

Qualitätsoptimierter Hochrateabtrag von Werkzeugstahl und Hartmetall mittels ultrakurzer Laserpulse im Burstbetrieb

Christian Kreisel¹, Tommy Knebel¹, Ronny Menzel¹, Daniel Metzner², Peter Lickschat²,
Steffen Weißmantel²

¹ACSYS Lasertechnik GmbH, Leipziger Str. 37, D-09648 Mittweida

²Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

In Zusammenarbeit mit dem Laserinstitut Hochschule Mittweida und gefördert im InnoTeam Programm der Sächsischen Aufbaubank wurde der Einfluss der Pulsdauer und des Burstmodus auf die Effizienz und Oberflächenqualität bei der Gravur von Werkzeugmaterialien mittels ultrakurzer Laserpulse erforscht und optimale Bearbeitungsregime gefunden. Die Kombination geeigneter Gravur- und Glättungsparameter sowie die Verwendung des Burstmodus im optimalen Fluenzbereich ermöglicht einen hochproduktiven Materialabtrag bei minimaler Anlagerung von Debris und minimaler Rauheit des Gravurbodens. Ebenfalls wurden Untersuchungen zu den bei der Ultrakurzpulslaserbearbeitung emittierten Röntgenstrahlung durchgeführt. Daraus resultiert eine gesteigerte Verantwortung für die Betreiber von Laseranlagen mit Ultrakurzpulslaser und den Lasermaschinenbau.

1. Einleitung

Der Materialabtrag mittels ultrakurzer Laserpulse im Bereich von einigen hundert Femtosekunden bis hin zu wenigen Pikosekunden steht seit vielen Jahren im Fokus der Forschungsarbeiten vieler Institute und rückt immer weiter ins Blickfeld der Lasermaschinenbauer. Ultrakurzpulslaser (UKP-Laser) sind in den vergangenen Jahren deutlich kompakter und industrietauglicher geworden und stellen, gepaart mit einer entsprechenden Präzisionsmaschine, ein geeignetes Werkzeug für die Präzisions- und Mikrobearbeitung dar. Da eine qualitativ hochwertige Oberfläche des Gravurbodens in der Regel nur bei verhältnismäßig geringen Fluenzen und damit auch geringen Pulsenergien erreicht wird, sind auch die umgesetzten Laserleistungen sehr gering, was dazu führt, dass die Abtragsprozesse sehr ineffizient ablaufen. Mittlerweile sind moderne UKP-Laser in der Lage, nicht nur Einzelpulse, sondern auch Pulszüge, sogenannte Bursts, mit Intraburstfrequenzen im MHz- bis GHz-Bereich zu emittieren. Diese ermöglichen es, mehrere Pulse mit niedrigen Pulsenergien bei optimaler Bearbeitungsfluenz auf die Materialoberfläche zu bringen und trotzdem über die Gesamtzahl der Pulse verhältnismäßig hohe Pulsenergien umzusetzen. Dies steigert die Prozessgeschwindigkeit und die umsetzbare Leistung, eröffnet jedoch eine hohe Parametervielfalt gepaart mit komplexen Ablationszusammenhängen, welche gemeinsam mit dem Laserinstitut Hochschule Mittweida untersucht wurden und im Folgenden vorgestellt werden.

2. Versuchsdurchführung

Für die Versuche auf Werkzeugstahl und Hartmetall kam ein Festkörperlaser mit variabler Pulsdauer τ_H von 270 fs bis 10 ps bei einer Wellenlänge von 1030 nm und einer maximalen mittleren Leistung von $P_{AV} = 20$ W zum Ein-

satz. Der Laserstrahl wurde mittels Galvanometerscanner über die Materialoberfläche abgelenkt und mit einem F-Theta Objektiv auf die Proben fokussiert. Es wurden quadratische Flächen mit jeweils 20 Überfahrten abgetragen. Dabei wurde die Fluenz zwischen 0,5 J/cm² und 2,5 J/cm² und die Anzahl der Pulse im MHz-Burst zwischen 1 und 9 sowie im GHz-Burst zwischen 1 und 25 variiert. Der laterale Abstand der Bursts betrug 6 μ m. Die Tiefe und Rauheit der entstandenen Kavitäten wurden mittels konfokalem Laserscanningmikroskop ermittelt. Aus dem abgetragenen Volumen konnte die Effizienz pro Burst und das ablatierte Volumen je Puls ermittelt werden [1].

