

# Studie zur Bildung einer Oberflächenlegierung auf WC-Co Hartmetall mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung im kombinierten MHz/GHz bzw. MHz/MHz-Burstmodus

Philipp Rebentrost, Andy Engel, Daniel Metzner, Steffen Weißmantel

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

## Abstract

In dieser Studie wird über die Erzeugung und Nutzung von hochfrequenten kombinierten MHz- und GHz- Bursts aus ultrakurzen Laserpulsen berichtet, mit dem Ziel eine Oberflächenlegierung auf dem Verbundwerkstoff WC-Co zu bilden. Die resultierenden Topographien, Abtragtiefen und chemischen Zusammensetzungen der bestrahlten Materialoberflächen werden im Hinblick auf die Modifikation der Oberfläche des gewählten Verbundwerkstoffes charakterisiert. Die Bildung einer Oberflächenlegierung ist nur in einer gemeinsamen metastabilen flüssigen Phase der Elemente WC und Co möglich. Die Ergebnisse dieser Fallstudie zeigen, dass mit hochfrequenten Bursts ultrakurzer Laserpulse im untersuchten Parameterbereich die Bildung einer Oberflächenlegierung möglich ist, ohne dass sich die chemische Zusammensetzung von WC und Co tendenziell ändert.

## 1. Einleitung

In den Untersuchungen von Metzner et al. wurde der Verbundwerkstoff Wolframkarbid (WC-Co) mit ultrakurzen Laserpulsen im Burstmodus bestrahlt, wobei Burstpuls-Wiederholfrquenzen von 80 MHz [1] und 5 GHz [2] verwendet wurden. Anhand von REM-Aufnahmen konnte gezeigt werden, dass im bestrahlten Bereich die Metallmatrix (Co) und die als Verstärkung dienenden WC-Partikel nicht mehr zu unterscheiden waren. Analysen der chemischen Zusammensetzung ergaben, dass sich das Verhältnis von Co zu WC nach der Bestrahlung nicht verändert hatte. Die Autoren begründeten dieses Phänomen mit der Entstehung einer überhitzten Schmelze, da bei einer vergleichsweise langsamen Erwärmung das Kobalt verdampfen würde, bevor sich das Wolframkarbid in der Schmelzphase befindet [3, 4]. Das Ziel dieser Fallstudie ist eine Erweiterung der in [1] und [2] durchgeführten Untersuchungen und eine detaillierte Charakterisierung des erstarrten Schmelzfilms hinsichtlich einer möglichen Legierungsbildung auf WC-Co-Hartmetall unter Verwendung ultrakurzer Burstpulse in Abhängigkeit der Laserpulsfluenz und den Intra-Burst-Pulswiederholfrquenzen im MHz- und GHz-Bereich.

## 2. Experimentelle Details und analytische Methoden

### 2.1 Optischer Aufbau

Für die Experimente wurde ein Festkörperlaser (Fuego™, Time Bandwidth®) mit einer maximalen mittleren Leistung  $P_{\text{avg}}$  von 40 W, einer Pulsdauer von 10 ps und einer Wellenlänge  $\lambda$  von 1064 nm verwendet. Der Laser ist in der Lage, einen 8-Pulsburst mit einer Wiederholungszeit von 12 ns zu erzeugen. Die Realisierung externer Doppelpulse erfolgt durch eine weitere Aufspaltung in jeweils zwei Teilpulse. Dafür wird eine externe Verzögerungsstufe nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers verwendet. Der erzeugte Burstpulszug mit in Summe 16 Burstpulsen wird in dieser Arbeit als 2x8-Burst bezeichnet (siehe Abbildung 1). Ein f-Theta-Objektiv mit einer Brennweite von 100 mm wird verwendet, um die Laserstrahlung auf der Materialoberfläche auf einen Strahlradius  $\omega_0$  von 15  $\mu\text{m}$  zu

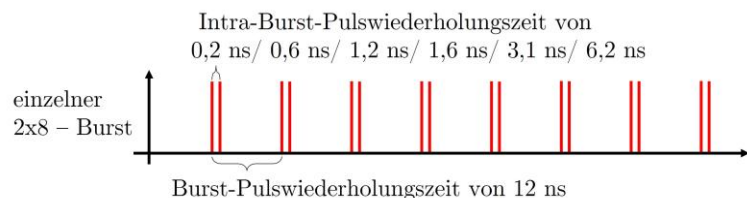


Abbildung 1: Energetisch – zeitliche Aufteilung eines 2x8-Burst.

