

Hochrateglätten von Edelstahl mittels 5 kW Multimode-Laser

Linda Pabst, Robby Ebert, André Streek

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

Die Oberflächenrauheit beeinflusst wesentlich die Eigenschaften, Funktionalität und die visuelle Erscheinung von Werkstücken. Deshalb wurde das Hochrate-Laserglätten an Edelstahl X5CrNi18/10 (1.4301) untersucht. Die Stahlbleche wurden vor der Bearbeitung sandgestrahlt, dadurch konnte eine homogene, raue Oberfläche erzeugt werden. Die Oberflächenrauheit des Ausgangsmaterials betrug $S_a = 0.42 \mu\text{m}$. Durch die Kombination eines 5 kW Multimode Faserlasers mit einer ultraschnellen Strahlablenkung mittels Polygonscanner können sehr hohe Geschwindigkeiten und damit hohe Flächenraten umgesetzt werden. Durch das Laserglätten konnte eine minimale Oberflächenrauheit von $S_a = 0.11 \mu\text{m}$ erzielt werden, was einer Verbesserung der Oberflächenrauheit von 74% entspricht. Die Flächenrate für die Bearbeitung betrug dabei $800 \text{ cm}^2/\text{min}$.

1. Einleitung

Die Oberflächenbeschaffenheit eines Produktes hat einen entscheidenden Einfluss auf den optischen Eindruck und die funktionalen Eigenschaften wie Verschleißfestigkeit, Gleiteigenschaften oder Biokompatibilität. [1,2,3] Die Oberflächenrauheit hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf diese Funktionseigenschaften. Daher stellt die Oberflächenbehandlung einen abschließenden Bearbeitungsschritt in der industriellen Fertigung dar. Trotz aller technischen Entwicklungen wird das Glätten bzw. Polieren meist noch manuell durchgeführt. Das maschinelle / manuelle Polieren ist in der Regel ein mehrstufiger Prozess und daher sehr zeitaufwendig. Die Bearbeitungszeiten liegen typischerweise zwischen 10 und 30 min/cm², was Flächenraten von 0.1 bis 0.033 cm²/min entspricht. [1,2] Zudem muss das manuelle Polieren von qualifizierten Facharbeitern durchgeführt werden, was zu sehr hohen Produktionskosten führt. [4].

Es besteht daher die Notwendigkeit, den Prozess des Oberflächenglättens zu automatisieren. Als alternatives Verfahren hat sich in den letzten Jahren das Laserglätten oder Laserpolieren entwickelt. [1] Es basiert auf dem Aufschmelzen einer dünnen Schicht auf der Werkstückoberfläche. Die Oberflächen- und Grenzflächenspannung der Schmelze bewirkt beim Erstarren eine Glättung der Oberfläche. [1,2,5] Das Laserpolieren ist somit ein formerhaltendes Polierverfahren, da durch das Umschmelzen ein lokaler Materialausgleich erfolgt, im Gegensatz zum klassischen Polieren, das ein abtragendes Verfahren ist. [1]

Grundsätzlich unterscheidet man beim Laserpolieren zwei Verfahrensvarianten, das Makro- und das Mikropolieren. Beim Makropolieren wird kontinuierliche Laserstrahlung (cw) eingesetzt. Die Abtragtiefen liegen zwischen 20 und 100 μm . Damit können grobe Unebenheiten und große Rauheiten wie Erodierstrukturen, Fräs-, oder Drehriefen entfernt werden. Die Flächenrate liegt typischerweise zwischen 1.2 und 8.4 cm²/min. Im Gegensatz dazu wird beim Mikropolieren mit gepulster Laserstrahlung (pw) gearbeitet. Die Umschmelztiefe beträgt

hier nur wenige μm . Dadurch wird vor allem der Glanzwert der Oberfläche erhöht, während grobe Unebenheiten unbeeinflusst bleiben. Die Ausgangsoberfläche sollte daher geschliffen oder feingefräst sein und eine geringe Rauheit aufweisen. Typische Flächenraten beim Mikropolieren liegen zwischen 6 und 60 cm²/min. [1,3,5]

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von kontinuierlicher und gepulster Laserstrahlung für einen Glättungsprozess. Durch den Einsatz von kontinuierlicher Laserstrahlung wird die Ausgangsoberfläche bereits geglättet und homogenisiert. Die so erzeugte Oberfläche ist für eine nachfolgende Bearbeitung mit gepulster Laserstrahlung besser geeignet, um die Oberflächenrauheit weiter zu reduzieren und den Glanzwert deutlich zu erhöhen. Der kombinierte Prozess führt zu einer signifikanten Reduzierung der Rauheit und zu einem maximalen Glanzwert der Oberfläche bei gleichzeitig angemessener Bearbeitungsgeschwindigkeit. [6,7]

