

Untersuchungen zu den Belastungsgrenzen des Polygonscansystems durch die genutzte Laserstrahlung

Marcel Wolf, Mathias Müller, André Streek
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida; Deutschland

Um die immer weiterwachsenden Laserleistungen der Lasergeräte auf dem Markt effektiv auf der Werkstoffoberfläche umsetzen zu können, werden extrem schnelle Laserstrahlablenksysteme benötigt. Zu diesem Zweck wurde in der Vergangenheit an der Hochschule Mittweida ein komplett neuartiges Polygonscannersystem entwickelt. Durch den steigenden Bedarf von immer kürzeren Laserpulsen und höheren Spitzenintensitäten der Industrie sollte das System hinsichtlich der Zerstörschwelle charakterisiert werden, um die Grenzen der optischen Schichten und somit des Scannersystems auszuloten. In der folgenden Arbeit wurde jedes optische Bauteil hinsichtlich der optischen Belastungsgrenze untersucht und charakterisiert. Augenmerk hierbei lag vornehmlich auf der Verwendung ultrakurzer Laserpulse aber auch thermale Belastungstests mittels kontinuierlichen Hochleistungslasern wurden durchgeführt.

1. Einleitung

Die Forschung und auch die Industrie fordern stetige Weiterentwicklung der bestehenden Technologie. Augenmerk liegt hierbei auf steigenden mittleren Laserleistungen aber auch kürzeren Pulsdauern, um die Vorteile der Laserbearbeitung immer besser nutzen zu können und neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Schnelligkeit ist ebenso ein Schlüsselfaktor für einen effektiven Prozess. Deswegen rücken auch die Pulswiederholraten der Lasergeräte und ebenso die Strahlablenksysteme in den Fokus der Forschung. Gerade bei der Strahlablenkung über große Flächen, wie in [1], ergeben sich immense Möglichkeiten die Prozesse immer effektiver zu gestalten. Dazu wurde in der Vergangenheit an der Hochschule Mittweida ein neues Scansystem basierend auf der Polygonscantechnik entwickelt [2]. In der folgenden Arbeit wird der in Mittweida entwickelte Polygonscanner auf seine Belastbarkeit geprüft. Jedes einzelne sich im Strahlengang befindliche Bauteil wird hinsichtlich seiner Zerstörschwelle charakterisiert und somit die Grenzen des Gesamtsystems ausgelotet.

Aufbau des Scanners

In Abbildung 1 ist der optische Aufbau des Polygonscansystems dargestellt. Der Scanner verfügt über eine 30 mm Apertur. In dieser ist ein Einkoppelfenster zum Schutz vor Verschmutzungen verbaut. Der kollimierte Strahl trifft senkrecht auf dieses Fenster. Anschließend wird der Laserstrahl von dem rotierenden Doppelpolygonrad in eine Raumrichtung (y) abgelenkt. Durch die hohen möglichen Umdrehungen des Doppelpolygons bis zu 10.000 U/min und die daraus resultierenden hohen Ablenkgeschwindigkeiten in dieser Achse wird diese auch als engl. fast axis, also schnelle Achse bezeichnet. Pro Facette wird eine Bearbeitungslinie realisiert. Beim Wechsel der Facette wird der Laserstrahl über die schnelle Elektronik des Scanners abgeschaltet. In dieser Zeit wird die Position des Galvanometerspiegels angepasst (x) was als engl. slow axis, also langsame

Achse bezeichnet wird. So wird schlussendlich eine 2-D Linienbearbeitung bestehend auch einer schnellen und einer langsamen Achse realisiert. Um nun die Spitzenbelastungen auf den optischen Schichten zu spezifizieren, müssen die Winkel, in denen der Laserstrahl auf diese Flächen auftrifft, bekannt sein. Der Laserstrahl trifft in einem 45° Winkel auf die Polygonradspiegeloberfläche und wird doppelt umgelenkt. Durch die Rotation des Polygons verändert sich der Winkel in Y-Richtung von -11° bis $+11^\circ$. Abschließend wird der Laserstrahl noch vom verbauten Galvanometerspiegel abgelenkt. Hier variiert der Winkel von -19° bis $+19^\circ$. Der genaue Aufbau sowie Funktionsweise des Scansystems wird ausführlich [3] in und [4] erläutert.