3. Betrachtung des Materialabtrages im MHz-Burst-Regime

Die verwendete Strahlquelle ermöglicht die Abgabe von bis zu neun Laserpulsen innerhalb des MHz Pulszuges. Der zeitliche Abstand zwischen den Laserpulsen liegt dabei bei 15,5 ns. Die Gesamtenergie wurde gleichmäßig auf alle Laserpulse verteilt, sodass jeder Puls im Pulszug die identische Fluenz auf die Materialoberfläche appliziert.

3.1. Bearbeitung von Werkzeugstahl

Bei der Bearbeitung von Werkzeugstahl ist ein sehr deutlicher Einfluss der Pulsdauer auf das pro Puls abgetragene Materialvolumen erkennbar (Abb. 1). Es wird deutlich, dass bei einer Verringerung der Pulsdauer von 10 ps auf 1 ps im Einzelpulsabtrag mehr als die doppelte Abtragstiefe realisiert wird, was sich auch im abgetragenen Volumen pro Puls widerspiegelt (Abb. 2). Eine weitere Verringerung der Pulsdauer auf 270 fs hat nur noch einen geringen Einfluss auf das abgetragene Volumen pro Puls. Erhöht man nun die Zahl der Pulse im MHz-Burst so erhöht sich auch die erzielte Abtragstiefe. Obwohl der Zusammenhang zwischen Zahl der Pulse im MHz-Burst

und Abtragtiefe auf den ersten Blick in linearem Zusammenhang zu stehen scheint verdeutlicht die Betrachtung des Abtragsvolumens je Puls, dass dem nicht so ist.

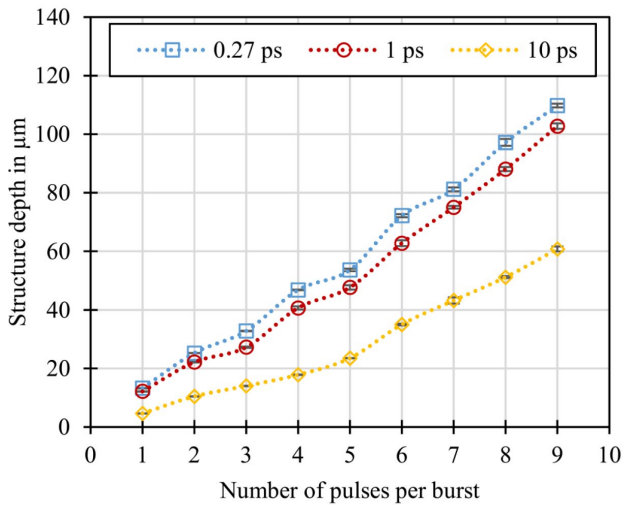


Abbildung 1: Abtragtiefe in Stahl in Abhängigkeit von der Pulsanzahl im MHz-Burst bei $2,5 \text{ J/cm}^2$ pro Puls [1]

Vielmehr handelt es sich beim Abtrag mit MHz-Burst um einen Prozess, bei dem die Strahlung der einzelnen Laserpulse in komplexer Wechselwirkung mit der Materialoberfläche, dem laserinduzierten Plasma und der Ablationswolke stehen. Es kann ein alternierender Zusammenhang zwischen den applizierten Pulsen und dem dabei ablatierten Volumen festgestellt werden, was auf Abschirmungseffekte durch das Plasma zurückzuführen ist.

