrukturierung erfolgt mittels Maskenprojektionsverfahren. Hierbei wird die Maskengeometrie über ein aus fünf Linsen bestehendes Transmissionsobjektiv im Abbildungsmaßstab 26 : 1 auf die Substratoberfläche abgebildet. Die maximale Strukturgröße auf dem Substrat beträgt $225 \times 225 \mu\text{m}^2$ bei einem Auflösungsvermögen von $< 1 \mu\text{m}$. Größere Strukturen werden mit Hilfe des hochpräzisen Positioniersystems in der Bearbeitungskammer erzeugt. Durch den Einsatz von Reflexionsoptiken bei der Strahlhomogenisierung stehen für die Mikrostrukturierung Fluenzen von bis zu 7 J/cm^2 auf der Substratoberfläche zur Verfügung.

3. Grundlagen

Diffraktive optische Elemente sind optische Bauteile, denen das physikalische Prinzip der Beugung zu Grunde liegt. Bekannte Spezialfälle sind z.B. Amplituden- und Phasengitter.

Bei den im Folgenden betrachteten diffraktiven Phasenelementen (DPEs) wird ausschließlich die Phasenlage der einfallenden elektromagnetischen Welle moduliert. Die Phasenverschiebungen zwischen den Wellenfeldanteilen werden über unterschiedliche optische Weglängen generiert, welche durch eine Strukturierung des Substrates mit verschiedenen Höhenstufen erreicht werden. Dies führt zu den beabsichtigten Beugungseffekten und somit zur

Erzeugung definierter Beugungsbilder. Als Substratmaterial kommt aufgrund seiner guten Transmissionseigenschaften über einen weiten Wellenlängenbereich Quarzglas zum Einsatz.

Die Berechnung der DPEs basiert auf einer Variante der bekannten POCS-Methode (projection onto convex sets [1]), bei der im DPE- und im Bildraum die gegebenen Feldstärkeverteilungen als Randbedingungen adressiert werden. Sowohl die eingangsseitige Intensitätsverteilung als auch die Verteilung in der Zielebene, d.h. das Beugungsbild, müssen gegeben sein. Der Übergang zwischen den Räumen erfolgt jeweils mittels FOURIER-Transformation bzw. inverser FOURIER-Transformation. Dieses Verfahren ist als iterativer FOURIER-Transformations-Algorithmus (IFTA) in verschiedenen Variationen Stand der Technik [2]-[4]. Die Konvergenz dieses Algorithmus ist dabei von verschiedenen Parametern abhängig. Nach ca. 30 Iterationsschritten ist jedoch meist ein ausreichendes Ergebnis für die Phasenverteilung des gesuchten DPEs erreicht.

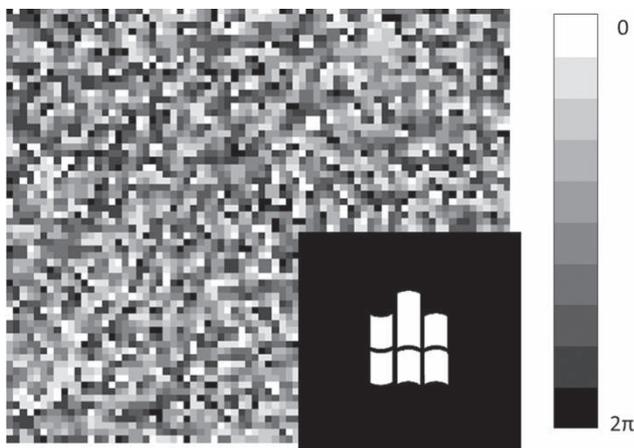


Abb. 1: Ausschnitt der Phasenverteilung und Zielstruktur eines neunstufigen DPEs zur Erzeugung des Logos der Hochschule Mittweida mit einer DPE-Größe von 128 x 128 Pixeln.

Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt einer solchen Verteilung. Jedem Grauwert der Darstellung ist eine definierte Phasenlage zugeordnet. Die Phasenverteilung ist aufgrund der unsymmetrischen Zielverteilung des IFTA vollkommen unregelmäßig.

Die ursprünglich quasikontinuierlich berechnete Verteilung wird sowohl in ihrer flächigen Aufteilung als auch bzgl. der möglichen Phasenlagen noch während des Algorithmus diskretisiert, wodurch die dargestellte pixelartige Struktur entsteht. Diese Diskretisierung ist durch die Eigenschaften der Herstellungstechnologie nötig. Ein Nachteil dieser Vereinfachung sind die in den Abb. 2a-c angedeuteten höheren Beugungsordnungen, die bei der Laserstrahlformung zu Leistungsverlusten führen.

Durch die Anwendung der FOURIER-Transformation als Propagationsoperator zwischen DPE- und Bildraum werden sogenannte FOURIER-Elemente berechnet, deren Beugungsbild grundsätzlich im Fernfeld in unendlicher Entfernung entsteht. Praktisch ist allerdings eine Entfernung ausreichend, die

sehr groß gegenüber der Pixelgröße ist. Zur quantitativen Bestimmung der Mindestentfernung sind in der Literatur beispielsweise durch [5] und [6] verschiedene Kriterien definiert.

In der praktischen Anwendung von DPEs zur beliebigen Strahlformung von Laserstrahlung ist meist eine feste Zielebene gegeben, in der das gewünschte Bild scharf erzeugt werden soll. Zusätzlich hinzugefügte Phasenterme ermöglichen die weitere Manipulation des Beugungsbildes. So bewirkt ein sphärischer Linsenterm die scharfe Entstehung des Bildes in der definierten Zielebene.