Die erreichbaren Rauheiten beim Laserstrahlpolieren sind abhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Werkstoffes, der Rauheit und Homogenität der Ausgangsoberfläche sowie den Bearbeitungsparametern. Die erreichbaren Oberflächenrauheiten werden durch die Ausgangsrauheit, das Bearbeitungsregime und die gewünschte Endrauheit bestimmt. [4] Die minimal erreichbaren Rauheiten beim Laserpolieren liegen bei ca. 0.05 - 0.5 μm . [1] Damit eignet sich das Laserpolieren besonders für Anwendungen, bei denen keine Spiegelglanzoberfläche gefordert ist und das Hauptaugenmerk auf der Funktionalität des Endproduktes liegt. [1,8]

Das Laserpolieren ist gut automatisierbar, hat eine hohe Reproduzierbarkeit und kann auch für komplexe 3D-Geometrien eingesetzt werden. Darüber hinaus können nahezu alle Werkstoffe bearbeitet werden und auch ein selektives Polieren einzelner Bereiche ist möglich. [1,8] Das Laserpolieren kann somit zu einer signifikanten Zeit- und Kostenersparnis gegenüber dem konventionellen, manuellen Polieren führen. [1] Darüber hinaus entstehen beim Laserpolieren keine gesundheits- oder umweltschädlichen Schleif- und Polierabfälle. [2] Durch den

thermischen Prozess und das Umschmelzen der Oberfläche treten zudem Nebeneffekte wie die Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit und der Oberflächenhärte oder die Verbesserung der Gleiteigenschaften auf, die sich bei vielen Produkten als vorteilhaft erweisen. [8]

Über das Laserglätten von verschiedenen Metallen [1,3,5,9,10], aber auch von Kunststoffen und Gläsern [11] sind zahlreiche Berichte veröffentlicht worden. Das Laserglätten eignet sich auch zur Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen. Anhaftendes Pulver kann entfernt und die hohe Rauheit additiv gefertigter Bauteile deutlich reduziert werden. [12]

Willenborg berichtet über eine Reduzierung der Ausgangsrauheit von $R_a \sim 1 - 4 \mu\text{m}$ auf $R_a < 0.2 \mu\text{m}$ bei einer Flächenrate von 3 - 12 cm^2/min für Nickel-, Titan- und Kobalt/Chrom-Legierungen. [1]

Burzig et al. erreichten für eine Aluminiumlegierung mit einer hohen Ausgangsrauheit von $R_a = 2.17 \mu\text{m}$ unter Verwendung eines cw-Lasers mit einer maximalen Laserleistung von 4 kW eine Flächenrate von 20 bis 60 cm^2/min bei einer minimalen Rauheit von $R_a = 0.15 - 0.20 \mu\text{m}$, entsprechend einer Rauheitsreduzierung von 91 - 93%. [9]

Die höchste Flächenrate von $A_R = 124 \text{ cm}^2/\text{min}$ wurde von Giorleo et al. für das Laserglätten von Titan mit gepulster Laserstrahlung im grünen Wellenlängenbereich berichtet. Die hohe Flächenrate ging jedoch auf Kosten der Rauheitsreduzierung. Die Ausgangsrauheit von $R_a = 0.58 \mu\text{m}$ konnte nur um 28% auf $R_a = 0.42 \mu\text{m}$ reduziert werden. [10]

Durch die Kombination einer kontinuierlichen Laserquelle mit einer Leistung von 600 W und einer gepulsten Laserquelle mit einer mittleren Leistung von 80 W bei einer Pulsdauer von 1.3 μs konnten Zhou et al. auf Stahl eine Rauheitsreduzierung von $S_a = 877 \text{ nm}$ auf $S_a = 142 \text{ nm}$ mit einer Flächenrate von 48 cm^2/min erzielen. Durch die Zwei-Strahl-Kombination wurde eine effektivere und effizientere Glättung gegenüber den Einzelverfahren erreicht. [7]

Kumstel erreichte mit einer kontinuierlichen Laserstrahlleistung bis 1 kW bei gaußförmiger Strahlverteilung eine Flächenrate von 0.6 - 1.8 cm^2/min auf Stahl mit einer minimalen Rauheit von $R_a = 0.15 - 0.20 \mu\text{m}$ bei Ausgangsrauheiten von $R_a = 0.4 - 0.5 \mu\text{m}$. Dabei führte eine Vergrößerung des Strahldurchmessers bei gleichzeitiger Erhöhung der Laserleistung nur zu einer unwesentlichen Erhöhung der Flächenrate. Eine weitere Erhöhung der Flächenrate führte zu einer Erhöhung der Rauheit. Somit konnte nicht die gesamte zur Verfügung stehende Laserleistung für die Bearbeitung genutzt werden. Durch den Einsatz einer komplexen Strahlformung „line with cut triangle“ konnte die Flächenrate bei gleichzeitiger Reduzierung der erreichbaren Rauheit um den Faktor 5 - 10 auf 6.2 - 10 cm^2/min gesteigert werden. [13]

In diesem Paper wird ein Laserglätungsprozess mit ultraschneller Strahlableitung mittels Polygonscanner in

Kombination mit einer cw-Hochleistungslaserquelle mit 5 kW Laserleistung vorgestellt. Durch die ultraschnelle Strahlableitung konnte die hohe Laserleistung im Glättungsprozess umgesetzt und damit industrierelevante Prozesszeiten erreicht werden.