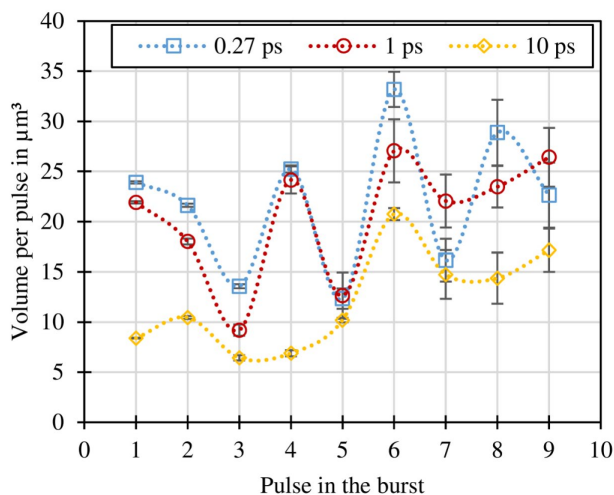


Abbildung 2: Abtragsvolumen je Puls auf Stahl in Abhängigkeit von der Pulsanzahl im MHz-Burst bei $2,5 \text{ J/cm}^2$ pro Puls [1]

Betrachtet man neben der Abtragtiefe bzw. des abgetragenen Volumens pro Puls die erzielbare Oberflächenqualität so ist festzustellen, dass sich bei kürzeren Pulsen im Bereich von 270 fs und 1 ps bei der Bearbeitung mit Fluenzen nahe der Schwellfluenz eine rauere Oberfläche ausbildet als bei den vergleichsweise langen Pulsen mit 10 ps Dauer (Abb. 3). Erhöht man die Fluenz pro Puls auf $2,5 \text{ J/cm}^2$ und weiter gleichen sich die Prozesse bezüglich des Bearbeitungsergebnisses immer mehr an.

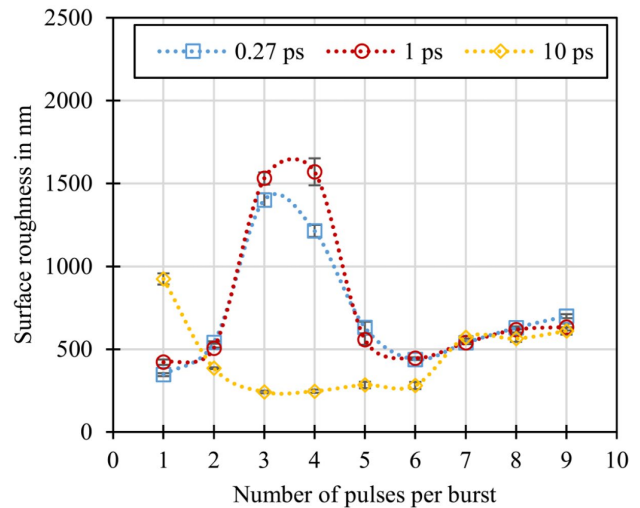


Abbildung 3: Mittlere Flächenrauheit in Abhängigkeit der Pulsanzahl im MHz-Burst bei $1,5 \text{ J/cm}^2$ pro Puls bei der Bearbeitung von Stahl [1]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Materialabtrag von Werkzeugstahl bei einer Pulsdauer von 270 fs und 1 ps nahezu identisch ist und die Ergebnisse der Abtragtiefe, des abgetragenen Volumens je Puls und auch die erzielbare Oberflächenqualität vergleichbar sind. Dementgegen ist der Materialabtrag mit einer Pulsdauer von 10 ps deutlich unproduktiver, die erzielbaren Oberflächen sind jedoch glatter und die Prozessführung stellt sich deutlich einfacher dar.

3.2. Bearbeitung von Hartmetall

Bei der Bearbeitung von Hartmetall mit dem MHz-Burst zeigt sich, dass die Abtragstiefen im Vergleich zum Stahl geringer ausfallen. Obwohl die Effizienzsteigerung bei der Einzelpulsbearbeitung durch eine Verringerung der Pulsdauer unter 1 ps vergleichbar mit den Ergebnissen auf Stahl ist, spiegelt sich der Unterschied der Pulsdauer mit steigender Zahl der Pulse im MHz-Burst nicht so stark wider (Abb. 4).