Die Realisierung externer Doppelpulse erfolgt durch eine weitere Aufspaltung in jeweils zwei Teilpulse. Dafür wird eine externe Verzögerungsstufe nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers verwendet. Der erzeugte Burstpulszug mit in Summe 16 Burstpulsen wird in dieser Arbeit als 2x8-Burst bezeichnet (siehe Abbildung 1). Ein f-Theta-Objektiv mit einer Brennweite von 100 mm wird verwendet, um die Laserstrahlung auf der Materialoberfläche auf einen Strahlradius  $\omega_0$  von 15  $\mu\text{m}$  zu

fokussieren (gemessen mit Primes MicrospotMonitor nach ISO 11146). Zur Ablenkung der Laserstrahlung auf der Probenoberfläche wird ein Galvanometer-Scanner der Firma Aerotech GmbH benutzt.

## 2.2 Gewählte Parameter

Für die Charakterisierung der erstarrten Schmelze wurden Flächen mit einer Abmessung von 5 mm Länge und 12 mm Breite erzeugt. Für eine homogene Oberflächenbestrahlung wurde ein geometrischer Linienabstand von 3  $\mu\text{m}$ , bei einer Repetitionsrate von  $f = 50 \text{ kHz}$ , gewählt. Der untersuchte Bereich der Intra-Burst-Puls wiederholungszeit war auf 0,2 ns bis 6,2 ns begrenzt. Dies ist deutlich kürzer als die von der Laserquelle bereitgestellte interne Verzögerungszeit von 12 ns. Die Fluenz wurde von 0,17 J/cm<sup>2</sup> bis 0,32 J/cm<sup>2</sup> variiert. Die Zahl der Überfahrten betrug eins, vier und zehn.

## 2.3 Probencharakterisierung und Analysemethoden

Die Versuche wurden am Hartmetall-Verbundwerkstoff WC-Co (Feinkorn Carbideur 902, Carbideur Hartmetall AG), bestehend aus 90 % WC als keramische Verstärkung und 10 % Co als Bindephase, durchgeführt. Die Verwendung konfokaler Laserscanning-Mikroskopie (Olympus Lext 3D OLS4100) diente der quantitativen Analyse der resultierenden Ablationstiefen und der gemittelten Oberflächenrauheit  $S_a$  nach ISO 25178. Alle Messungen wurden mit einer Grenzwellenlänge von 30  $\mu\text{m}$  (entsprechend dem Strahltaillendurchmesser  $2 \omega_0$ ) durchgeführt, um das Welligkeitsprofil aus den Messwerten zu entfernen. Darüber hinaus wurden qualitative Analysen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie Analysen der chemischen Zusammensetzung mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt (Jeol JSM-6512 V mit Xflash® Detektor 5010). Da die Oberflächenrauheit  $S_a$  gemäß ISO 25178 eine Größe ist, die aus einer Flächenmessung ermittelt wird, kann auf eine Angabe der Standardabweichung verzichtet werden. Rauheit und Welligkeit werden durch eine vordefinierte Grenzwellenlänge unterschieden. Die Rauheitsdaten der konfokalen Laser-Scanning-Mikroskopie werden daher nicht durch Unterschiede in der Welligkeit der Topographie beeinflusst, die durch REM-Bilder sichtbar gemacht werden. Um die Tiefe des erstarrten Schmelzfilms zu charakterisieren, wurden die Proben geteilt und in Harz (Technovit® 5071) eingebettet. Nach dem Aushärten des Harzes erfolgte das Schleifen und Polieren für eine Analyse des Querschnitts.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

In dieser Studie wurden die Diskussionen und Interpretationen der bestrahlten WC-Co-Oberfläche durch die Klassifizierungen in Gruppen hinsichtlich der erzeugten Topographie der erstarrten Schmelze und des Einflusses des Schmelzfilms auf die nicht bestrahlte, geschliffene Materialoberfläche in Abhängigkeit von der Laserpulsfluenz, der Anzahl der Überfahrten und der Pulsfolgezeit innerhalb des Pulses vorgenommen. Die Klassifizierung in Gruppen wurde entsprechend nachfolgender Punkte durchgeführt:

- Gruppe 1 Im Vergleich zur Bulk-Oberfläche bleibt die resultierende Topographie tendenziell unverändert, geringe Dicke der Schmelzschicht, keine messbare Ablationstiefe (Abbildung 2- links).
- Gruppe 2 Bildung von selbstorganisierten Porenstrukturen. Aufgrund der großen Rauheit und Welligkeit sind keine Aussagen über eine gemittelte Ablationstiefe möglich (Abbildung 2- links).
- Gruppe 3 Geschlossener erstarrter Schmelzfilm mit Erhöhungen entsprechend dem geometrischen Burst- und Linienversatz. Größte Ablationstiefen (Abbildung 2- links).

Die Einteilung der Parametersätze in Gruppen ist in Abbildung 2-mittig dargestellt. Für die Einteilung in Gruppen existiert kein scharfer Übergang, diese wurde nach dominierenden Merkmalen getroffen.

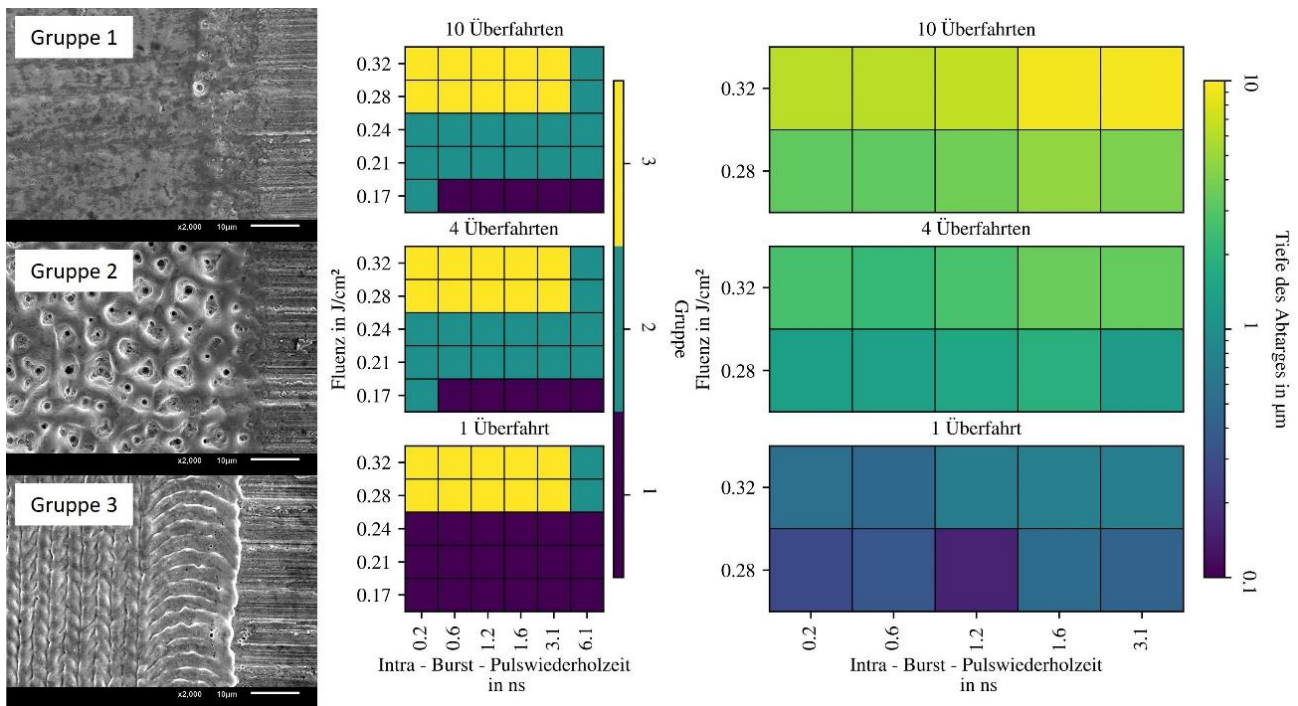


Abbildung 2: repräsentative Strukturen der Gruppen (links), Einteilung der einzelnen Parametersätze in Gruppen (mittig), Tiefe des Abtrages für ausgewählte Parametersätze aus Gruppe 3 (rechts).