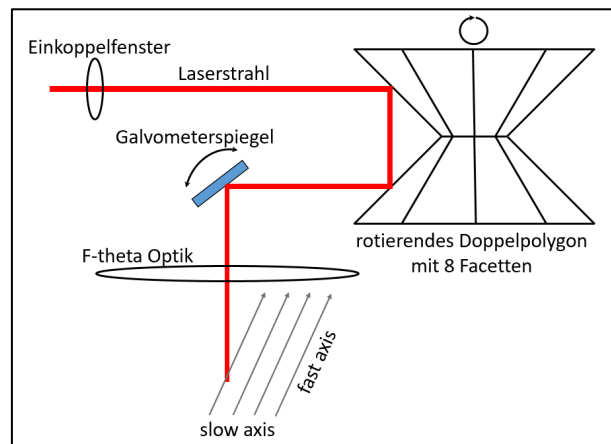


Abbildung 1: Schematische Abbildung des Strahlenverlaufes im Polygonscanner

2. Experimentelles Setup

Um die thermische Stabilität des Systems zu überprüfen, wurde der Scanner zunächst in eine Anlage integriert, welche über einen 3 kW singlemode Faserlaser verfügt. Der Scanner wurde mit voller Leistung 15 Minuten lang bei gleichbleibender Rotation des Polygonrades von 700 Umdrehungen pro Minute beaufschlagt. Anschließend wurden alle optischen Bauteile auf Beschädigungen der

optischen Schichten untersucht. Auf keinem der optischen Bauteile wurden Beschädigungen festgestellt. Um die Leistungsdichte weiter zu erhöhen, wurde das System in eine Anlage mit einem 10 kW singlemode Faserlaser der Firma IPG integriert. Auch hier wurde analog zum vorher durchgeführten Versuch der Scanner 15 Minuten lang bei einer Motorumdrehzahl von 700 U/min rotiert. Bei 2,5 kW beginnend wurde die Leistung stufenweise bis 10 kW erhöht. Auch nach diesem Test konnten keine Beschädigungen an den Bauteilen festgestellt werden. Im Folgenden sollen die thermische Belastungsgrenze und die Zerstörschwelle der optischen Schichten separat untersucht werden. Um die Zerstörschwellen der optischen Bauelemente herauszufinden, wurden für verschiedene Pulsenergien Einzelpulsabträge erzeugt. Hierzu wurde ein "Impulse" Lasersystem der Firma Clark genutzt. Die Charakteristika dieses Geräts sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Laserparameter Impulse	
Firma	Clark-MXR, Inc
Durchschnittliche Leistung	20 W
Repetitionsrate	single shot to 25 MHz
Pulsenergy	10 μ J
Pulsdauer	200 fs
zentrale Wellenlänge	1030 nm

Tabelle 1: Zusammenfassung der technischen Daten des genutzten gepulsten Lasersystems

Um die Leistungsdichte zum Zerstören der optischen Elemente zu erreichen, ist es notwendig die verwendete Laserstrahlung zu fokussieren. Dafür wurde in den folgenden durchgeführten Experimenten eine Optik mit der Brennweite $f = 56$ mm sowie eine Optik mit der Brennweite $f = 80$ mm verwendet. Durch die Verwendung dieser Optiken konnte die Fluenz in einem ausreichend großen Bereich variiert werden, um die Belastungsgrenze herauszufinden. Die Platzierung der optischen Bauteile in der Fokusebene ist in Abbildung 2 und Abbildung 3 schematisch dargestellt.

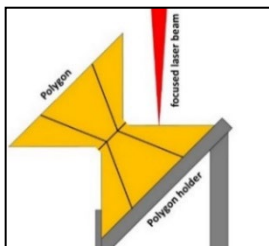


Abbildung 2: Setup zur Ablationsschwellenbestimmung der Polygonradbeschichtung

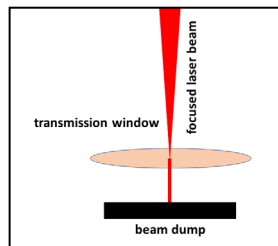


Abbildung 3: Setup zur Ablationsschwellenbestimmung der Einkoppelfenster-Beschichtung

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente dargestellt.