Mit Hilfe numerischer Simulationssoftware wird im Anschluss die tatsächliche Wirkung der berechneten Phasenverteilung simuliert. Dafür wird das Programm VirtualLab™ 5.3 der Firma LightTrans GmbH genutzt. Neben der Kontrollmöglichkeit bietet dies den Vorteil, dass der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das erzeugte Beugungsbild des DPEs untersucht werden kann. Auf diese Weise kann die kostenintensive Herstellung vieler verschiedener DPEs nach der Trial-and-Error-Methode entfallen.

Die Abb. 2a-c zeigen das simulierte Beugungsbild eines DPEs zur Erzeugung des Logos der Hochschule Mittweida in unterschiedlichen Entfernungen vom DPE. Die Phasenverteilung dieses DPEs enthält einen sphärischen Linsenterm mit einer Brennweite von 300 mm. Daraus resultierend, wird das Beugungsbild nur für eine Entfernung von 300 mm vom DPE scharf abgebildet. Die absolute Größe der erzeugten Struktur ist von der Entfernung vom DPE abhängig.

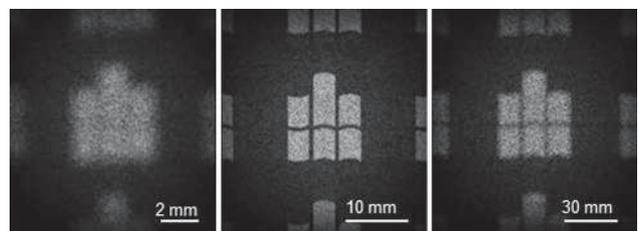


Abb. 2a-c: Simulation des Beugungsbildes eines neunstufigen DPEs zur Erzeugung des Logos der Hochschule Mittweida mit einer DPE-Größe von 256 x 256 Pixeln, einer Pixelgröße von $7,8 \times 7,8 \mu\text{m}^2$ und sphärischem Linsenterm mit einer Brennweite von 300 mm in unterschiedlichen Entfernungen vom DPE: a) 100 mm, b) 300 mm und c) 1000 mm.

Die ermittelten Phaseninformationen werden für jedes Pixel entsprechend der Designwellenlänge und der Brechzahl des Substrates in eine zu strukturierende Tiefe überführt. Die Fluorlasermikrostrukturierung der DPEs erfolgt unter Einsatz von Masken aus Tantalfolie mit quadratischen Öffnungen. Deren Größe wird so gewählt, dass die Bildgröße der Maske in der Bearbeitungsebene der Größe der zu strukturierenden Pixel entspricht.

4. Diffraktive Phasenelemente für $\lambda = 532 \text{ nm}$

Die Herstellung der DPEs erfolgte in Corning 7980 (Quarzglas). Sie sind neunstufig aufgebaut mit einer Strukturhöhe von 120 nm pro Stufe und für eine

Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$ berechnet. In Abb. 3 ist eine Mikroskopaufnahme eines DPEs zur Erzeugung des Logos der Hochschule Mittweida dargestellt.

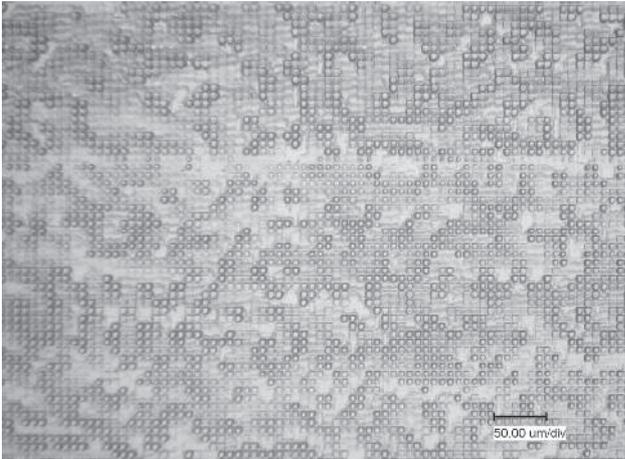


Abb. 3: Mikroskopaufnahme eines neunstufigen DPEs zur Erzeugung des Logos der Hochschule Mittweida mit einer DPE-Größe von 256×256 Pixeln und einer Pixelgröße von $7,8 \times 7,8 \mu\text{m}^2$.

Das Beugungsbild dieses DPEs in einer Entfernung von 1679 mm vom DPE ist in den Abb. 4a, b dargestellt.

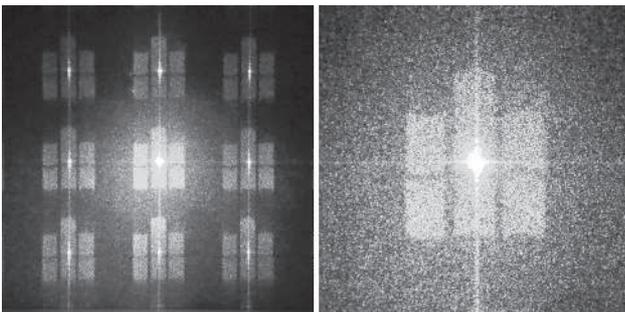


Abb. 4a,b: Beugungsbild des DPEs aus Abb. 3 in einer Entfernung von 1679 mm vom DPE.

Die Zielstruktur ist gut erkennbar, jedoch durch das Beugungsbild des Eingangslaserstrahls überlagert. Die Ursache hierfür liegt in einem überlagerten Gitter aufgrund von stehen gebliebenen Stegen zwischen den einzelnen Pixeln. Deren Entstehung kann prinzipiell verhindert werden. Die Ausbildung der höheren Beugungsordnungen ist in der räumlichen Diskretisierung der DPEs in Pixeln begründet. Dies zeigt sich bereits in der Simulation. Die Entstehung dieser Beugungsordnungen lässt sich nur durch einen kontinuierlichen Verlauf verhindern.