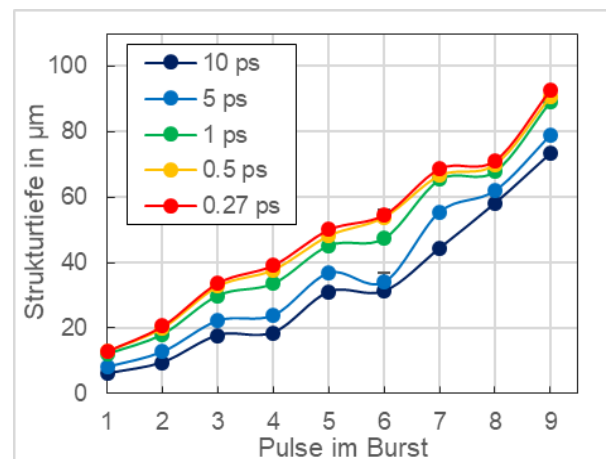


Abbildung 4: Strukturtiefe in Hartmetall in Abhängigkeit von der Pulsanzahl im MHz-Burst bei einer Fluenz von $2,5 \text{ J/cm}^2$ pro Puls

Bei Betrachtung des Abtragsvolumens je Puls (Abb. 5) zeigt sich, dass das alternierende Abtragsverhalten

ebenfalls auftritt aber deutlich intensiver ausgeprägt ist als dies bei Stahl der Fall ist.

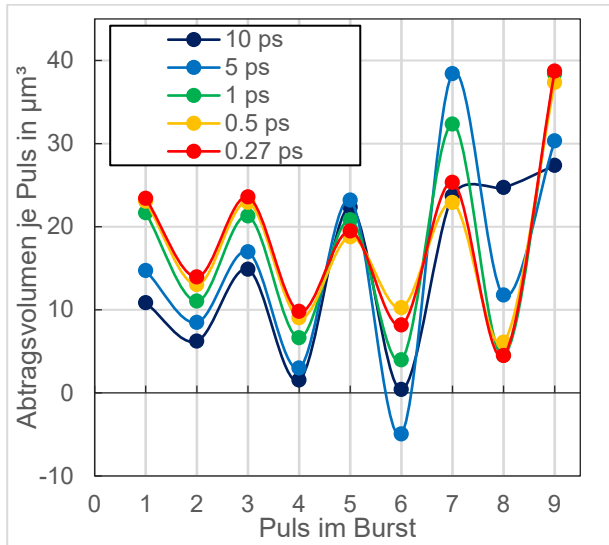


Abbildung 5: Abtragsvolumen je Puls auf Hartmetall in Abhängigkeit von der Pulsanzahl im MHz-Burst bei $2,5 \text{ J/cm}^2$ pro Puls

Bemerkenswert ist, dass vor allem bei Pulsdauern über 1 ps die geradzahigen Pulse im MHz-Burst ein sehr geringes und unter Umständen sogar negatives Abtragsvolumen aufweisen, was darauf hindeutet, dass durch die Wechselwirkung eines geradzahigen Folgepulses mit einer bestehenden Ablationswolke Partikel aus der Wolke auf die Materialoberfläche abgeschieden werden [2]. Die Ermittlung der Flächenrauheit der Strukturböden zeigt über den gesamten betrachteten Parameterbereich einen sehr geringen Einfluss der Pulsdauer. Vor allem bei geringen Fluenzen im Bereich von $0,5 \text{ J/cm}^2$ bis $1,5 \text{ J/cm}^2$ können gleichmäßig glatte Oberflächen mit einer mittleren Flächenrauheit von ca. 200 nm erzeugt werden. Bei höheren Fluenzen wird ein leichter Einfluss der Pulsdauer und Pulsanzahl im Burst erkennbar (Abb. 6).

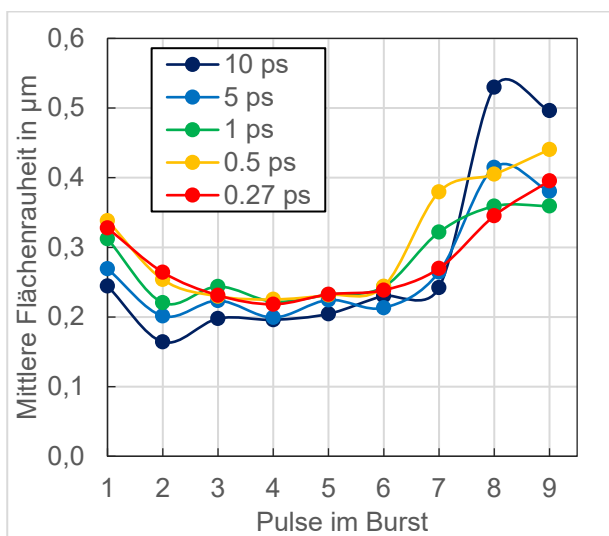


Abbildung 6: Mittlere Flächenrauheit in Abhängigkeit der Pulsanzahl im MHz-Burst bei $2,5 \text{ J/cm}^2$ pro Puls bei der Bearbeitung von Hartmetall