Thermische Belastungsgrenze

In diesem Versuchsteil wurde wiederholt versucht die thermische Belastungsgrenze des Polygonrades zu erreichen. Hierzu wurde ein Polygonrad, welches nicht rotiert, in den Rohstrahl platziert. Der verwendete Leistungsmesskopf begrenzte die maximale Laserleistung auf 5 kW. Dieses Polygonrad wurde nun mit 5 kW unterschiedlich lange bestrahlt, um sich der Zerstörschwelle anzunähern. Des Weiteren wurde die Temperatur des Rades mittels eines Thermosensors überwacht. Nach einer Bestrahlungszeit von 5 Minuten musste dieser Versuch abgebrochen werden, da der Leistungsmesskopf aufgrund von Überhitzung die Messung unterbrochen hat. Das Polygonrad hat dadurch keinerlei Beschädigung erlitten, sodass weitere Versuche mit erhöhter Leistungsdichte durch fokussierte Strahlung durchgeführt werden müssen.

Schwellfluenzuntersuchung

Nachdem keine Zerstörung mittels kontinuierlicher Laserstrahlung erreicht wurde, sollten die optischen Teile hinsichtlich ihrer Zerstörschwelle mittels eines Ultrakurzpulslasers untersucht werden.

Transmissionsfenster

Der erste Teil der Experimente war die Bestimmung des Strahldurchmessers mit Hilfe der Liu-Methode. Das Transmissionsfenster wurde mit einzelnen Laserpulsen mit steigender Pulsenergie strukturiert. Für die Berechnung des Spotdurchmessers mit der Liu-Methode [5] muss der gemessene Durchmesser quadriert werden. Die Ablationstests auf der Oberfläche des Transmissionsfensters wurden mit einer Optik mit einer Brennweite von 56 mm durchgeführt, da hier höhere Ablationsschwellfluenzen erwartet wurden. Der gaußsche Strahlradius (w_0) wurde mittels Liu-Methode berechnet. Dazu wird die folgende Gleichung verwendet.

$$w_0 = \sqrt{\frac{m}{2}} \quad (1)$$

m repräsentiert hierbei den Anstieg der Anpassungsfunktion, die sich durch den Verlauf der quadrierten Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsenergie ergibt. Auch die Ablationsschwellfluenz ist über die Parameter der Anpassungsfunktion möglich. Nur werden dabei die quadrierten Ablationsdurchmesser über die Fluenz aufgetragen und daran eine Funktion angepasst. Die notwendige Berechnungsgleichung der Ablationsschwellfluenz lässt sich wie folgt formulieren.

$$H_{th} = e^{-\frac{n}{m}} \quad (2)$$

Die Variable n beschreibt hierbei den Abstand der linearen Anpassungsfunktion zur Abszisse. Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen sind in Abbildung 4 dargestellt.

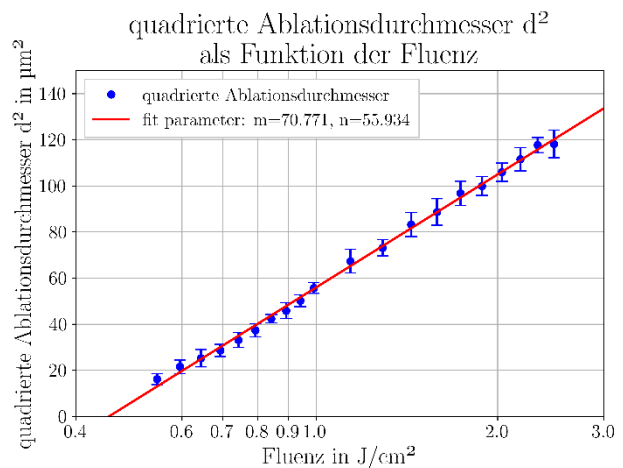
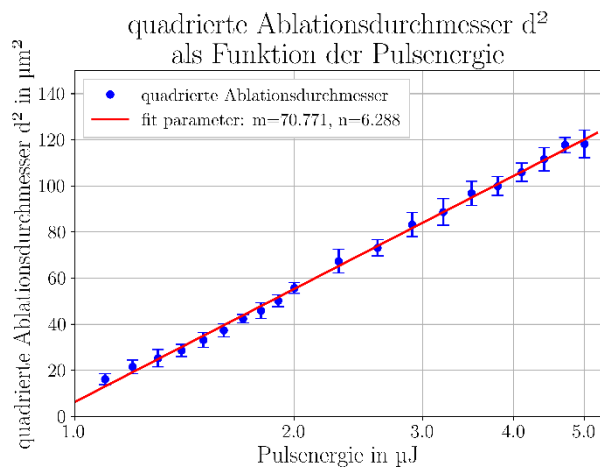