Das DPE aus Abb. 3 ist mit einer Bildentstehung im Unendlichen berechnet. Die Funktion eines DPEs mit Linsenterm zeigen die Abb. 5a-c. Dieses DPE unterscheidet sich vom zuvor dargestellten dadurch, dass es zusätzlich einen sphärischen Linsenterm mit einer Brennweite von 300 mm (vgl. Abb. 2a-c) enthält. Das Beugungsbild ist in unterschiedlichen Entfernungen vom DPE dargestellt.

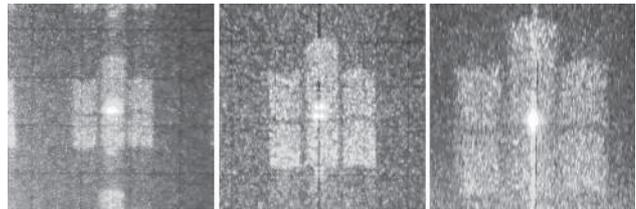


Abb. 5a-c: Beugungsbild des DPEs aus Abb. 2a-c in unterschiedlichen Entfernungen vom DPE: a 200 mm, b 300 mm und c 1000 mm.

Die realen Beugungsbilder sind mit den simulierten Beugungsbildern vergleichbar. Es wird deutlich, dass ebenso wie in der Simulation das Beugungsbild in Richtung eines kleineren Abstandes vom DPE schneller unscharf wird als in Richtung eines größeren Abstandes.

Ein Vergleich des Beugungsbildes des DPEs ohne Linsenterm (Abb. 4b) mit dem Beugungsbild des DPEs mit Linsenterm (Abb. 5b) zeigt, dass das Beugungsbild in Abb. 5b schärfere Kanten aufweist und detailreicher ist als das Beugungsbild in Abb. 4b. Die teilweise Unschärfe des Beugungsbildes des DPEs ohne Linsenterm ist somit weniger in einer schlechten Strukturierung als vielmehr darin begründet, dass das Beugungsbild in einem viel zu kleinen Abstand zum DPE aufgenommen wurde.

5. Strahlformer für den KrF-Excimerlaser

Auf Grundlage der gezeigten Untersuchungen wurde ein Strahlformer für den KrF-Excimerlaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 248 \text{ nm}$ in Corning 7980 angefertigt. Die Simulation erfolgte anhand einer Strahlprofilmessung entlang der Hauptachsen ohne Kenntnis der genauen Phasenlage. Somit sollen die nachstehenden Ergebnisse nur die prinzipielle Funktionsweise demonstrieren.

Eine Mikroskopaufnahme des Strahlformers ist in Abb. 6 dargestellt. Als Zielstruktur wurde ein Top-Hat-Profil angestrebt.

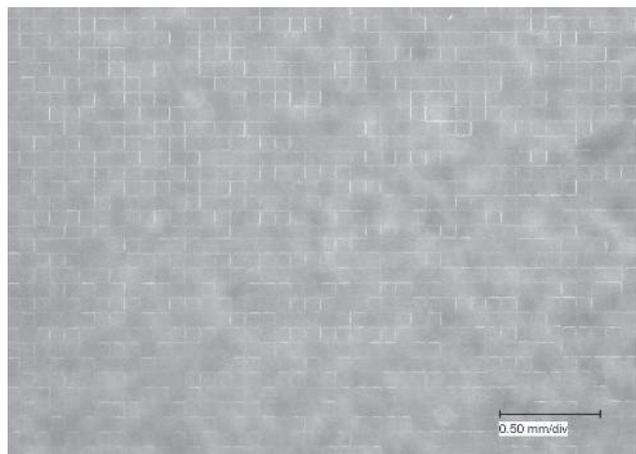


Abb. 6: Mikroskopaufnahme des achtstufigen Strahlformers für den KrF-Excimerlaser mit einer DPE-Größe von 432×216 Pixeln einer Pixelgröße von $74 \times 74 \mu\text{m}^2$ und sphärischem Linsenterm mit einer Brennweite von 1700 mm.

Die Simulation des Beugungsbildes in einer Entfernung von 1700 mm vom DPE ist in Abb. 7 dargestellt.

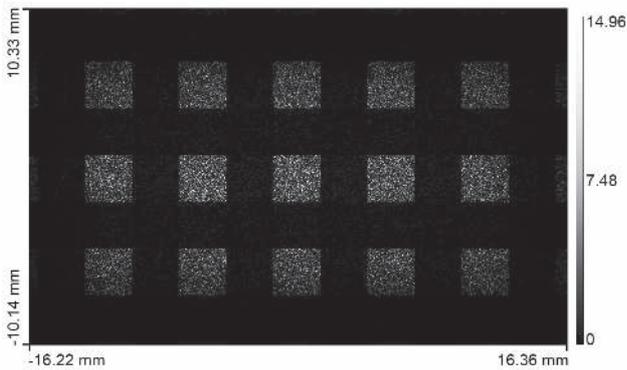


Abb. 7: Simulation des Beugungsbildes des Strahlformers aus Abb. 6.

Im simulierten Beugungsbild des DPEs zeigt sich, dass kein wirkliches Top-Hat-Profil entsteht. Die Flächen sind vielmehr aus einzelnen Peaks zusammengesetzt. Dies ist unter anderem in der nicht bekannten Phasenlage des Rohlaserstrahls begründet. Die Zielstruktur ist im Beugungsbild in Abb. 8 erkennbar. In y-Richtung sind die höheren Beugungsordnungen klar getrennt, in x-Richtung kommt es zu einer Überstrahlung des Bereiches zwischen den Beugungsordnungen. Die genaue Ursache hierfür ist nicht bekannt. Es wird vermutet, dass in x-Richtung aufgrund der nicht bekannten Phasenlage für die Berechnung keine vollständige Stauchung stattgefunden hat.