### 3.1 Ergebnisse der Oberflächenanalyse

Durch die Verwendung einer Überfahrt können die Gruppen 1 und 3 unterschieden werden, wobei die Gruppe 1 den Fluenzbereich pro Puls kleiner-gleich und die Gruppe 3 größer als die in [5] vorgestellte Multi-Puls-Ablationsschwelle von ca.  $0,25\text{ J/cm}^2$  darstellt. Folglich wurden, wie in Abbildung 2 - rechts - gezeigt, Ablationstiefen nur bei  $0,28\text{ J/cm}^2$  und  $0,32\text{ J/cm}^2$  für Gruppe 3 gemessen. Bei der Verwendung von vier und zehn Überfahrten ergeben sich größere Ablationstiefen, wobei insbesondere bei 10 Überfahrten folgende Charakteristika in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit deutlich werden:

#### 0,2 ns bis 1,2 ns:

Die gemessenen Ablationstiefen bei  $0,2\text{ ns}$  bis  $1,2\text{ ns}$  mit etwa  $3\text{ }\mu\text{m}$  bei  $0,28\text{ J/cm}^2$  und  $6\text{ }\mu\text{m}$  bei  $0,32\text{ J/cm}^2$  waren tendenziell gleich. In diesem Zeitbereich ist die Abschirmung der Pulsenergie des zweiten Pulses auf ein durch den ersten Puls induziertes Plasma besonders hoch [6, 7], was die Abtragsrate deutlich reduziert [2, 8, 9].

#### 1,6 ns bis 3,1 ns:

Das hochdynamische Plasma dehnt sich weiter aus und wird dünner, so dass in der Intra-Burst-Pulswiederholungszeit von  $1,6\text{ ns}$  bis  $3,1\text{ ns}$  [10 bis 12] weniger Pulsenergie des zweiten Pulses abgeschirmt wird. Dadurch deponiert der zweite Puls deutlich mehr Pulsenergie in der Materialoberfläche und die Oberflächentemperatur steigt durch die Wärmeakkumulation. Die größere Menge an deponierter Pulsenergie und die Wärmeakkumulation sind der Grund für eine tiefere Ablation von bis zu  $10\text{ }\mu\text{m}$  im Vergleich zu einer Intra-Burst-Pulswiederholungszeit zwischen  $0,2\text{ ns}$  und  $1,2\text{ ns}$ . Eine zusätzliche Klassifizierung der vorgestellten drei Gruppen erfolgte quantitativ anhand der Oberflächenrauheit ( $S_a$ ) und qualitativ anhand von REM-Bildern der bestrahlten WC-Co-Oberflächen. Die gemessenen  $S_a$ -Werte bei einer Überfahrt und einer Fluenz von kleiner oder gleich  $0,24\text{ J/cm}^2$  ergaben vergleichbare Werte bei einer Intra-Burst-Pulswiederholungszeit von  $0,2\text{ ns}$  im Vergleich zur nicht bestrahlten Oberfläche mit  $S_a = 216\text{ nm}$  (Abbildung 3). Eine weitere Erhöhung der Intra-Burst-Pulswiederholungszeit führte zu einem leichten Anstieg der Oberflächenrauheit bis auf  $311\text{ nm}$ . Die Glättung der bestrahlten Oberfläche bei Fluenzen pro Puls unterhalb der Ablationsschwelle wird durch freie Konvektion

