

# Laser-Interferenzstrukturierung zur Funktionalisierung von Kupferwerkstoffen

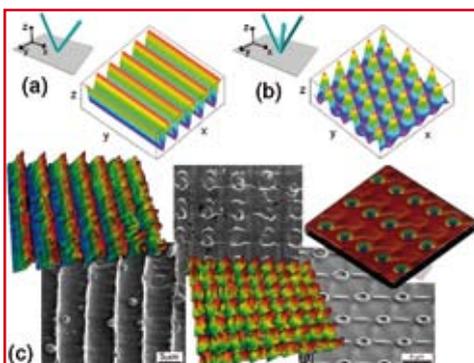
Hans, M. (1); Gachot, C. (1); Catrin, R. (1); Raillard, B. (1); Mücklich, F. (1)

Oftmals steht bei der Wahl des Werkstoffs für eine spezielle Anwendung neben volumenbezogenen Kenngrößen speziell die Oberflächencharakteristik im Vordergrund. Hier ist es von Vorteil, spezifische Materialeigenschaften wie beispielsweise Verschleißverhalten oder Benetzungscharakter durch gezielte Behandlung der Werkstoffoberfläche zu optimieren. Die Laser-Interferenzstrukturierung eignet sich insbesondere für Kupferwerkstoffe und bietet vielseitige Möglichkeiten der gezielten Oberflächenfunktionalisierung.



**Bild 1: Anwendungsspektrum der Laser-Interferenzstrukturierung**

Im Vergleich zu anderen Verfahrenstechniken erlaubt die Laser-Interferenzstrukturierung die direkte, laterale Gestaltung der Oberflächenstruktur von Materialien auf der Mikro/Nano-Skala. Dies geschieht in einem kontaktlosen Prozessschritt durch die Bestrahlung der Oberfläche mit gepulsten, hochenergetischen Laserstrahlen, die unter Interferenzbedingungen spezifische In-



**Bild 2: Strahlenkonfiguration und berechnete Intensitätsverteilung im Falle der (a) Zweistrahl- und (b) Dreistrahl-Interferenz; (c) Topographiescans und REM-Aufnahmen verschieden strukturierter Metalloberflächen**

terferenzverteilungen ausbilden. Über photothermische Prozesse werden so periodische Muster in der Größenordnung von wenigen Mikrometern bis mehreren hundert Nanometern mit einer wohldefinierten Fernordnung auf der Werkstoffoberfläche generiert. Die Art und Größenordnung der erzeugten Strukturen lässt sich durch verschiedene Prozessparameter steuern und erlaubt eine vielfältige Gestaltung der Mikrostruktur, Oberflächentopographie und -chemie, wodurch sich ein breites Anwendungsspektrum ergibt. Typische Phänomene, die durch derartige Oberflächenmodifikationen kontrolliert und gesteuert werden können, sind beispielsweise optische, magnetische und elektrische Oberflächeneigenschaften, Benetzungs- und Adhäsionsphänomene in Verbindung mit menschlichem Gewebe und Mikroorganismen, die lokale Bildung von Oxidschichten und intermetallischen Phasen, Tribologie und Verschleißverhalten (Bild 1).

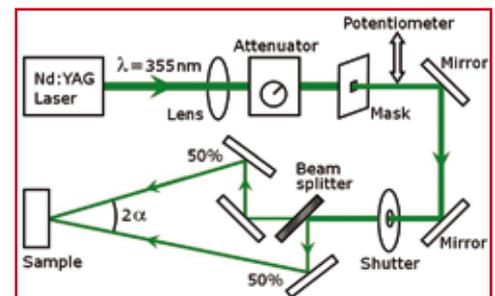
## Interferenztheorie

Die Laser-Interferenzstrukturierung basiert auf der Überlagerung von zwei oder mehreren, hochenergetisch gepulsten Laserstrahlen. Diese interferieren miteinander und bilden, abhängig von Strahlenzahl und Einfallswinkel, typische Intensitätsverteilungen aus, wie sie beispielhaft für Zwei- und Dreistrahlinterferenz in Bild 2 (a, b) dargestellt sind. In den Bereichen hoher Intensität kommt es zur Wechselwirkung