Abb. 8: Beugungsbild des Strahlformers aus Abb. 6 in einer Entfernung von 1700 mm vom DPE.

Der Einsatz dieses DPEs zur Laserstrahlformung für die Materialbearbeitung ist in dieser Form nicht

möglich. Es sind weitere optische Elemente, z.B. ein weiteres DPE, nötig, um eine Stauchung und Homogenisierung in z-Richtung zu realisieren. Zur Steigerung der Effizienz kann hierbei auch eine Überlagerung der höheren Ordnungen erfolgen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Mikrostrukturierung von diffraktiven Phaselementen ist mittels Fluorlaser möglich. Die Untersuchungen zeigen, dass unterschiedliche Zielstrukturen sowohl mit Bildentstehung im Unendlichen als auch in einem definierten Abstand vom DPE erzeugt werden können. Auf Grundlage dieser Untersuchungen konnte zu Demonstrationszwecken ein DPE zur Laserstrahlformung eines KrF-Excimerlaserstrahls hergestellt werden.

Zur Verbesserung der Bildqualität der Beugungsbilder der DPEs laufen derzeit Untersuchungen mit dem speziellen neuartigen Verfahren der CO₂-Laserglättung, wodurch ein kontinuierlicher Verlauf erreicht werden kann. Auf diesem Wege kann verhindert werden, dass höhere Beugungsordnungen entstehen. Zukünftig soll weiterhin untersucht werden, inwieweit sich die guten Ergebnisse der Strukturierung von Quarzglas auf Kalziumfluorid übertragen lassen, da sich dieses Material hervorragend für die Excimerlaserwellenlängen 157 nm und 193 nm eignet.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (FKZ: 16V0053) sowie durch die Europäische Union und den Freistaat Sachsen.

Literaturverzeichnis

- [1] O. Ersoy, *Diffraction, Fourier Optics and Imaging* (Wiley, Hoboken, 2007), p. 227
- [2] O. Ripoll et al., *Opt. Eng.* **43**, 11 (2004), 2549
- [3] J.R. Fienup, *Appl. Opt.* **21**, 15 (1982), 2758
- [4] H. Kim et al., *J. Opt. Soc. Am. A* **21**, 12 (2004), 2353
- [5] F. Träger, *Handbook of Lasers and Optics* (Springer, New York, 2007), p. 129
- [6] S. Lipson et al. *Optik* (Springer, Berlin, 1997), p. 157

NUMERISCHE SIMULATIONEN AN REALEN DOE-STRUKTUREN

Markus Olbrich, Andreas Fischer, Bernhard Steiger
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Im Artikel werden gemessene und simulierte Beugungsbilder eines realen DOEs verglichen und Übereinstimmungen bzw. Differenzen diskutiert. Um den für die Simulation angewendeten Berechnungsalgorithmus zu verifizieren, wurden im Vorfeld die räumliche Strahlverteilung der Laserstrahlung und das Oberflächenprofil des DOEs experimentell bestimmt und die Messergebnisse als Eingangsparameter der Simulation verwendet. Außerdem werden weitere Einflussfaktoren und Fehlerquellen in Bezug auf die Herstellung bzw. der Anwendung von DOE untersucht, die zu Abweichungen vom vorgegebenen idealen Beugungsbild führen.

1. Einleitung

Das Ergebnis eines laserbasierten Bearbeitungsprozesses hängt im hohen Maße von der räumlichen Verteilung der Laserstrahlung im Bearbeitungsgebiet ab. Eine verfahrensspezifische Adaption der Strahlverteilung bietet somit erhebliches Optimierungspotenzial bei der Lasermaterialbearbeitung. Eine Möglichkeit Laserstrahlung mit einer determinierten räumlichen Verteilung herzustellen, bietet die Verwendung von diffraktiven optischen Elementen (DOE). Die Berechnung dieser Komponenten kann sehr komplex sein und erfolgt in der Praxis meist iterativ. Durch die Verwendung einer geeigneten Software kann bei bekannten Eingangsparametern der theoretische Aufbau eines DOEs ermittelt werden, welches die gewünschte Strahlverteilung ermöglicht. Neben der Berechnung von DOE, können mit Hilfe dieser Software auch Einflüsse bei Abweichungen von der idealen DOE-Struktur sowie die komplette Strahlpropagation untersucht werden.

Diesbezüglich wurde am LHM (Lasereinstitut der Hochschule Mittweida) ein Computerprogramm entwickelt, dessen Verifizierung, anhand eines Vergleichs von realen und simulierten Beugungsbildern, Gegenstand dieser Arbeit ist. Dazu wurde im Vorfeld der Untersuchungen mit Hilfe der entwickelten Software ein spezielles DOE berechnet, das anschließend mittels fluorlaser-gestützter Quarzglasstrukturierung am LHM hergestellt wurde. Die Oberflächenstruktur des entstandenen DOEs wurde messtechnisch bestimmt und digitalisiert. Auf Basis der gewonnenen Geometriedaten wurden dann die Beugungsbilder in unterschiedlichen Entfernungen vom DOE berechnet und realen, mittels Kamera aufgenommenen Bildern, gegenübergestellt. Anschließend erfolgte eine Diskussion über Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Ergebnisse beider Methoden. Darüber hinaus stand die Vertiefung des Verständnisses von DOEs im Vordergrund. Die gewonnenen Erkenntnisse können als Erklärungen für Abweichungen des realen vom idealen Beugungsbild heran gezogen werden.