4. Betrachtung des Materialabtrages im GHz-Burst-Regime

Neben der Abgabe von Laserpulsen mit einer Intraburstfrequenz von 65 MHz ermöglicht die verwendete Laserquelle auch die Abgabe von bis zu 25 Laserpulsen im sogenannten GHz-Burst mit einer Intraburstfrequenz von 5 GHz, was einem zeitlichen Pulsabstand von 200 ps entspricht. Die Pulsenergien jedes einzelnen Intraburstpulses können nicht variiert werden, sodass der erste Puls maximale Energie besitzt und diese dann exponentiell von Puls zu Puls abnimmt.

4.1. Bearbeitung von Werkzeugstahl

Anhand der Messwerte der ermittelten Strukturturen erkennt man, dass mit dem GHz-Burst eine effiziente Umsetzung der Energie in ablatiertes Volumen nicht möglich ist. Es kommt bei der Verwendung von mehr als einem Puls im GHz-Burst zu einer Reduzierung der Strukturtiefe, die erst bei einer ausreichend hohen Zahl von Pulsen im Burst wieder steigt. Bei der visuellen Begutachtung der Proben konnte bei einigen Parameterkombinationen bereits eine sehr glänzende Oberfläche festgestellt werden. Nach Ermittlung der mittleren Flächenrauheit bestätigte dies Rauheiten der strukturierten Flächen von $S_A < 80 \text{ nm}$. Weitere Versuche zeigten, dass es im GHz-Burst möglich ist raue Oberflächen, welche z.B. bei der Gravur mit hohen Fluenzen entstehen, zu glätten und Debris von den Gravurkanten zu entfernen (Abb. 7).

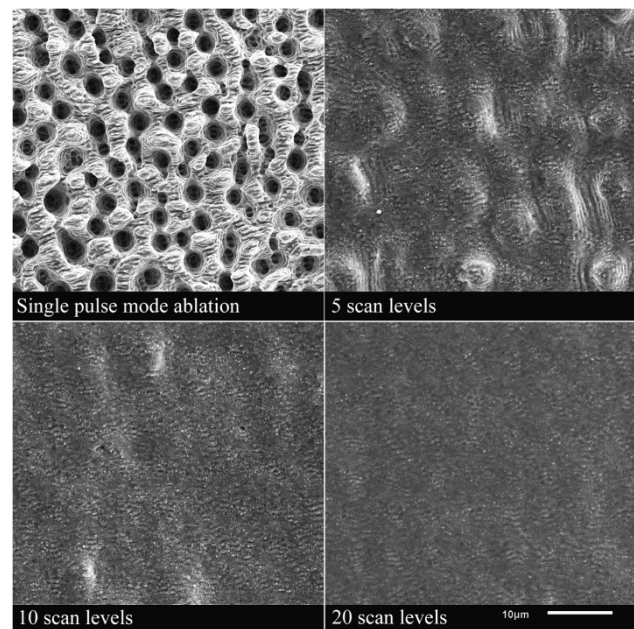


Abbildung 7: Schrittweise Glättung eine Stahloberfläche im GHz-Burst-Modus [3]

Grund hierfür scheint das entstehende Plasma zu sein, welches durch die schnelle Abfolge von Pulsen immer weiter aufgeheizt wird und damit zum einen mikroskopische Umschmelzungen an der Oberfläche erzeugt und zum anderen durch den immensen Druckanstieg und seine Expansion Verschmutzungen wegschleudert. Es

wurden Verbesserungen der Oberflächenqualität um Faktor zehn zur Ausgangsrauheit realisiert.