2. Experimenteller Aufbau

Für die Untersuchungen wurde ein cw-Multimode-Laser YLS-5000-S4-WW der Firma IPG Photonics GmbH eingesetzt. Der Laser hatte eine maximale Ausgangsleistung von 5 kW bei einer zentralen Wellenlänge von 1070 nm und einem M^2 von 10. Für die Bearbeitung wurde eine Optik mit einer Brennweite von 420 mm verwendet, wodurch sich ein Fokusradius von $w_{86} = 140 \mu\text{m}$ auf der Probenoberfläche ergab. Die Rayleighlänge betrug $z_R = 5.8 \text{ mm}$. Bei allen Untersuchungen wurde die maximale Leistung von 5 kW verwendet, um eine möglichst hohe Flächenrate zu erzielen. Damit wurde eine konstante Intensität von 16.2 MW/cm^2 erreicht. Für die ultraschnelle Strahlableitung wurde ein Polygonscanner der Firma MOEWE Optical Solutions GmbH eingesetzt. Die Bearbeitung erfolgte unter Normalatmosphäre.

Als Probenmaterial wurde Edelstahl X5CrNi18/10 (1.4301) verwendet. Das Probenmaterial wurde vor der Bearbeitung glasperlengestrahlt, um die Rauheit des Ausgangsmaterials zu erhöhen. Die Ausgangsrauheit betrug $S_a = 0.420 \pm 0.015 \mu\text{m}$. Abbildung 1 zeigt eine Mikroskopaufnahme der unbearbeiteten Materialoberfläche.

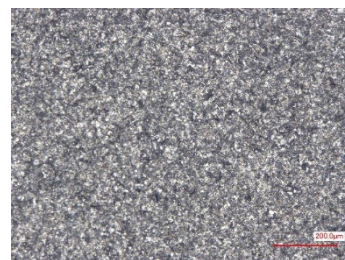


Abbildung 1: Mikroskopbild der Ausgangsoberfläche

Um die Wirkung der Laserbearbeitung auf die Materialoberfläche beurteilen zu können, wurde die Probe vor und nach der Bearbeitung entsprechend analysiert. Damit konnte der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die Oberflächeneigenschaften ermittelt werden.

Zum einen wurde die Probenoberfläche optisch mittels Lichtmikroskop untersucht und zum anderen die Oberflächenrauheit S_a mit einem Laser-Scanning-Mikroskop (Olympus Lext 3D OLS4100) nach DIN EN ISO 4288 bestimmt. Für die Glanzmessung wurde ein Rhopoint IQ 20/60/80 Gloss Haze DOI Meter verwendet. Die Glanzwerte wurden unter einem Winkel von 20° gemessen, entsprechend für Hochglanzproben, um eine höhere Genauigkeit und Auflösung zu erreichen. Die Messfläche betrug ca. 6 mm x 6.4 mm. Der Glanzwert wurde gemäß der internationalen Norm ISO2813 in der Glanzeinheit GU gemessen. Um eine mögliche Oxidation bei der Bearbeitung unter Normalatmosphäre festzustellen wurden EDX-Messungen durchgeführt. Für die Rauheits-

EDX- und Glanzmessung wurden pro Parameterkombination fünf verschiedene Oberflächen gemessen und entsprechend der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Versuche wurden mit kontinuierlicher Laserstrahlung hoher Leistung und ultraschneller Strahlablenkung mittels Polygonscanner durchgeführt. Bei allen Untersuchungen wurde die maximale Laserleistung von 5 kW verwendet um eine möglichst hohe Flächenrate zu erzielen. Damit ergab sich eine konstante Intensität von 16.2 MW/cm^2 , die Scangeschwindigkeit und der Linienabstand wurden variiert.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einige Mikroskopaufnahmen der bearbeiteten Oberfläche mit unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten und Linienabständen.

Bei geringen Linienabständen von 5, 10 und 15 μm , entsprechend einer hohen Linienüberlappung von 98 - 95%, wurde eine erhöhte Welligkeit der Oberfläche sowie eine starke Oxidation bei allen untersuchten Scangeschwindigkeiten festgestellt. Durch den geringen Linienabstand wurde lokal sehr viel Wärme in die Materialoberfläche eingebracht, was zu einer langen Schmelzphase und damit zu Schmelzbadinstabilitäten und Oxidation führte. Bei Linienabständen von 25 bis 50 μm wurde eine homogene Glättung der Oberfläche erreicht und es wurde keine sichtbare Oxidation festgestellt, siehe Abbildung 2. Bei einer weiteren Erhöhung des Linienabstandes auf 100 μm wurden bereits Trennungen der einzelnen Bearbeitungslinien festgestellt, obwohl die Linienüberlappung noch 64% betrug, siehe Abbildung 2 rechts. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Strahlprofil eine Gaußverteilung aufwies. Dadurch reichte die Intensität nur im mittleren Bereich des Strahls aus, um die Materialoberfläche aufzuschmelzen. Mit zunehmender Entfernung vom Strahlzentrum nahm die Intensität ab und es fand nur noch eine Erwärmung des Materials statt. Somit wurde die Materialoberfläche trotz des Linienüberlapps nicht mehr vollständig bearbeitet.