Abbildung 4 links: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsenergie zur Spotbestimmung nach Liu mit $f = 56 \text{ mm}$ Optik (Transmissionsfenster), rechts: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Fluenz zur Ablationsschwellenbestimmung mit $f = 56 \text{ mm}$ Optik nach Liu (Transmissionsfenster)

Mit den Parametern der angepassten Funktion in Abbildung 4 links wird mit Gleichung (1) ein gaußförmiger Strahlradius von $6 \mu\text{m}$ berechnet. Daraus ergibt sich ein gaußförmiger Strahldurchmesser von $12 \mu\text{m}$. Um diese theoretische Bestimmung zu prüfen, wurde das Strahlprofil mit einem Strahlanalysetool (Firma: Primes) vermessen. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 5 dargestellt.

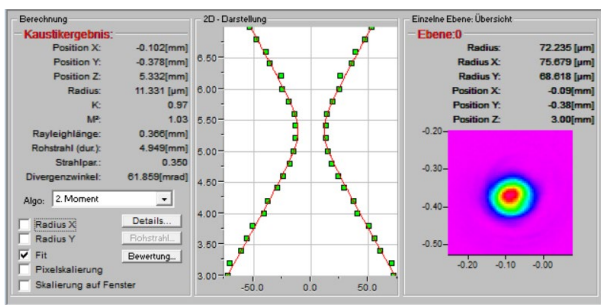


Abbildung 5: Vermessung des Strahlprofils mit $f = 56 \text{ mm}$ Optik

Der Strahlradius der Messung beträgt $11,3 \mu\text{m}$ und ergibt einen gaußförmigen Strahldurchmesser von $22,6 \mu\text{m}$. Da ein höherer Strahldurchmesser die Ablationsschwelle in der Berechnung senkt, wird der gemessene Strahldurchmesser von $22,6 \mu\text{m}$ für die weitere Berechnung verwendet. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Ablationsschwellenuntersuchungen dargestellt. Mit Gleichung (2) und den Parametern der angepassten Funktion in Abbildung 4 rechts wird eine Ablationsschwelle von $0,45 \text{ J/cm}^2$ berechnet. Zum Nachweis der berechneten Ablationsschwelle des Transmissionsfensters wurde ein Test mit 10 Pulsen durchgeführt. In Abbildung 6 sind die Ablationstests mit 10 Pulsen nahe der berechneten Ablationsschwelle dargestellt. Abtragskriterien sind bis zu einer Fluenz von $0,50 \text{ J/cm}^2$ sichtbar.

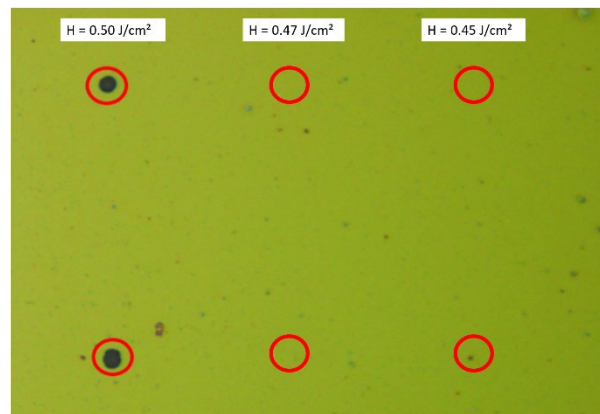


Abbildung 6: Ablationstest mit 10 Folgepulsen auf dem Transmissionsfenster nahe der errechneten Ablationsschwellfluenz

Bei einer Fluenz von $0,47 \text{ J/cm}^2$ ist keine Ablation erkennbar.

Polygonspiegel

Da es sich hierbei um ein Doppel-Polygonrad handelt, musste dieses mittels einer Halterung im 45° Winkel im Fokus platziert werden. Dies wurde mit der Halterung schematisch abgebildet in Abbildung 2 realisiert. Da für diese Versuche ein gebrauchtes Polygonrad verwendet wurde, war damit zu rechnen, dass zur Zerstörung geringere Fluenzen nötig werden. Deswegen wurde hier mit einer Optik mit 80 mm Brennweite gearbeitet. Die Beschichtung wurde mit Einzelpulsen mit abnehmender Pulsenergie abgetragen und eine logarithmische Funktion angepasst. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 und Abbildung 9 dargestellt.