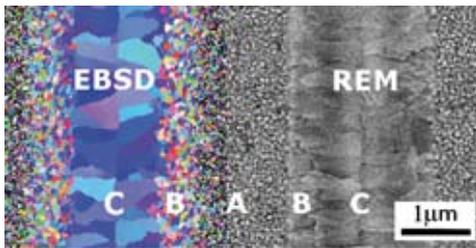
zwischen Laserstrahlung und Materie, wodurch die Periodizität dieser Intensitätsverteilung auf die Werkstoffoberfläche übertragen wird. Bei Metallen findet lokal in den Interferenzmaxima eine Erwärmung statt, wodurch metallurgische Prozesse wie Schmelzen, Rekristallisation, Erholungseffekte sowie Fehlstellen- und Phasenbildung gezielt auf der Mikro/Nano-Skala hervorgerufen werden. Dieses Teilgebiet der Laser-Interferenztechnik, welches sich mit der mikrostrukturellen Gestaltung von Metallen befasst, wird daher auch als Laser-Interferenzmetallurgie (LIMET) bezeichnet. [1]

## Methodik

Zur Erzeugung der in Bild 2 (c) exemplarisch vorgestellten Oberflächenstrukturen wurde ein Nd:YAG-Laser („Quantum Ray PRO“, Spectra Physics) mit einer Frequenz von 10 Hz und einer Pulsdauer von 10 ns verwendet. Die Fundamentalwellenlänge dieses Lasers beträgt 1.064 nm, durch Frequenzverdopplung sind ebenso Arbeitswellenlängen von 533, 355 und 266 nm generierbar. Da sich das Absorptionsverhalten eines Materials stark wellenlängenabhängig zeigt, ist es von essentieller Bedeutung, jeden Werkstoff mit der passenden Wellenlänge zu bestrahlen. Die Aufspaltung des Primärstrahls in mehrere Teil-



**Bild 3: Schematische Strahlenführung im Falle von Zweistrahl-Interferenz**



**Bild 4: Kontrollierte Rekrystallisation auf einer linienstrukturierten Cu-Dünnschicht**

strahlen erfolgt über Strahlteiler, die Strahlführung wird mit Hilfe mehrerer Spiegel realisiert, die ebenfalls dazu dienen, die Einzelstrahlen auf der Probe zu re-fokussieren (Bild 3). Neben der Strahlzahl und dem Einfallswinkel als Gestaltungsparameter für Strukturtyp und Strukturperiodizität, stellt die Laserfluenz (Energie pro Fläche) einen entscheidenden Einflussfaktor während des Strukturierungsprozesses dar. Mikrostrukturelle Effekte werden bei niedrigen Fluenzen beobachtet, eine topographische Modellierung von Metalloberflächen ist erst bei höheren Fluenzen ( $\geq 3,5 \text{ Jcm}^{-2}$ ) möglich. Pro Laserpuls wird eine geschlossene Fläche im Bereich von etwa  $25 \text{ mm}^2$  präzise kontaktlos strukturiert. Da ein Puls lediglich  $10 \text{ ns}$  beträgt, lässt sich die Geschwindigkeit dieser Technik durch geeignete Prozessautomatisierung erheblich steigern. Für nahezu alle Metalle und speziell für Kupferwerkstoffe bietet die Laser-Interferenzstrukturierung einige interessante Optionen, die Oberfläche für spezifische Anwendungen maßzuschneidern. Bei den im Folgenden vorgestellten Arbeiten wurde mit einer Laserwellenlänge von  $355 \text{ nm}$  entsprechend dem Absorptionsspektrum von Kupfer strukturiert.

### Anwendungsbeispiele

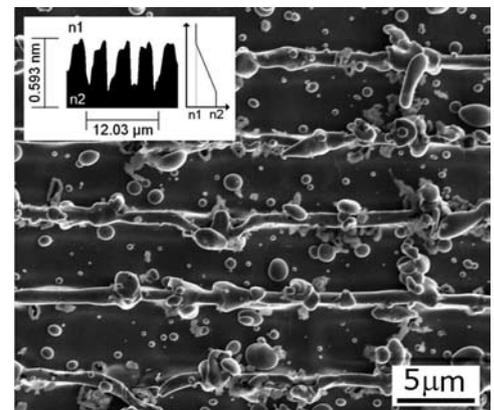
Durch Magnetron-Sputtern erzeugte Cu-Dünnschichten von  $300 \text{ nm}$  Dicke wurden mit einer Laserfluenz von  $500 \text{ mJcm}^{-2}$  einfach gepulst unter Zweistrahl-Konfiguration strukturiert. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der strukturierten Probe in Bild 4 spiegelt deutlich die linienartige Intensitätsverteilung (vertikal ausgerichtete Linien) wieder, die sich hier durch Kornwachstumseffekte