Bei einer niedrigen Scangeschwindigkeit von 100 m/s konnte eine deutliche Welligkeit und Oxidation der Oberfläche festgestellt werden. Aufgrund der geringen Bearbeitungsgeschwindigkeit und des relativ großen Linienüberlapps waren der thermische Energieeintrag und die Verweilzeit hoch was zu einer langen Schmelzphase und damit zu Schmelzbadinstabilitäten führte. Bei höheren Scangeschwindigkeiten wurde die Bearbeitungsfläche homogen aufgeschmolzen und es konnte eine deutliche Glättung erreicht werden, vergleiche Abbildung 2 mit dem unbearbeiteten Ausgangsmaterial Abbildung 1. Mit zunehmender Scangeschwindigkeit verringerte sich die Lasereinwirkzeit und damit der Energieeintrag, dadurch konnte die Materialoberfläche homogen aufschmelzen und wieder erstarren und es wurde keine sichtbare Oxidation festgestellt, siehe Abbildung 2. Bei sehr hohen Scangeschwindigkeiten von

250 m/s und mehr wurde aufgrund der geringen Einwirkzeit nicht mehr die gesamte bearbeitete Fläche homogen aufgeschmolzen und eine sichtbar rauere Materialoberfläche entstand, siehe Abbildung 2 unten.

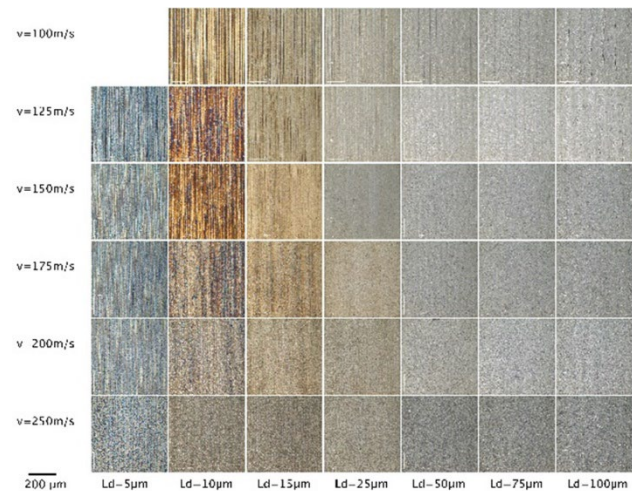


Abbildung 2: Mikroskopbilder der bearbeiteten Flächen bei verschiedenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten v und Linienabständen L_d

Für das Laserglätten mit einer Leistung von 5 kW wurden bei Scangeschwindigkeiten von 125 bis 175 m/s und Linienabständen von 25 - 50 μm optisch die besten Bearbeitungsergebnisse, eine homogen geglättete Oberfläche ohne Oxidation, erzielt.

In der Abbildung 3 wird die gemessene Oberflächenrauheit S_a in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit v bei verschiedenen Linienabständen L_d dargestellt. Die mittlere Oberflächenrauheit des Ausgangsmaterials (Ref) betrug $S_a = 0.420 \pm 0.015 \mu\text{m}$. Bei fast allen untersuchten Bearbeitungsparametern konnte eine Reduzierung der Ausgangsrauheit erreicht werden. Lediglich bei einem sehr hohen Linienabstand von 150 μm und einer Scangeschwindigkeit von 100 m/s wurde eine höhere Rauheit als beim Ausgangsmaterial erreicht. Grundsätzlich wurde bei einer Scangeschwindigkeit von 100 m/s bei allen untersuchten Linienabständen eine höhere Rauheit gemessen als bei höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Durch die geringe Scangeschwindigkeit war sowohl die eingebrachte Energie als auch die Verweilzeit hoch, was zu einem starken Aufschmelzen des Materials und damit zu einer starken Schmelzbadynamik führte. Dadurch wurde die Oberfläche deutlich welliger und rauer, siehe Abbildungen 2 und 3.

Mit zunehmender Scangeschwindigkeit nahm die Oberflächenrauheit bis zu einem lokalen Minimum ab, wobei die Lage des Minimums vom Linienabstand abhing. Je höher die Scangeschwindigkeit war, desto geringer war der Linienabstand, bei dem die minimale Rauheit erreicht wurde, siehe Abbildung 3 sowie Tabelle 1. Mit zunehmendem Linienabstand musste die Scangeschwindigkeit reduziert werden, um noch ausreichend thermische Energie in das Material einzubringen um die Oberfläche homogen aufzuschmelzen und zu glätten. Die erzielbare Flächenrate hing im Wesentlichen vom

Linienabstand ab. Mit zunehmendem Linienabstand nahm die Flächenrate zu, siehe Tabelle 1.