2. Propagationsoperatoren

Die Berechnung der Laserstrahlpropagation kann u. a. mit Hilfe von analytischen, geometrischen oder

numerischen Methoden erfolgen. Die verschiedenen Formulierungen des Beugungsintegrals gehören zu den numerischen Methoden. Durch Anwendung einer Formulierung des Beugungsintegrals auf die elektrische Feldstärke E_0 , die auf der Fläche A_0 vorliegt, kann die elektrische Feldstärke E_1 auf einer Fläche A_1 berechnet werden [1-2]. Die beschriebenen Größen sind in Bild 1 veranschaulicht.

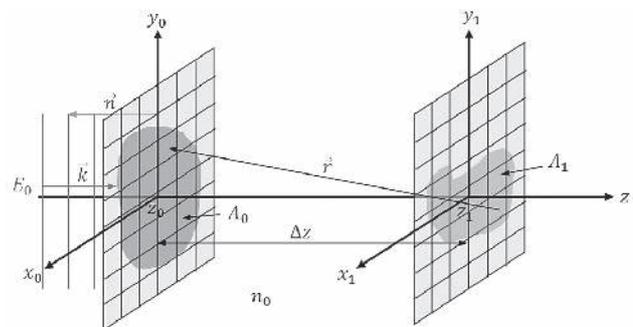


Bild 1: Schematische Darstellung der Abstrahl- und Abbildungsfläche sowie der verwendeten Variablen

Da die Feldstärke E_1 durch Anwendung einer Variante des Beugungsintegrals auf die Feldstärke E_0 entsteht, stellen die Formulierungen einen Operator dar und werden als Propagationsoperatoren bezeichnet. Sie lassen sich in Operatoren in Integralform und auf Basis der Fourier-Transformation einteilen. Werden die Operatoren auf Basis der Fourier-Transformation als Fast Fourier-Transformation, kurz FFT, ausgeführt, besitzen sie gegenüber den Operatoren in Integralform für viele Anwendungen einen extremen Geschwindigkeitsvorteil. Je nach Berechnungsparametern können sie mehrere Millionen Mal schneller sein und so die theoretische Berechnungsdauer von Jahren auf wenige Minuten reduzieren. Operatoren in Integralform besitzen hingegen den Vorteil der unabhängigen Koordinatenwahl von Abstrahl- und Abbildungsfläche. Ein Vertreter der Operatoren in Integralform ist das Fresnel-Kirchhoffsche Beugungsintegral (1) und ein Operator auf Basis der FFT ist die Fresnel-Näherung im Spektralraum (2) [2]. Diese beiden Methoden wurden für die Berechnung der Beugungsbilder am häufigsten verwendet.

Das Fresnel-Kirchhoffsches Beugungsintegral

$$E_1 = \frac{n_0}{i \cdot \lambda_0} \cdot \iint_{A_0} \frac{E_0}{r} \cdot e^{i \cdot n_0 \cdot k_0 \cdot r} dA_0 \quad (1)$$

Die Fresnel-Näherung im Spektralraum

$$E_1 = e^{i \cdot n_0 \cdot k_0 \cdot \Delta z} \cdot \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F}(E_0) \cdot e^{-i\pi \frac{\lambda_0 \cdot \Delta z}{n_0} (v_x^2 + v_y^2)} \right] \quad (2)$$

v_x und v_y repräsentieren die Raumfrequenzen.

3. Das verwendete DOE

Für die Untersuchungen wurde die Phasenlage eines DOEs mit Hilfe des iterativen Fourier-Transformations-Algorithmus, kurz IFTA, nach Gerchberg und Saxton berechnet [3]. Die Designparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die verwendete Teststruktur ist in Bild 2 dargestellt. Das DOE stellt ein Fourier-Element dar. Solche Elemente erzeugen in einer sehr großen Entfernung, theoretisch erst im Unendlichen, ein scharfes Beugungsbild. Die scharfe Abbildung im Unendlichen kann durch eine Sammellinse in die Brennebene dieser Linse transformiert werden.

Tabelle 1: Übersicht der Design-Parameter

Strahlprofil	TEM ₀₀ $w_{0,\sigma} = 300 \mu\text{m}$
Wellenlänge	532 nm
Elementanzahl	64 × 64
Pixelgröße	25 × 25 μm ²
Iterationsschritte IFTA	100
Diskretisierungsstufen	9



Bild 2: Ideale Teststruktur

Die verwendete Teststruktur enthält verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften. So zeigen die Streifen am rechten Rand, dass die Strukturgröße beliebig variiert werden kann und diese auch an keine bestimmte Form gebunden sind, was anhand der Kreisstruktur am linken Rand deutlich wird. Weiterhin sind Beugungsbilder mit beliebigen Intensitätsstufen möglich.

Die berechnete Phasenlage des DOEs wurde mittels fluorlasergestützter Strukturierung in Quarzglas erzeugt.

4. Versuchsbeschreibung und Durchführung

Für die experimentellen Untersuchungen wurde das DOE zentrisch mit einem frequenzverdoppelten Nd:YAG Festkörperlaser bestrahlt, wobei die Feinabstimmung der Strahlage zum DOE eine Optimierung des Ergebnisses bewirkte. Nur bei einer korrekten Ausleuchtung war das Beugungsbild gut erkennbar. Die große Anfälligkeit auf Dejustage resultiert aus der geringen Größe des DOEs. Jedes Pixel trägt zur Entstehung des Beugungsbildes bei. Durch eine Veränderung der auf ihm vorliegenden Feldstärke, findet eine andere Wichtung der Anteile statt und das Beugungsbild verändert sich. Für ein größeres DOE mit einem größeren Laserstrahl wäre die Veränderung der Feldstärke bei einer Verschiebung der Strahlquelle geringer. Das Beugungsbild wurde in einem abgedunkelten Raum auf eine weiße Wand projiziert und mit Hilfe einer digitalen Spiegelreflexkamera fotografiert. Demnach erfolgte die Abbildung nicht direkt auf dem Sensor, sondern das von der Wand zurück reflektierte bzw. gestreute Licht wurde zur Abbildung verwendet. Ein ausgewähltes Ergebnis ist in Bild 5 (III) dargestellt.