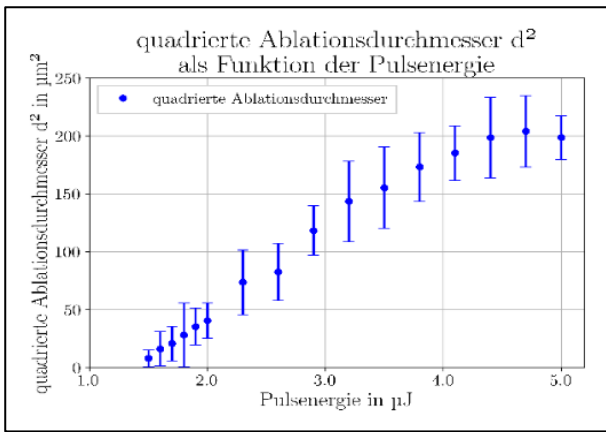


Abbildung 7: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsenergie zur Spotbestimmung nach Liu mit $f = 80$ mm Optik (Polygon)

Mit der angepassten Funktion aus den Datenpunkten aus Abbildung 7 und der Gleichung (1) wurde ein gaußförmiger Strahlradius von $9,5 \mu\text{m}$ berechnet. Auch hier wurde das Strahlprofil mit einem Strahlanalysetool (Firma: Primes) gemessen, um Abweichungen im Strahldurchmesser zu reduzieren.

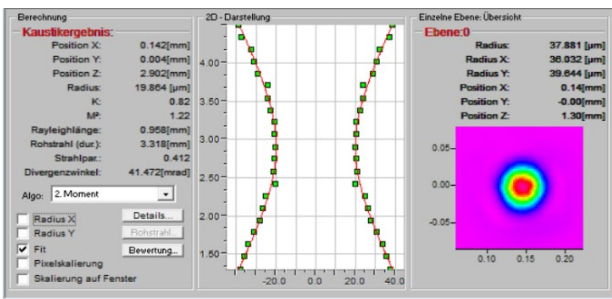


Abbildung 8: Vermessung des Strahlprofils der $f=80$ mm Optik

Das Ergebnis der Strahlparametermessung ist in Abbildung 8 dargestellt. Es wurde ein gaußförmiger Strahlradius von $19,9 \mu\text{m}$ gemessen. Für die weitere Berechnung der Fluenz wird der gemessene Strahldurchmesser verwendet. Die Ergebnisse der Ablationsversuche des Polygonrades sind in Abbildung 10 dargestellt. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit bei der Berechnung der Ablationsschwelle enthält die angepasste Funktion in Abbildung 10 nur Datenpunkte, die in der Nähe der Ablationsschwellefluenz /Pulsenergie liegen. Mit Hilfe der angepassten Funktion in Abbildung 10 rechts wurde eine Ablationsschwelle von $0,69 \text{ J/cm}^2$ berechnet. Zur Überprüfung der berechneten Ablationsschwelle für die Polygonradbeschichtung wurde ein Test mit 10 Pulsen durchgeführt.

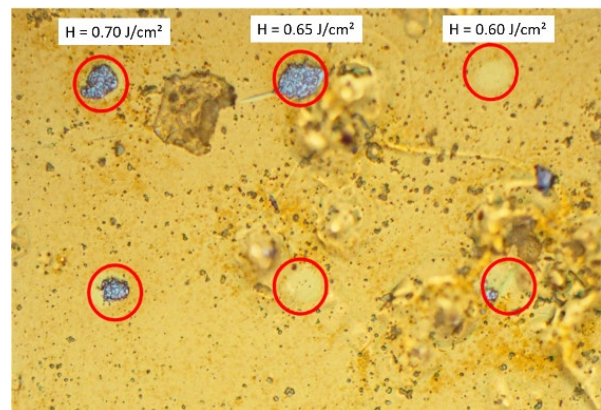


Abbildung 9: Ablationstest mit 10 Folgepulsen auf den Polygonspiegel nahe der errechneten Ablationsschwellefluenz

In Abbildung 9 sind die Ablationstests mit 10 Pulsen nahe der berechneten Ablationsschwelle dargestellt. Abtragskrater sind bis zu einer Fluenz von $0,70 \text{ J/cm}^2$ sichtbar, was sehr nah an der berechneten Abtragschwelle liegt. Bei einer Fluenz von $0,60 \text{ J/cm}^2$ ist keine Ablation erkennbar.