Bei einer weiteren Erhöhung der Scangeschwindigkeit nahm die Oberflächenrauheit wieder zu. Durch den geringeren Energieeintrag und die relativ hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten wurde das Material nicht mehr ausreichend aufgeschmolzen, um die hohe Ausgangsrauheit auszugleichen.

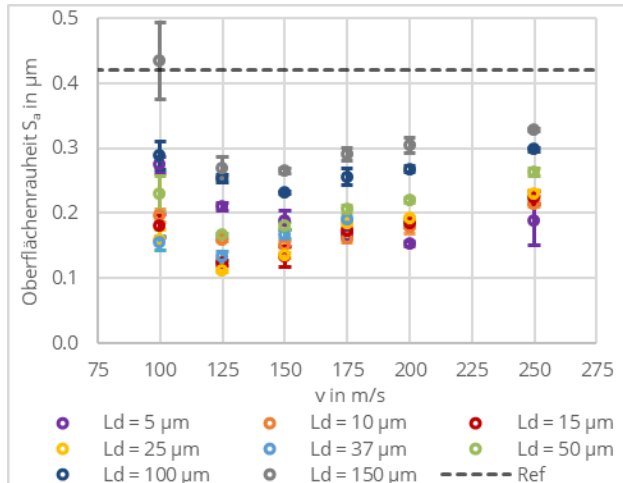


Abbildung 3: Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Bearbeitungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Linienabständen

Tabelle 1: minimal erzielte Oberflächenrauheit bei den untersuchten Scangeschwindigkeiten und dazugehörige Linienabstände und Flächenraten

v in m/s	Ld in µm	S _a in µm	A _R in cm ² /min
100	37	0.154 ± 0.012	984
125	25	0.111 ± 0.003	852
150	15	0.133 ± 0.016	600
175	10	0.160 ± 0.005	466
200	5	0.153 ± 0.003	266

Darüber hinaus wurden bei hohen Linienabständen von 100 und 150 µm, entsprechend einer Linienüberlappung von 64 bzw. 47%, siehe Abbildung 3 dunkelblau und grau, bei allen untersuchten Scangeschwindigkeiten höhere Rauheitswerte ermittelt. Bei Verwendung eines Gaußschen Strahlprofils reichte diese Überlappung nicht mehr aus, um das Material vollständig aufzuschmelzen und die Oberfläche ausreichend zu glätten.

Die optimale Scangeschwindigkeit unter den vorliegenden Bedingungen lag bei 125 m/s, wobei eine geringere Rauheit im Bereich zwischen S_a = 0.11 und 0.16 µm über einen relativ großen Bereich der Linienüberlappung erreicht werden konnte, siehe Abbildung 3. Die optimalen Linienabstände lagen zwischen ca. 15 und 37 µm, entsprechend einer Linienüberlappung von 95 bis 87% in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit. Durch die Verwendung eines gaußförmigen Strahlprofils war der erforderliche Überlapp hoch, um eine homogene Umschmelzung der Oberfläche und eine geringe Rauheit zu erzielen.

Die minimale Rauheit von S_a = 0.111 ± 0.003 wurde bei einer Scangeschwindigkeit von v = 125 m/s und einem Linienabstand von L_d = 25 µm erreicht, was einer Rauheitsreduzierung von 73.6% gegenüber dem Ausgangsmaterial entsprach. Bei einer Scangeschwindigkeit von 125 m/s und einem Strahldurchmesser von 280 µm ergab sich eine kurze Verweilzeit von 2.2 µs, und bei einem Linienabstand von 25 µm war die Linienüberlappung mit 91% sehr hoch und das Material wurde ca. 11 mal umgeschmolzen. Bei diesen Bearbeitungsparametern betrug die Flächenrate A_R = 852 cm²/min und die Bearbeitungszeit t_B = 11.7 min/m².

Bei einer nur geringfügig höheren Rauheit von S_a = 0.133 ± 0.008 µm konnte eine höhere Flächenrate von A_R = 1262 cm²/min und eine Bearbeitungszeit von t_B = 7.9 min/m² erzielt werden. Dies entsprach einer Erhöhung der Flächenrate um 48% bei einer Rauheitsreduzierung von 68.3%. Die Scangeschwindigkeit betrug v = 125 m/s und der Linienabstand L_d = 37 µm. Der Linienüberlapp war dabei mit 87% immer noch hoch, was auf die Verwendung eines gaußförmigen Strahlprofils zurückzuführen war.