aufgrund von Dichte- und Spannungsunterschieden im Schmelzbad verursacht, die wegen hoher Temperaturgradienten entstehen. Die Glättung der Oberfläche durch freie Konvektion, die auch als Marangoni-Effekt bekannt ist, hängt stark von der Dicke des Schmelzfilms ab (siehe [13, 14]). Aufgrund der geringen Dicke des Schmelzfilms und der nahezu unveränderten grundlegenden Oberflächenstruktur wird dieser Parameterbereich der Gruppe 1 zugeordnet. Die Verwendung einer Überfahrt und Fluenzen pro Puls oberhalb der Ablationsschwelle führte zu einer Reduktion der Oberflächenrauheit auf ein Minimum von 140 nm in einem Zeitbereich von bis zu 3,1 ns (Abbildung 3). Die Verringerung der Oberflächenrauheit durch die Verwendung von GHz-Burstpuls und Fluenzen oberhalb der Ablationsschwelle wurde bereits in mehreren Studien nachgewiesen [2, 11, 15]. Der Hauptmechanismus wurde auf eine periodische Anregung eines dichten Plasmas zurückgeführt, wobei die Wechselwirkung von geschmolzenem Material und Plasmadruckwellen eine thermo-mechanische Glättung der Materialoberfläche bewirkt. Die einzelnen runden Strukturen der erstarrten Schmelze wurden nach dem „Piston“-Effekt [16, 17] durch Zwangskonvektion gebildet, wobei die Schmelze symmetrisch nach außen gedrückt wird und am Rand der Kavität als Wulst erstarrt. Der Abstand zwischen den einzelnen Ausbuchtungen und der Abstand zwischen den Ausbuchtungslinien entspricht dem vordefinierten Burst- und Linienversatz von 3  $\mu\text{m}$ . Folglich wurde dieser Parameterbereich von 0,28 J/cm<sup>2</sup> und 0,32 J/cm<sup>2</sup> der Gruppe 3 bis zu einer Intra-Burst-Pulswiederholungszeit von 3,1 ns zugeordnet. Bei 6,2 ns wurden im Vergleich zu kürzeren Intra-Burst-Pulswiederholungszeiten deutlich höhere  $S_a$ -Werte mit bis zu 360 nm für eine Überfahrt gemessen (Abbildung 3). Dieser Anstieg der Oberflächenrauheit wurde auf einen inhomogenen erstarrten Schmelzfilm zurückgeführt. Im Parameterbereich mit Fluenzen kleiner oder gleich der Ablationsschwelle (bis 0,24 J/cm<sup>2</sup>) stiegen die gemessenen  $S_a$ -Werte bei allen untersuchten Intra-Burst-Pulswiederholungszeiten an. Das Maximum von 1,2  $\mu\text{m}$  befand sich bei 0,24 J/cm<sup>2</sup>, zehn Überfahrten und 1,6 ns. Dieser signifikante Anstieg der Oberflächenrauheit bei vier und zehn Überfahrten wird durch die Bildung einer selbstorganisierten Porenstruktur erklärt und Gruppe 2. Dieses Phänomen wurde auch in [18] beobachtet. Die resultierende Dimension der Porenstruktur ist nicht nur von der Anzahl der Überfahrten, sondern auch von der Fluenz abhängig.

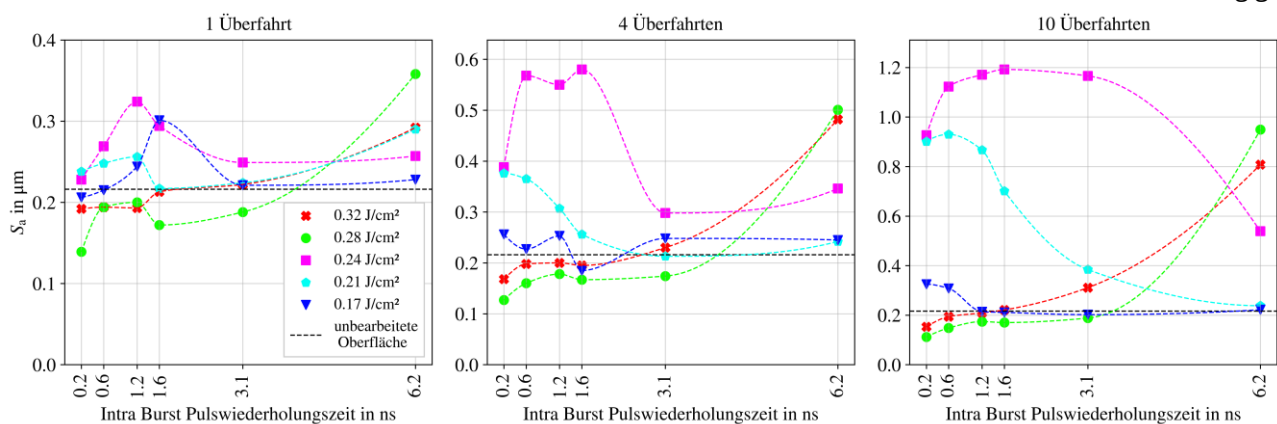


Abbildung 3: Sich ausbildende Oberflächenrauheit im Vergleich zur unbearbeiteten Oberfläche.