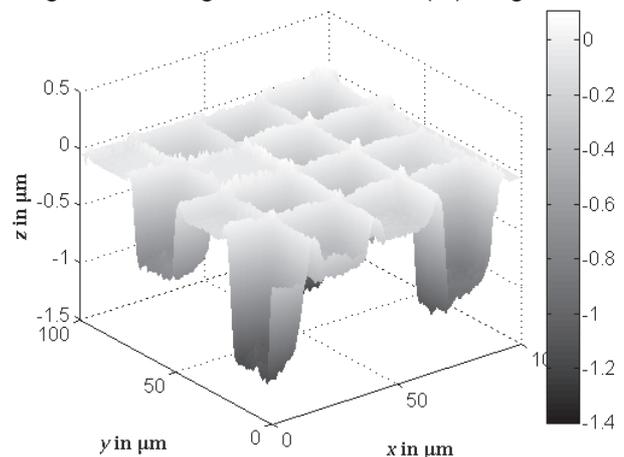


Bild 3: Konfokalmikroskopaufnahme

In der Simulation wurde versucht die realen Bedingungen so genau wie möglich nachzuempfinden. Das erzeugte Höhenprofil wurde mit Hilfe eines Konfokalmikroskops digitalisiert. Ein Ausschnitt mit hundertfacher Vergrößerung ist in Bild 3 zu sehen. Die gewonnenen Daten dienen als Eingangsparameter der Simulation. Weiterhin war noch die Kenntnis des Strahlprofils, sowie dessen Phasenlage notwendig, um die Eingangsparameter zu vervollständigen. Da kein Messgerät zur Bestimmung der Phasenlage zur Verfügung stand, wurde diese als konstant angenommen. Das Strahlprofil wurde in der DOE-Ebene mit Hilfe einer USB-CMOS Kamera bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt.

Die Simulation erfolgte mit der Fresnel-Näherung im Spektralraum (2) als Propagationsoperator. Die 0. Beugungsordnung ist in Bild 5 (II) veranschaulicht.

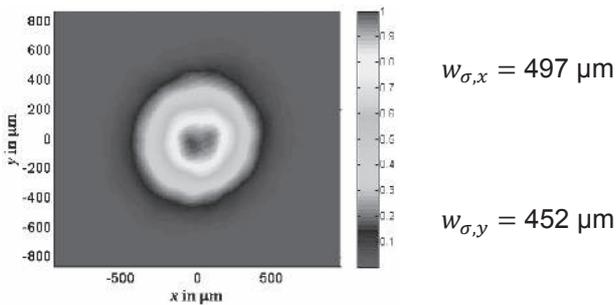
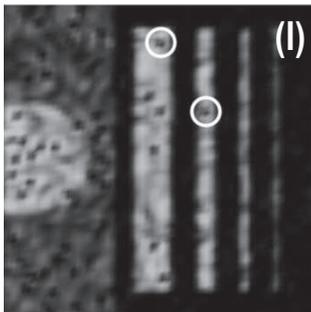


Bild 4: Darstellung des gemessenen Strahlprofils in der DOE-Ebene

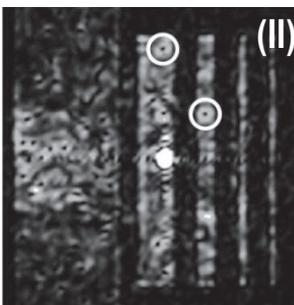
5. Ergebnisse und Diskussion

Die experimentellen und simulierten Ergebnisse sind Bild 5 gegenüber gestellt. Zusätzlich ist noch die Simulation mit idealen Eingangsparametern aufgeführt. Für die Darstellung des Simulationsergebnisses mit realen Eingangsparametern war eine Beschneidung um $g \cdot$ Maximalwert notwendig, d. h. höhere Intensitätswerte wurden ab dieser Grenze abgeschnitten. Zur Darstellung wurde $g = 0,008$ gewählt. Auch in der Kameraaufnahme fand eine Beschneidung statt, was an der Weißfärbung des Mittenbereichs zu sehen ist. Dieser Bereich stellt die 0. Unterordnung dar [2]. Wie stark die Beschneidung war, konnte nicht ermittelt werden.

Simulation mit idealen Eingangsparametern



Simulation mit realen Eingangsparametern



Kameraaufnahme

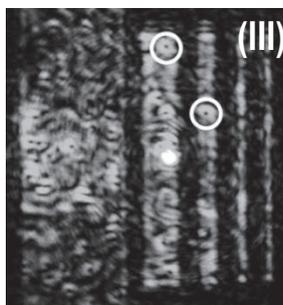


Bild 5: Gegenüberstellung der 0. Ordnung des realen (II) und simulierten (III) Beugungsbildes sowie der Vorgabe (I)

Anhand des Vergleichs von realer Aufnahme und Simulation mit realen Eingangsparametern mit der Simulation mit idealen Eingangsparametern wird deutlich, dass die gewünschte Struktur im realen

Beugungsbild sichtbar ist, jedoch Abweichungen vorhanden sind. Die Streifenstruktur auf der rechten Seite ist sehr gut erkennbar und zeichnet sich durch einen hohen Kontrast aus. Die Kreisstruktur am linken Rand, sowie der linke Streifen mit niedrigerer Intensität, sind nur schwach sichtbar. Die Nullstellen des Wellenfeldes befinden sich bei der Vorgabe und im simulierten und realen Beugungsbild an den gleichen Positionen. Zur Verdeutlichung sind zwei Beispiele mit einem Kreis markiert.