4.2. Bearbeitung von Hartmetall

Auch bei der Bearbeitung von Hartmetall kann im GHz-Burst ein drastischer Abfall der Abtragtiefe festgestellt werden, die, wie bei der Stahlbearbeitung, unabhängig von der Pulsdauer zu sein scheint. Die erzielbaren Rauheiten sind dabei mit $S_A < 100$ nm vergleichbar. REM-Untersuchungen an der Oberflächenstruktur zeigen, dass ab einer Pulsanzahl von vier Pulsen im GHz-Pulszug die Elemente WC und Co des Verbundwerkstoffes nicht mehr getrennt wahrgenommen werden können (Abb. 8).

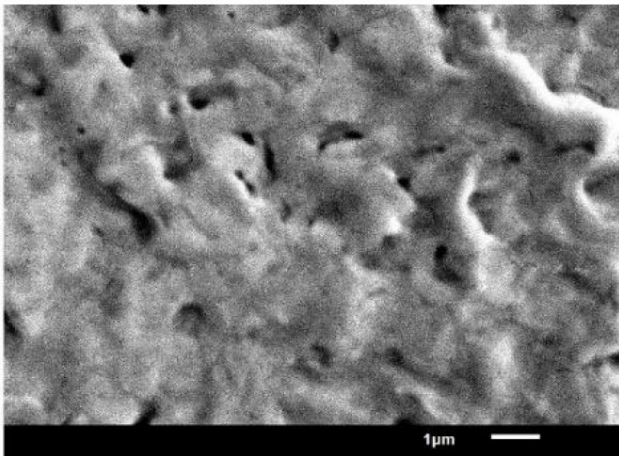
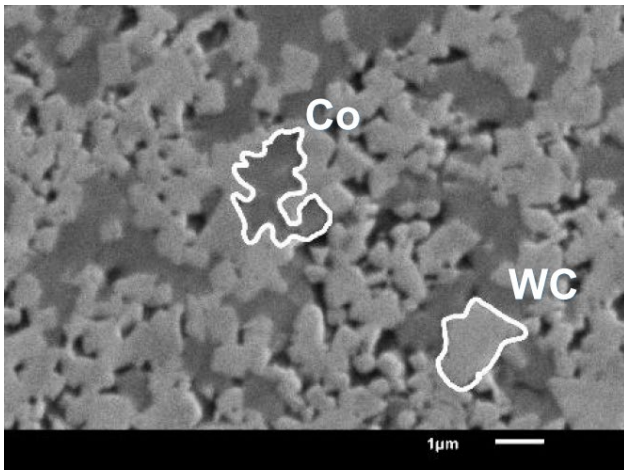


Abbildung 8: Oberfläche von Hartmetall vor (oben) und nach (unten) der Bearbeitung mit GHz-Pulszügen

Vielmehr stellt sich die Oberfläche als gänzlich umgeschmolzen dar, wobei EDX Analysen zeigen, dass die Stöchiometrie des modifizierten Bereiches, der des Basismaterials entspricht. Offensichtlich wird das erzeugte Plasma durch die schnelle Abfolge der Pulse vollständig ionisiert und schirmt die Materialoberfläche damit von den Folgepulsen ab. Dieses heiße Plasma ist wiederum in der Lage, die Verbundpartner trotz ihrer sehr unterschiedlichen Schmelzpunkte aufzuschmelzen und als oberflächliche Legierung erstarren zu lassen [3].

5. Erkenntnisse zur Emission von Röntgenstrahlung

Da durch die hohen Pulsspitzenleistungen bei der Laserbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern die Sekundärstrahlung aus dem laserinduzierten Plasma deutlich höhere Photonenenergien aufweist als dies noch bei der Verwendung von Nanosekundenlasern der Fall war und das Strahlenschutzgesetz um UKP-Laseranlagen als „Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung“ erweitert wurde, kommt dem Strahlenschutz bei den Versuchsreihen ein gesondertes Augenmerk zu. So wurden bei den Versuchen erste Untersuchungen mit einem Ortsdosimeter innerhalb der gekapselten Laserzelle durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, dass im MHz-Burstmodus (MBM) aber vor allem im GHz-Burstmodus (GBM) und einer Kombination aus MHz- und GHz-Burst, auch Bi-Burstmodus (BBM) genannt, die Röntgendosis deutlich über den Werten eines Einzelpulses (SPM) bei gleichen Prozessparametern liegt (Abb. 9). Da es sich hierbei um komplexe Zusammenhänge bei der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Plasma und der Ablationswolke handelt, müssen noch weitere Versuche unternommen werden, um diese extreme Erhöhung der Dosisleistung bei unterschiedlichen Bearbeitungsprozessen und Regimes verstehen zu können und eine sichere Abschirmung dieser realisieren zu können.