### 3.2 Ergebnisse der Querschnittsanalysen

In Parameterbereichen, die den resultierenden Topographien der bestrahlten WC-Co-Oberflächen in Gruppe (1) entsprechen, wurden sehr dünne Tiefen erstarrter Schmelze von wenigen Nanometern beobachtet, was im Wesentlichen der energetischen Eindringtiefe der Laserstrahlung entspricht [5]. Die bestrahlten Materialoberflächen der Gruppe 2 zeigten sehr inhomogene Tiefen der erstarrten Schmelze von wenigen Nanometern bis zu mehreren Mikrometern aufgrund von Porenbildung (dargestellt in Abbildung 2 - links). Die Topographien der Gruppe 3 zeigten im Vergleich zu Gruppe 2 einen deutlich homogeneren erstarrten Schmelzfilm und im Vergleich zu Gruppe 1 eine deutlich dickere umgeschmolzene Schicht mit einem Maximum von 1  $\mu\text{m}$ . Die periodische Agglomeration der erstarrten Schmelze entspricht dem Prozessparameter des geometrischen Linienversatzes von 3  $\mu\text{m}$ . Die Analysen der chemischen Zusammensetzung wurden an Querschnitten der Gruppe 2 an den größtmöglichen Mengen erstarrter Schmelze durchgeführt. Die Verteilung der Verstärkungsphase

(WC-Partikel) und der Metallmatrix (Co) ist in den nicht beeinflussten Bereichen des Verbundwerkstoffs aufgrund der visuellen Unterscheidung zwischen ihnen eindeutig erkennbar (dargestellt in Abbildung 4–rotes Rechteck). Die in Abschnitt 2.3 angegebenen Konzentrationen von 90 % für WC und 10 % für Co beziehen sich auf die Angaben des Herstellers aus einer makroskopischen, gemittelten Mengenverteilung bei der Herstellung des Komposits. Die EDX-Analysen wurden jedoch an Querschnittsprofilen mit einer Messfläche im Mikrometerbereich durchgeführt. Daher wurden die in der erstarrten Schmelze (Abbildung 4-grünes Rechteck) ermittelten Elementkonzentrationen nicht mit den Herstellerangaben verglichen, sondern mit den Messwerten aus dem unbeeinflussten Bereich (Abbildung 4-rotes Rechteck) auf derselben Messfläche derselben Probe. Die Konzentrationen sind für WC (W+C) 89 % und Co 10,6 % im unbeeinflussten Bereich. Im Bereich der erstarrten Schmelze wurden 89,4 % für WC und 10,4 % für Co ermittelt. Die mikroskopische Inhomogenität zwischen der Metallmatrix und der darin enthaltenen Verstärkungsphase kann bei einer mikroskopischen EDX-Analyse eines geschliffenen Querschnittsprofils zu einer leichten Erhöhung oder Verringerung des WC- und Co-Gehalts führen. In den Bereichen der erstarrten Schmelze ist eine visuelle Unterscheidung der WC-Körner und des Co im Vergleich zum unbeeinflussten Bereich kaum möglich (dargestellt in Abbildung 4–grünes Rechteck). Berücksichtigt man die Messabweichungen, so ist die chemische Zusammensetzung der erstarrten Schmelze im Vergleich zum unbeeinflussten Bereich tendenziell gleich. Aufgrund der homogenen Verteilung der untersuchten Elemente im Querschnitt der erstarrten Schmelze und der nahezu unveränderten Zusammensetzung kann der Schluss gezogen werden, dass sich während der Bestrahlung WC-Co mit 2x8-Bursts sowohl die Metallmatrix Co als auch die WC-Körner gleichzeitig in einer flüssigen Phase befanden und durch freie bzw. erzwungene Konvektion vermischt wurden.