Das simulierte Beugungsbild mit realen Eingangsparametern ist dem mittels Kamera aufgenommenen Bild sehr ähnlich. Sie gleichen sich vom optischen Eindruck und in beiden Bildern ist die 0. Unterordnung vorhanden. Anhand des übereinstimmenden Aussehens und der identischen Lage der charakteristischen Punkte, d. h. der Nullstellen des Wellenfeldes und der 0. Unterordnung, ist eine Verifizierung des Berechnungsalgorithmus möglich. Die Bilder unterscheiden sich lediglich im Mittenbereich. Das simulierte Beugungsbild weist in der Mitte eine schwach sichtbare Kreuzstruktur auf und das Kamerabild eine Schar von konzentrischen Ringen, die von der 0. Unterordnung ausgehen. Die Ursache dieser Ringe sind wahrscheinlich Ablagerungen und Verunreinigungen entweder auf dem DOE oder am Laserausgang. Auch die unbekannte Phasenlage der Laserquelle kann als Begründung herangezogen werden. Die Ursache der Kreuzstruktur wird im nächsten Gliederungspunkt besprochen.

6. Identifizierung der Fehlerquellen

Der Vergleich in Bild 5 zeigt, dass Realität und Simulation sehr gut miteinander übereinstimmen, jedoch von der Vorgabe abweichen.

Als erste Ursache kann der erhöhte Strahlradius in der DOE-Ebene heran gezogen werden. Das DOE wurde für einen Strahlradius von $w_{\sigma} = 300 \mu m$ entworfen. In der DOE-Ebene liegt hingegen ein Strahlradius von etwa $475 \mu m$ als Mittelwert von beiden Hauptachsen vor. Die Auswirkungen dieser Erhöhung sind in Bild 6 zu sehen. Zur verbesserten Sichtbarkeit der Auswirkungen wurden die Simulationen mit $6 \mu m$ Pixelgröße durchgeführt und die elektrische Feldstärke statt der Intensität dargestellt. Als Propagationsoperator wurde die Fresnel-Näherung im Spektralraum verwendet. Durch eine Erhöhung des Strahlradius verringert sich die Homogenität der Strukturen und sie besitzen keine einheitlich hohe Feldstärke mehr. Die Ursache dafür ist in Bild 6 (III) deutlich zu sehen. Aufgrund des vergrößerten Strahlradius entstehen im Beugungsbild kleine Ringe mit höherer Feldstärke als die umliegenden Gebiete. Da die Gesamtleistung konstant bleibt, muss im Gegenzug die Feldstärke der umliegenden Gebiete sinken. Die Ringe entstehen um die Nullstellen des Wellenfeldes. Die Ursache der Ringbildung konnte in den geleisteten Arbeiten nicht ermittelt werden.

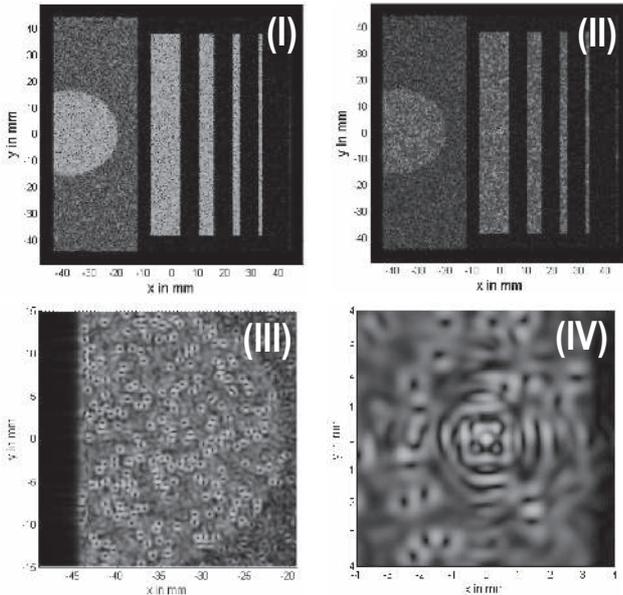


Bild 6: Berechnete Beugungsbild für (I) $w_\sigma = 300 \mu\text{m}$, (II) $w_\sigma = 475 \mu\text{m}$, (III) vergrößerter Ausschnitt der Kreisstruktur, (IV) vergrößerter Ausschnitt des Mittenbereiches

Die Erhöhung des Strahlradius bewirkt weiterhin, dass der Laserstrahl größer als die DOE-Struktur ist. Dadurch wirkt das DOE als Apertur und folglich entstehen Beugungseffekte in Form einer Sinc-Funktion. Diese ist in Bild 6 (IV) schwach zu erkennen. Die Ursache für die schlechte Sichtbarkeit ist die hohe Feldstärke des Mittelstreifens. Würde ein Gebiet mit niedriger Feldstärke oder Hintergrund vorliegen, wäre die Sinc-Funktion deutlich zu sehen. Die Kreuzstruktur in Bild 5 (II) kann als Sinc-Funktion interpretiert werden. Sie ist stärker als in der Simulation mit idealen Eingangsparametern aufgeprägt, was mit dem Vorhandensein der 0. Unterordnung zu begründen ist.