In [10] wird die höchste Flächenrate von A_R = 124 cm²/min für das Laserglätten von Titan erreicht. Die hohe Flächenrate ging jedoch auf Kosten der Rauheitsreduzierung. Die Ausgangsrauheit von R_a = 0.58 µm konnte nur um 28% auf R_a = 0.42 µm reduziert werden. [10] Damit war das hier vorgestellte Laserpolierverfahren um den Faktor 10 schneller bei gleichzeitig deutlich besserer Rauheitsreduzierung von 63%. In [3] wird für einen Werkzeugstahl eine Reduzierung der Ausgangsrauheit von R_a = 0.6 µm auf R_a = 0.29 µm, entsprechend einer Reduzierung um 52%, bei einer Flächenrate von 37.25 cm²/min berichtet. [3] Die Endrauheit war damit höher und die Flächenrate sowie die Rauheitsreduktion niedriger im Vergleich zu den hier vorgestellten Ergebnissen. Bei einer Aluminium-Druckgusslegierung konnte in [9] jedoch eine deutlich höhere Rauheitsreduzierung von 91 - 93% von R_a = 2.17 µm auf R_a = 0.2 - 0.15 µm bei einer Flächenrate von 20 - 60 cm²/min im Vergleich zu den vorliegenden Ergebnissen erzielt werden. [9] In [13] wird für Stahl bei vergleichbaren Ausgangs-(R_a = 0.4 - 0.5 µm) und Endrauheiten (R_a = 0.15 µm) mit einer Laserleistung von 1.5 kW eine Flächenrate von 10 cm²/min erreicht [13], entsprechend wird in den vorliegenden Untersuchungen mit nur 3.3-facher Laserleistung eine 126-fach höhere Flächenrate erzielt. Dementsprechend konnten mit dem hier vorgestellten Laserpolierverfahren ähnliche Rauheitswerte wie in der Literatur beschrieben erreicht werden, jedoch waren die erzielten Flächenraten aufgrund der hohen eingesetzten Laserleistung bei gleichzeitig schneller Strahlableitung deutlich höher.

Durch die Bearbeitung an Normalatmosphäre konnte es durch die Bearbeitung zu einer Oxidation der Oberfläche kommen. Zur Untersuchung einer möglichen Oxidation wurden EDX-Messungen durchgeführt.

Das glasperlengestrahlt Ausgangsmaterial hatte eine Sauerstoffkonzentration in Gewichtsprozent von $4.9 \pm 1.0\%$. Durch das Glasperlenstrahlen wurde die Sauerstoffkonzentration im Vergleich zum ungestrahlten Material deutlich erhöht. Das Material vor dem Glasperlenstrahlen hatte eine Sauerstoffkonzentration von nur $0.8 \pm 0.3\%$. Woher diese Erhöhung der Sauerstoffkonzentration kam und wie diese verhindert werden kann, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Es wird vermutet, dass ein kleiner Teil des Strahlmittels in die Materialoberfläche eingearbeitet wurde und dort verblieb. Dafür spricht, dass auch der Siliziumgehalt der gestrahlten Proben im Vergleich zu den ungestrahlten Proben deutlich erhöht war.

Abbildung 4 zeigt die Sauerstoffkonzentration in Gewichtsprozent in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit bei verschiedenen Linienabständen. Bei sehr geringen Linienabständen von $5 \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 4, violett) konnte eine deutlich höhere Sauerstoffkonzentration im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Ref) festgestellt werden, bei diesen Parametern kam es zu einer starken Oxidation des Materials, was auch an einer deutlichen Verfärbung der Materialoberfläche erkennbar war, siehe Abbildung 2. Durch den hohen Linienüberlapp von 98% wurde das Material durch die mehrfache Überfahrt stark erhitzt und die Temperatur über einen gewissen Zeitraum gehalten, wodurch das Material mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft reagieren konnte.

Auch bei Linienabständen von 10 und $15 \mu\text{m}$ konnte teilweise eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration im Vergleich zum Ausgangsmaterial festgestellt werden. Hier betrug der Linienüberlapp noch $96 - 95\%$ und die thermische Belastung des Materials war hoch. Mit zunehmendem Linienabstand konnte bei allen Scangeschwindigkeiten eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration festgestellt werden. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial wurde eine geringere Sauerstoffkonzentration gemessen. Entweder wurde das an der Oberfläche verbliebene Strahlmittel abgetragen oder es wurde in die Schmelze eingemischt und war somit an der Oberfläche nicht mehr messbar.

Die niedrigsten Sauerstoffkonzentrationen wurden bei hohen Linienabständen von 100 und $150 \mu\text{m}$, entsprechend einem Linienüberlapp von 64% bzw. 47% erreicht. Weiterhin wurden die geringsten Sauerstoffkonzentrationen bei einer Scangeschwindigkeit von 125 m/s erreicht. Bei höheren Scangeschwindigkeiten wurden bei gleichem Linienabstand etwas höhere Sauerstoffkonzentrationen gemessen. Dies könnte wiederum damit zusammenhängen, dass das Material mit zunehmender Scangeschwindigkeit nicht mehr ausreichend umgeschmolzen wurde, um das verbliebene Strahlmittel in das Material zu mischen.