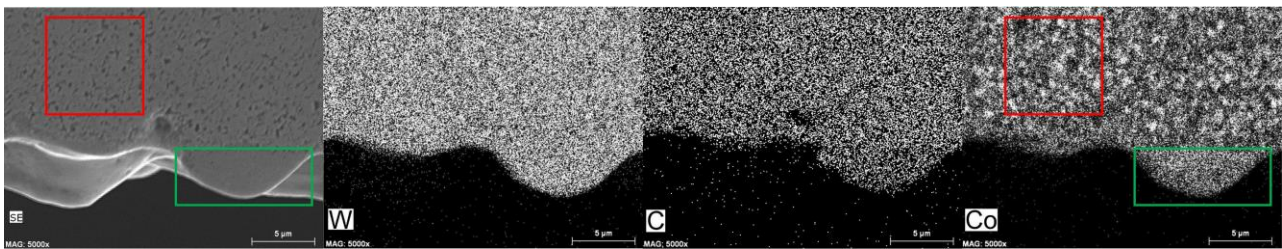


Abbildung 4: SEM - Bild (SE) und EDX - Analyse eines Querschnitts für die Elemente Kohlenstoff (C), Wolfram (W) und Kobalt (Co).

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Fallstudie war die Charakterisierung der erstarrten Schmelze auf dem Verbundwerkstoff WC-Co, die durch die Verwendung von Burst-Pulsen erzeugt wurde. Die Charakterisierung der bestrahlten Materialoberflächen erfolgte in drei Gruppen, die in erster Linie durch die Abtragtiefen, Oberflächenrauheiten und Topographien definiert wurden. Gruppe 1 umfasste Parameterbereiche, in denen kein Materialabtrag gemessen werden konnte und die erstarrte Schmelze keinen Einfluss auf die Topographie des unbestrahlten Rohmaterials zeigte, die hauptsächlich durch Schleifriefen geprägt war. Der Gruppe 2 wurden Parameterbereiche zugeordnet, in denen sich eine selbstorganisierende Porenstruktur ausbildete, die eine signifikante Erhöhung der Oberflächenrauheit bewirkte. Aufgrund dieser Porenstruktur konnte keine Abtragtiefe angegeben werden. Der Parameterbereich, in dem die Fluenz pro Puls höher als die Ablationsschwelle war, führte zu Gruppe 3 mit messbaren Ablationstiefen und einer Topographie aus erstarrten Schmelzaufwürfen. Die Verwendung einer Überfahrt führte hauptsächlich dazu, dass die Gruppen 1 und 3 entstanden, mit dem Bereich des Übergangs von Gruppe 1 in Gruppe 3 nahe der Ablationsschwelle. Eine Erhöhung der Anzahl der Überfahrten führte zu einer teilweisen Verschiebung von Gruppe 1 zu 2 aufgrund der Bildung einer Porenstruktur. Die Analysen der Querschnitte ergaben, dass die Poren hauptsächlich durch eine Ansammlung erstarrter Schmelze mit einer Tiefe von einigen Mikrometern gebildet wurden. Im Vergleich zum Rohmaterial, wo eine Differenzierung der Verbundkomponenten aus WC-Körnern und einer Metallmatrix aus Co offensichtlich war, ist die chemische Zusammensetzung der erstarrten Schmelze tendenziell unverändert und eine Differenzierung der Verbundkomponenten in diesem Bereich nicht möglich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die keramischen