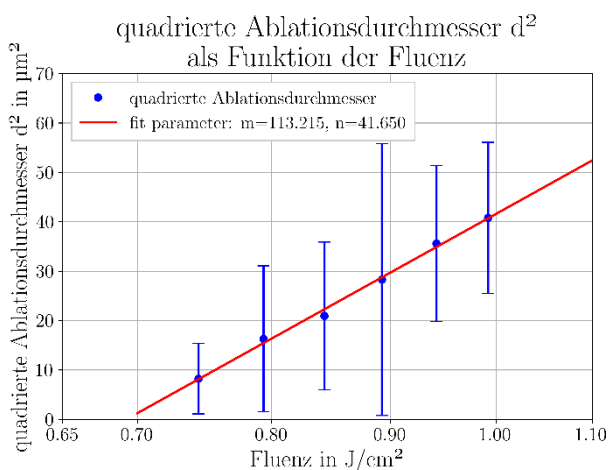
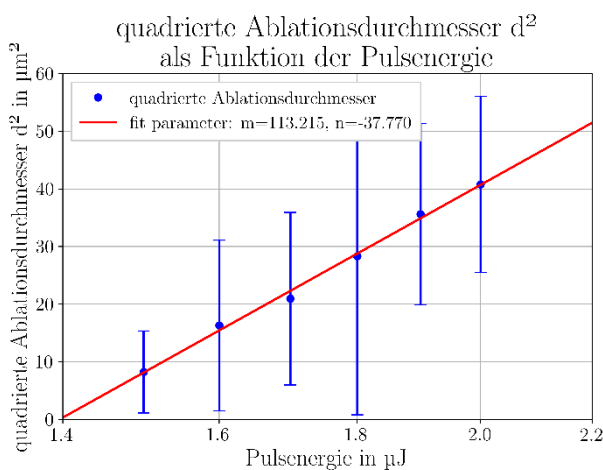


Abbildung 10 links: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsenergie zur Spotbestimmung nach Liu mit $f = 80$ mm Optik (Polygon), rechts: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Fluenz zur Ablationsschwellenbestimmung mit $f = 80$ mm Optik nach Liu (Polygon)

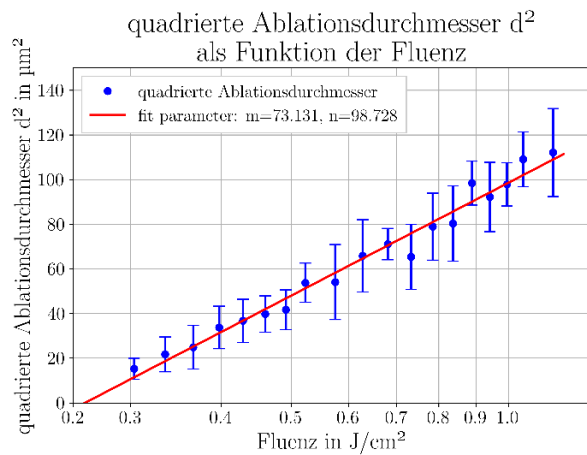
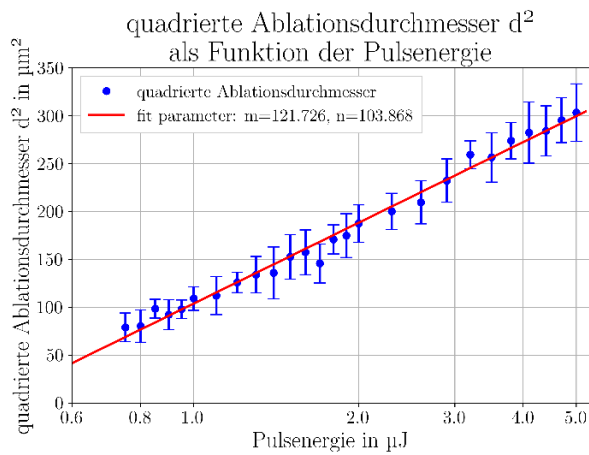


Abbildung 11 links: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsenergie zur Spotbestimmung nach Liu mit $f = 56$ mm Optik (Galvanometerspiegel), rechts: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Fluenz zur Ablationsschwellenbestimmung nach Liu mit $f = 56$ mm Optik (Galvanometerspiegel)