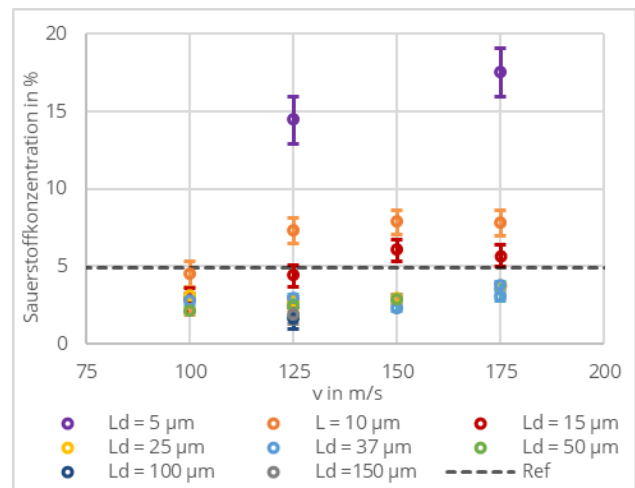


Abbildung 4: Sauerstoffgehalt an der Oberfläche in Abhängigkeit der Bearbeitungsgeschwindigkeit v bei verschiedenen Linienabständen L_d

Die geringste Sauerstoffkonzentration von ca. 2% wurde bei Linienabständen von 100 und $150 \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 4 dunkelblau und grau) und einer Scangeschwindigkeit von 125 m/s erreicht, wobei jedoch schlechtere Rauheitswerte erzielt wurden. Bei den Parametern mit der geringsten Oberflächenrauheit von 125 m/s und Linienabständen von 25 und $37 \mu\text{m}$ betrug die Sauerstoffkonzentration zwischen 2.75 und 3% . Damit war die Sauerstoffkonzentration in den lasergeglätteten Proben zwar niedriger als im Ausgangsmaterial, aber immer noch deutlich höher als im ungestrahlten Material.

Der Glanzwert des Ausgangsmaterials war mit $10 \pm 0.5 \text{ GU}$ sehr niedrig, was auf das Glasperlenstrahlen und die hohe Ausgangsrauheit zurückzuführen war. Der Glanzwert in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit bei verschiedenen Linienabständen ist in Abbildung 5 dargestellt.

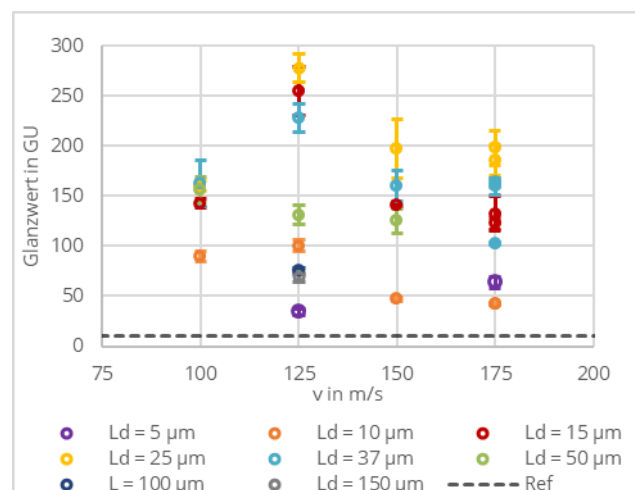


Abbildung 5: Glanzwert in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit v bei verschiedenen Linienabständen L_d

Bei allen untersuchten Parametern konnte eine Erhöhung des Glanzwertes gegenüber dem Ausgangsmaterial (Ref) erreicht werden. Bei sehr kleinen Linienabständen von 5 und $10 \mu\text{m}$ sowie bei großen Linienabständen von 100 und $150 \mu\text{m}$ war der erzielte Glanzwert am

geringsten, bedingt durch die hohe Oxidation bei kleinen Linienabständen sowie die nur noch unvollständige Glättung bei großen Linienabständen, siehe auch Abbildung 2.

Die höchsten Glanzwerte wurden bei einer Scange-
schwindigkeit von 125 m/s, sowie bei Linienabständen von 25 µm (gelb) erreicht, siehe Abbildung 5. Damit wurden die besten Glanzwerte bei den gleichen Parametern gemessen, bei denen auch die geringste Rauheit ermittelt wurde, vergleiche Abbildung 3 und 5. Der höchste erzielte Glanzwert betrug 275 GU, was einer Verbesserung von 96% gegenüber dem Ausgangsmaterial entsprach.

Die deutliche Verbesserung des Glanzwertes zeigte, dass das Hochrateglätten vergleichbare Ergebnisse liefert wie das Mikropolieren mit gepulster Laserstrahlung, da gerade beim Mikropolieren eine deutliche Erhöhung des Glanzwertes erreicht wird, wohingegen beim Makropolieren mit cw-Lasern der Glanzwert nahezu unverändert bleibt. [3,5]

Die ultraschnelle Strahlablenkung führte zu kurzen Einwirkzeiten, so dass nur dünne Oberflächenschichten im µm-Bereich aufgeschmolzen wurden. Das Verfahren war somit vergleichbar mit dem Mikropolieren, bei dem gepulste Laserstrahlung verwendet wird. [1,3,5] Durch die wesentlich höheren applizierten Leistungen konnten jedoch wesentlich höhere Flächenraten erzielt werden.