und metallischen Komponenten während der Bestrahlung gleichzeitig in einer flüssigen Phase befanden, was zur Bildung einer Oberflächenlegierung durch Konvektion führte. Neuartige Oberflächenlegierungen auf Verbundwerkstoffen, deren Elemente in einer Schmelzphase deutlich unterschiedliche Temperaturbereiche aufweisen, bieten die Möglichkeit völlig neuer Oberflächeneigenschaften in Bezug auf elektrische, chemische und mechanische Eigenschaften. Im Vergleich zu Verbundwerkstoffen, deren Komponenten nur eine makroskopische Homogenität aufweisen, zeichnete sich die gebildete Legierung durch eine mikroskopische Homogenität der einzelnen Komponenten aus. In diesem Zusammenhang und auf Basis der Erkenntnisse aus dieser Studie werden in weiteren Studien Untersuchungen zu den tribologischen Eigenschaften der erzeugten Schmelzstrukturen und den Bindungszuständen innerhalb der Oberflächenlegierung durchgeführt.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] Metzner, D., Lickschat, P. u. Weißmantel, S.: Investigations of qualitative aspects with burst mode ablation of silicon and cemented tungsten carbide. *Applied Physics A* 125 (2019) 6
- [2] Metzner, D., Lickschat, P. u. Weißmantel, S.: High-quality surface treatment using {GH}z burst mode with tunable ultrashort pulses. *Applied Surface Science* 531 (2020), S. 147270
- [3] Zhang, Y., Evans, J. R. G. u. Yang, S.: Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks. *Journal of Chemical & Engineering Data* 56 (2011) 2, S. 328–337
- [4] Kurlov, A. S. u. Gusev, A. I.: Tungsten carbides and {W-C} phase diagram. *Inorganic Materials* 42 (2006) 2, S. 121–127
- [5] Lickschat, P., Metzner, D. u. Weißmantel, S.: Fundamental investigations of ultrashort pulsed laser ablation on stainless steel and cemented tungsten carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109 (2020) 3-4, S. 1167–1175
- [6] Semerok, A. u. Dutouquet, C.: Ultrashort double pulse laser ablation of metals. *Thin Solid Films* 453-454 (2004), S. 501–505
- [7] Scuderi, D., Albert, O., Moreau, D., Pronko, P. P. u. Etchepare, J.: Interaction of a laser-produced plume with a second time delayed femtosecond pulse. *Applied Physics Letters* 86 (2005) 7, S. 71502
- [8] Hirsiger, T., Gafner, M., Remund, S. M., Chaja, M. W., Urniezius, A., Butkus, S. u. Neuenschwander, B.: Machining metals and silicon with {GH}z bursts: Surprising tremendous reduction of the specific removal rate for surface texturing applications. *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXV. SPIE 2020 - 2020*, S. 27
- [9] Obata, K., Caballero Lucas, F. u. Sugioka, K.: Material Processing at {GH}z Burst Mode by Femtosecond Laser Ablation. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* (2021)
- [10] Förster, D. J., Faas, S., Gröninger, S., Bauer, F., Michalowski, A., Weber, R. u. Graf, T.: Shielding effects and re-deposition of material during processing of metals with bursts of ultra-short laser pulses. *Applied Surface Science* 440 (2018), S. 926–931
- [11] Förster, D. J., Jäggi, B., Michalowski, A. u. Neuenschwander, B.: Review on Experimental and Theoretical Investigations of Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Metals with Burst Pulses. *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (2021) 12
- [12] Furukawa, Y., Inoue, S. u. Hashida, M.: Temporal change in laser penetration length of titanium and platinum for double-pulse ablation measured by a novel ablation method. *Journal of Laser Applications* 33 (2021) 1, S. 12023
- [13] Shen, H., Pan, Y., Zhou, J. u. Yao, Z.: Forming Mechanism of Bump Shape in Pulsed Laser Melting of Stainless Steel. *Journal of Heat Transfer* 139 (2017) 6
- [14] Fraggelakis, F., Tsibidis, G. D. u. Stratakis, E.: Ultrashort pulsed laser induced complex surface structures generated by tailoring the melt hydrodynamics. *Opto-Electronic Advances* 5 (2022) 3, S. 210052
- [15] Metzner, D., Lickschat, P. u. Weißmantel, S.: Optimization of the ablation process using ultrashort pulsed laser radiation in different burst modes. *Journal of Laser Applications* 33 (2021) 1, S. 12057
- [16] Bogaerts, A., Chen, Z. u. Bleiner, D.: Laser ablation of copper in different background gases: comparative study by numerical modeling and experiments. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 21 (2006) 4, S. 384

- [17] Markillie, G. A. J., Baker, H. J., Villarreal, F. J. u. Hall, D. R.: Effect of vaporization and melt ejection on laser machining of silica glass micro-optical components. *Applied Optics* 41 (2002) 27, S. 5660
- [18] Metzner, D., Lickschat, P. u. Weißmantel, S.: Surface treatment on cobalt and titanium alloys using picosecond laser pulses in burst mode. *Applied Physics A* 127 (2021) 1

### **Danksagung**

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch den Europäischen Sozialfonds für Deutschland (ESF) im Rahmen der Förderprojekte LaNa-Sax Nr. 100649226 und DigiLAS-Sax Nr. 10060265 – REACT-EU: Als Teil der Reaktion der Europäischen Union auf die COVID-19-Pandemie.