Galvanometerscannerspiegel

Aufgrund der hochreflektierenden Spiegelschicht des Galvanometerscannerspiegels wurde mit einer hohen Ablationsschwellfluenz gerechnet. Aus diesem Grund wurde zunächst eine Optik mit der Brennweite von 56 mm für die ersten Versuche eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 ersichtlich. Der gaußförmige Strahlradius kann mit Hilfe der Gleichung (1) auf $8 \mu\text{m}$ berechnet werden. Nun werden Ablationstests mit verschiedenen Fluenzen auf der Galvanometerspiegeloberfläche durchgeführt. Abbildung 11 rechts zeigt die Ablationsergebnisse auf der Galvanometerspiegelschicht. Mit den Parametern der angepassten Funktion in Abbildung 11 rechts und Gleichung (2) wurde eine Ablationsschwelle von $0,26 \text{ J}/\text{cm}^2$ berechnet. Überraschenderweise konnte die Fluenz nicht fein genug abgestuft werden, um die Ablationsschwelle des Galvanometerspie-

gels sicher zu spezifizieren. Demzufolge wurden anschließend, mit einer Optik, die über eine Brennweite von 80 mm verfügt, noch einmal Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse des Einzelpulsablationstests mit der Optik mit 80 mm Brennweite sind in Abbildung 12 dargestellt. Mit Hilfe der angepassten Funktion in Abbildung 12 rechts wurde eine Ablationsschwelle von $0,20 \text{ J}/\text{cm}^2$ berechnet. Zur Überprüfung der berechneten Ablationsschwelle des Galvanometerscannerspiegels wurde ein Test mit 10 Pulsen durchgeführt. In Abbildung 13 sind die Ablationstests mit 10 Pulsen nahe der berechneten Ablationsschwelle dargestellt. Abtragskrater sind bis zu einer Fluenz von $0,20 \text{ J}/\text{cm}^2$ sichtbar, was sehr nah an der berechneten Abtragungsschwelle liegt. Bei einer Fluenz von $0,18 \text{ J}/\text{cm}^2$ und darunter sind keine Auswirkungen der Laserbestrahlung in den mikroskopischen Bildern der Spiegeloberfläche sichtbar.

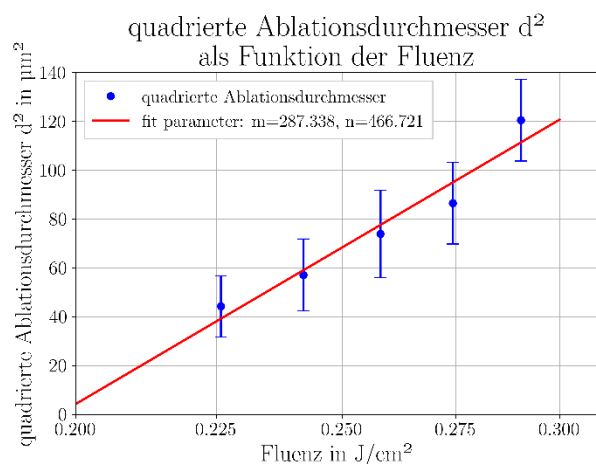
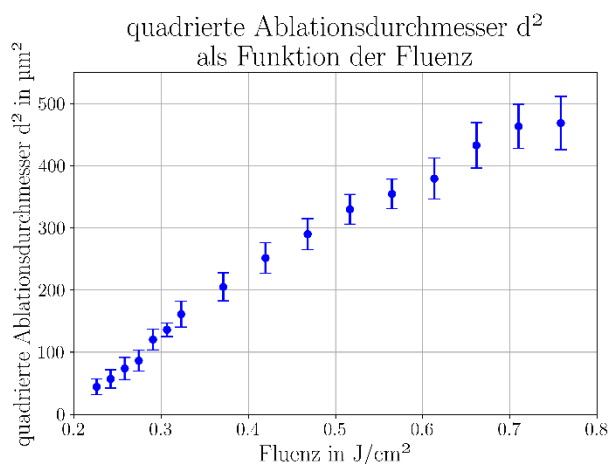


Abbildung 12 links: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Pulsenergie zur Spotbestimmung nach Liu mit $f = 80$ mm Optik (Galvanometerspiegel), rechts: quadrierte Ablationsdurchmesser in Abhängigkeit von der Fluenz zur Ablationsschwellenbestimmung mit $f = 80$ mm Optik nach Liu (Galvanometerspiegel)