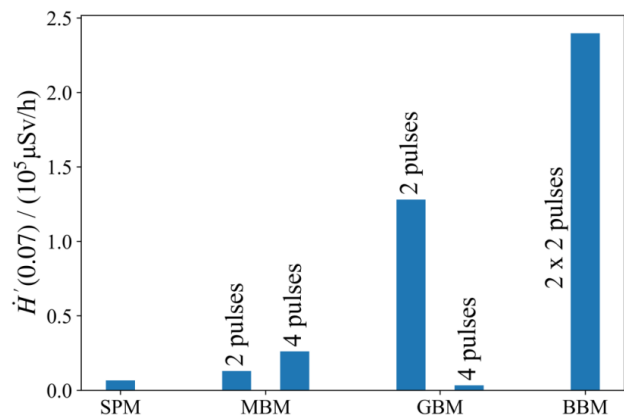


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Ortsdosisleistung $\dot{H}'(0,07)$ zwischen Einzelpulsbearbeitung und unterschiedlicher Burst-Modi bei einer Fluenz von 73 J/cm^2 und einer Pulsdauer von 270 fs. [4]

6. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Materialabtrag von Stahl und Hartmetall haben gezeigt, dass die Verwendung des MHz-Bursts eine deutliche Steigerung der umsetzbaren Leistung bei guter Oberflächenqualität ermöglicht. Vor allem bei der Stahlbearbeitung kann eine Verkürzung der Pulsdauer auf <1 ps eine weitere Effizienzsteigerung mit sich bringen, wenngleich es dabei schwieriger wird, eine glatte Oberfläche zu erzeugen. Dementgegen liefert der Verwendung des GHz-Burst keine Steigerung der Abtragseffizienz, ermöglicht jedoch die Reinigung und Glättung der Gravuroberfläche und kann unter Umständen

in den Randbereichen des Bauteils Legierungen erzeugen und Eigenschaftsänderungen hervorrufen, die so technisch noch nicht realisierbar sind. Die Überwachung des Arbeitsraumes in und um die Maschine hat gezeigt, dass eine röntgengerechte Ausführung des Versuchstandes und eine sichere Umhausung der Bearbeitungskammer für den Arbeitsschutz eine zentrale Rolle einnehmen und auch in Zukunft die Maschinenbauer und Betreiber von UKP-Laseranlagen vor neuen Herausforderungen gestellt werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Europäischen Sozialfonds für Deutschland (ESF) für die Förderung des Projekts Nr. 100360637 sowie die Sächsische Aufbaubank für die Unterstützung und Betreuung. Dank auch an das Laserinstitut Hochschule Mittweida für die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente und die bemerkenswerte Zusammenarbeit.



Europa fördert Sachsen.
ESF
Europäischer Sozialfonds



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Lickschat, D. Metzner, S. Weißmantel, „Burst mode ablation of stainless steel with tunable ultrashort laser pulses“ J. Laser Appl. 33, 022005 (2021)
- [2] D. Metzner, P. Lickschat, S. Weißmantel, “Investigations of qualitative aspects with burst mode ablation of silicon and cemented tungsten carbide”, Applied Physics A (2019) 125:411
- [3] D. Metzner, P. Lickschat, S. Weißmantel, “High-quality surface treatment using GHz burst mode with tunable ultrashort pulses”, Applied Surface Science 531 (2020) 147270
- [4] D. Metzner, M. Olbrich, P. Lickschat, A. Horn, S. Weißmantel, “X-ray generation by laser ablation using MHz to GHz pulse bursts”, J. Laser Appl. 33, 032014 (2021)