4. Zusammenfassung

Das Hochrate-Laserglätten von Edelstahl X5CrNi18/10 (1.4301) wurde untersucht. Die Proben wurden vor der Bearbeitung glasperlengestrahlt, wodurch eine homogene, raue Oberfläche mit einer Ausgangsrauheit von $S_a = 0.42 \mu\text{m}$ erzeugt werden konnte. Durch die Kombination eines 5 kW Multimode Faserlasers mit einer ultraschnellen Strahlablenkung mittels Polygonscanner konnten sehr hohe Geschwindigkeiten und damit hohe Flächenraten realisiert werden. Durch das Laserglätten konnte eine minimale Oberflächenrauheit von

$S_a = 0.11 \mu\text{m}$ erzielt werden, was einer Verbesserung der Oberflächenrauheit um 74% entsprach, bei einer Flächenrate von $A_R = 852 \text{ cm}^2/\text{min}$. Bei einer geringfügig höheren Rauheit von $S_a = 0.13 \mu\text{m}$ konnte eine Flächenrate von $A_R = 1262 \text{ cm}^2/\text{min}$ erreicht werden, was einer Steigerung der Flächenrate um 48% bei einer Rauheitsreduzierung um 68.3% entsprach.

Die Bearbeitungszeit betrug schließlich nur noch 7.9 – 11.7 min/m². Damit eröffnet das Verfahren völlig neue Anwendungsfälle. Damit war das Verfahren um den Faktor 21 bis 1052 mal schneller als das konventionellen Laserstrahlglätten. Damit wurden industrierelevante Prozesszeiten für das Laserstrahlglätten erreicht.

Gleichzeitig wurde auch der Glanzwert der Oberfläche deutlich erhöht. Der Glanzwert des Ausgangsmaterials war, bedingt durch das Glasperlenstrahlen und die hohe Ausgangsrauheit sehr niedrig. Durch das Laserstrahlglätten konnte der Glanzwert auf bis zu 275 GU gesteigert werden, was einer Verbesserung von 96% gegenüber dem Ausgangsmaterial entsprach. Die höchsten Glanzwerte wurden dabei bei den Parametern erzielt, bei denen auch die Rauheit am geringsten war. Somit konnte das Erscheinungsbild der Werkstoffoberfläche sichtbar verbessert werden.

Danksagung / Angaben zu Fördermittelgebern

Die Autoren danken für die Zuwendungen im Rahmen des Förderprogramms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Finanzierung des Projektes „SmoothLaser“ (KK5002705SY1).

Kontakt Daten

Laserinstitut Hochschule Mittweida
Technikumplatz 17
09648 Mittweida
Linda Pabst
pabst@hs-mittweida.de

Literaturverzeichnis

- [1] Willenborg, Edgar, Ross, Ingo, Kumstel, Judith, Flemmer, (2013): Werkzeugmaschine für das Laserpolieren, in: Werkstattstechnik online, 103, H. 6
- [2] Nüsser, Christian (2010): Gepulster Laserstrahl poliert Implantatoberflächen, in: Maschinenmarkt 44, 28 -30
- [3] Sassmannhausen, Astrid, Brenner, Andreas, Finger, Johannes (2021): Ultrashort pulse laser polishing by continuous surface melting, in: Journal of Materials Processing Tech., 293, 117058
- [4] Krishnan, Arun, Fang, Fengzhou (2019): Review on mechanism and process of surface polishing using lasers, in: Frontiers of Mechanical Engineering, 14, 299-319
- [5] Ross, Ingo, Temmler, André, Willenborg Edgar, Poprawe, Reihnhart, Teler, Marco (2015): Investigation of the influence of laser surface modifications on the adhesive wear behavior in dry cold extrusion of aluminum, in: Lasers in Manufacturing Conference
- [6] Temmler, André, Willenborg, Edgar, Wissenbach, Konrad (2012): Laser Polishing, in: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 8243, 19
- [7] Zhou, Yongquan, Zhao, Zhenyu, Zhang, Wei, Xiao, Haibing, Xu, Xiaomei (2019): Experiment Study of Rapid Laser Polishing of Freeform Steel Surface by Dual-Beam, in: Coatings, 9, 324
- [8] Bestenlehrer, Alexander (2015): Laserpolieren in der industriellen Anwendung, in: LASER MAGAZIN, 3, 11-12
- [9] Burzic, Bahrudin, Hofele, Markus, Mürdter, Steffen, Riegel, Harald (2016): Laser polishing of ground aluminum surfaces with high energy continuous wave laser, in: Journal of Laser Applications, 29, 01701

- [10] Giorleo, L., Ceretti, E., Giardini, C. (2015): Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas, in: Procedia CIRP, 33, 446-451
- [11] Richmann, Annika, Willenborg, Edgar, Wissenbach, Konrad (2010): Polieren optischer Präzisionsoberflächen mit Laserstrahlung, in DGaO Proceedings
- [12] Yung, K.C., Zhang, S.S., Duan, L (2019): Laser polishing of additive manufactured tool steel components using pulsed or continuous-wave lasers, in: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105, 425-440
- [13] Kumstel, Judith (2017): Enhancement of the area rate for laser macro polishing, in: Lasers in Manufacturing Conference