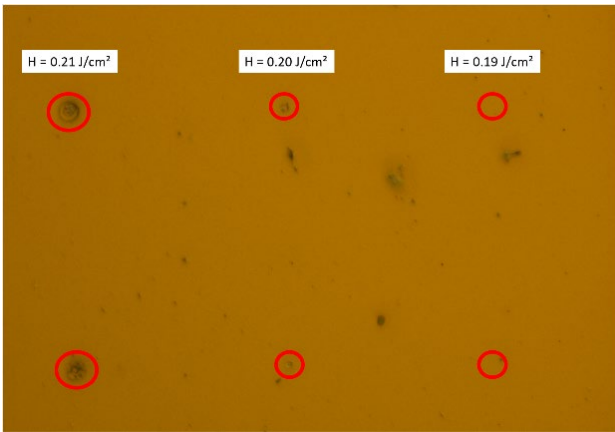


Abbildung 13: Ablationstest mit 10 Folgepulsen auf den Galvanometerspiegel nahe der errechneten Ablationsschwellfluenz

Das geplante Lasersystem im Projekt PULSE hat eine Rohstrahlfluenz von $1,96 \cdot 10^{-4} \text{ J/cm}^2$. Die Zerstörungsschwelle ($0,20 \text{ J/cm}^2$) des Galvanometerscannerspiegels ist 1000-mal höher als die Fluenz des geplanten Lasersystems.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Experimente zeigen die Ablationsschwellfluenzen der optischen Teile im Polygonscanner. Eine Zusammenfassung der Ablationsschwellen der einzelnen optischen Teile im Scannersystem ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Ablationsschwellenuntersuchungen

Zusammenfassung der Ergebnisse der Zerstörungsschwellenuntersuchungen		
Rostrahlfluenz des geplanten Lasersystems im Projekt PULSE in J/cm^2	optische Teile des Polygonscannersystems	Zerstörungsschwelle in J/cm^2
0.00019	Transmissionsfenster	0.50
	Polygonspiegel	0.69
	Galvanometerspiegel	0.20

Das geplante Lasersystem im Pulsprojekt wird eine geschätzte Fluenz im Rohstrahl von $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ J/cm}^2$ haben. Die experimentell ermittelten Ablationsschwellen der optischen Teile des Scannersystems halten Fluenzen von mindestens $1 \cdot 10^{-1} \text{ J/cm}^2$ stand. Mit diesen Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass die installierten optischen Teile und Beschichtungen der Strahlung des Pulslasersystems gewachsen sind. Abschließend soll eine Abschätzung zur maximal möglichen Durchschnittsleistung vom Lasergerät, mit der der Scanner beaufschlagt werden könnte, durchgeführt werden. Angenommen wird dazu ein üblicher Laseraufbau mit einem Rohstrahldurchmesser von 14 mm. Das schwächste Bauteil im Polygonscanner ist der Galvanometerspiegel. Dieser besitzt einen Scanwinkel von $\pm 19^\circ$. Das heißt, wenn der Galvanometerscanner Spiegel 19° dem Polygonrad zugeneigt ist, wird die bestrahlte Fläche auf dem Galvanometerspiegel minimal. Bei einem 14 mm Rohstrahl müsste ein Laser mit einer mittleren Leistung (bei einer Pulswiederholfrequenz von 25 MHz entsprechend dem Lasersystem Impulse) von 4.3 MW verwendet werden um die Zerstörungsschwellfluenz von $0,2 \text{ J/cm}^2$ auf dem Galvanometerspiegel zu erreichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschung im Rahmen des Projects "PULSE"

als Bestandteil des Horizon 2020 Projektes bei der Europäischen Union und der photonics public private partnership (Photonics 21).



PHOTONICS PUBLIC PRIVATE PARTNERSHIP

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 824996

This communication reflects only the author's view and the EC is not responsible for any use that may be made of the information it contains.



Literaturverzeichnis

- [1] Schille, Joerg; Schneider, Lutz; Ullmann, Francois; Mauersberger, Stefan; Loeschner, Udo (2017): *Bio-inspirierte Funktionalisierung von technischen Oberflächen durch Hochrate-Lasermikrostrukturierung*.
- [2] Streek, André; Klötzer, Sascha *Polygonscantechnik für die Lasermikrobearbeitung*.
- [3] Marcel Wolf, Gianluca Deninno, Nello Li Pira, André Streek (2023): *Understanding applications of a multifunction tool polygon scanner* in: *Laser Focus World*, 2023, Volume 59 Issue 04 April 2023, 31–34.
- [4] Wolf, Marcel; Müller, Mathias; Streek, André *Die nächste Generation der Polygonscannertechnik in der Lasermaterialbearbeitung*.
- [5] Liu, J. M. (1982): *Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes* in: *Optics letters*, 7, 5, 196–198.