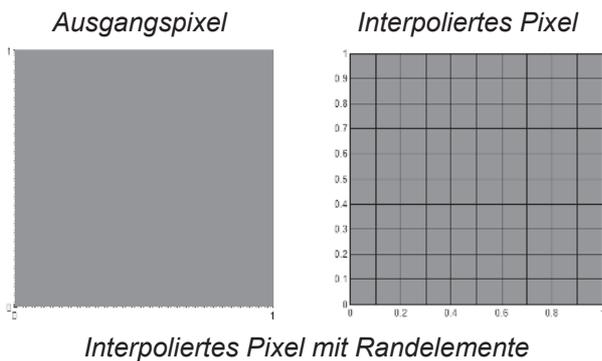


Bild 7: schematische Darstellung des Algorithmus zur Simulation der Auswirkungen unbearbeiteter Gebiete

Wie bereits in Bild 4 zu sehen ist, befinden sich zwischen den einzelnen Pixel unbearbeitete Gebiete. Diese sind auf einen falschen Abbildungsmaßstab bei der Maskenprojektion während des Strukturierungsprozesses zurück zu führen. Um die Auswirkungen der unbearbeiteten Gebiete zu verstehen, wurde in der Simulation ein Pixel durch Interpolation nach der Methode des nächsten Nachbarn in 100 kleinere Elemente unterteilt und verschiedene Randelemente auf den Phasenwert 0 gesetzt, was einem unstrukturierten Bereich entspricht. Zur Verdeutlichung des Algorithmus ist dieser in Bild 7 schematisch veranschaulicht. Als Parameter wurde in der Simulation die Größe N_{Rand} verwendet. Sie gibt an wie viele Pixel, vom Rand aus gemessen, als unbearbeitetes Gebiet zählen sollen.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Breiten der unbearbeiteten Gebiete sind in Bild 8 für ausgewählte Beispiele dargestellt.

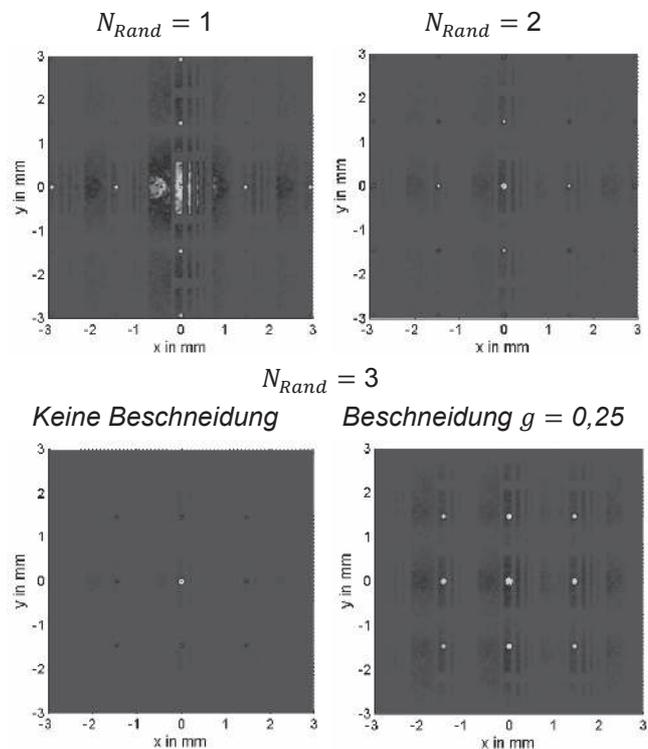


Bild 8: Darstellung der simulierten Beugungsbilder für verschiedene Größen der unbearbeiteten Gebiete

Die unbearbeiteten Gebiete wirken wie Stege bei der Beugung am Gitter. Dadurch wird dem Beugungsbild des DOEs ein weiteres Beugungsbild überlagert, das des Ausgangsstrahlprofils am Gitter. Die Nebenmaxima des Gitterbildes befinden sich in der Mitte der einzelnen Beugungsordnungen des DOE-Beugungsbildes. Der Grund ist die Übereinstimmung von Pixelgröße und Gitterkonstante. Die Breite der Stege bestimmt den Anteil beider Beugungsbilder an der Gesamtleistung. Bei großen Stegbreiten besitzt das Gitterbild einen hohen Leistungsanteil. Da die einzelnen Nebenmaxima eine wesentlich geringere Fläche besitzen als die höheren Ordnungen des DOE-Beugungsbildes,

muss folglich ihre Feldstärke deutlich größer sein. Ohne Beschneidung, wie in Bild 8 unten, wäre das Beugungsbild des DOE nicht sichtbar. Das Vorhandensein der 0. Unterordnung kann eindeutig auf die Stege zurückgeführt werden.

7. Zusammenfassung

Der Vergleich von realen mittels Kamera aufgenommenen und mit realen Eingangsparametern simulierten Beugungsbildern wies eine hohe Übereinstimmung auf. Die verwendeten Propagationsoperatoren konnten verifiziert werden. Beide Bilder weichen von der Vorgabe ab. Anhand der Untersuchung verschiedener Einflussparameter wurden die Fehlerquellen eindeutig identifiziert.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Olbrich, Bachelorarbeit, Erstellung eines wellenoptischen Programmes zur Berechnung der Laserstrahlpropagation nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip, Hochschule Mittweida (2010)
- [2] M. Olbrich, Masterarbeit, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu DOE-Strukturen, Hochschule Mittweida (2012)
- [3] F. Jahn, Masterarbeit, Untersuchung von Methoden und Erstellung eines Programmmoduls zur Computergestützten Berechnung von Diffraktiven Optischen Elementen (DOE), Hochschule Mittweida (2012)