ausgeprägt hat. Zu erkennen sind anhand des EBSD-Modus drei Bereiche mit verschieden kristalliner Struktur. Im Gegensatz zum feinkörnigen Ursprungszustand der gesputterten Schicht (A) ist eine Zone C mit grobkörnigeren, geordneten Kristalliten zu erkennen, sowie eine Übergangszone B mit mittelgroßen Körnern. In Bereich C wurde die Kupferschicht im Interferenzmaximum des Laserpulses komplett aufgeschmolzen, wohingegen Zone A nicht bis schwach erhitzt wurde und in Zone B ein leichtes Kornwachstum aufgrund der Temperaturerhöhung erkennbar ist. Während des Erstarrungsvorgangs in Zone C findet ein gerichtetes Kristallwachstum längs des Temperaturgradienten (der senkrecht zur eigentlichen Linienstruktur verläuft) statt. Entsprechend verschiedener Intensitätsverteilungen und Laserfluenzen lässt sich auf diese Weise die Textur von Metall-Dünnschichten kontrolliert einstellen. [2]

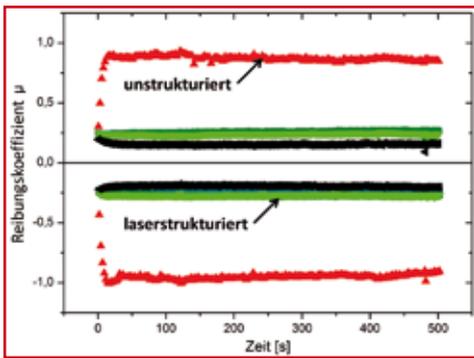
Neben der Mikrostruktur von Cu-Dünnschichten bietet die topographische Oberflächenmodifikation von Bulk-Kupfer weitere Optionen zur gezielten Funktionalisierung des Werkstoffs. Bei der Konzipierung von effektiven Solarabsorbieren beispielsweise ist es notwendig, die Infrarotstrahlung (und damit die Wärmeabstrahlung) von Oberflächen möglichst gering zu halten, ihr Absorptionsvermögen im Bereich des Solarspektrums jedoch möglichst zu steigern. Beide Effekte sind abhängig von der Oberflächenstruktur („graded refractive index model“) und lassen sich über die Laser-Interferenzmethode beeinflussen. Durch eine solar-selektive, topographische Oberflächenfunktionalisierung konnte die totale Solarabsorption von Kupferoberflächen um  $15 \%$  gesteigert werden. Hierbei hat sich eine direkte Abhängigkeit des Absorptionsvermögens vom Aspektverhältnis der generierten Strukturen gezeigt. [3] In Bild 5 wird ebenso ersichtlich, dass bei den zur topographischen Strukturierung notwendigen Laserfluenzen weitaus größere Mengen an Metall aufgeschmolzen werden. Hier erfolgt die Strukturbildung durch temperaturbedingte Konvektionsströmungen und Gradienten in der Oberflächenspan-

nung des verflüssigten Metalls. Eine untere Grenze hinsichtlich der Miniaturisierung dieser Strukturen ergibt sich durch die thermische Diffusivität des betrachteten Metalls.

Ein weiteres, großes Anliegen vieler Industrien ist die Reduzierung von Reibungsverlusten und von reibverschleißbedingten maschinellen Ausfällen. Auch hier bietet die Laser-Interferenzmethodik über mikro- und nanotopographische Oberflächengestaltung interessante Ansätze, wie etwa durch die Reduzierung der reellen Kontaktfläche [4] oder die Zurverfügungstellung von Mikroschmier-taschen, die als Schmiermittelreservoir dienen können. In nanotribologischen Messungen an laserstrukturiertem Bulk-Kupfer konnte eine Reduzierung des Reibungskoeffizienten um bis zu  $70 \%$  nachgewiesen werden (siehe Bild 6), wobei verstärkte plastische Deformation an den Strukturerhebungen beobachtet wurde. Weitere Studien unter Einbezug des Falles geschmierter Reibung zeigen sich ebenfalls als vielversprechend. [5] Eng mit dieser Thematik verwandt ist die Kombination von Multischichten verschiedener Metalle, die durch gezieltes Aufschmelzen intermetallische Phasen in den Interferenzmaxima ausbilden. Da die so gebildeten intermetallischen Phasen eine höhere Härte als die sie umgebenden Multischichten aufweisen, ist man hiermit in der Lage, mechanische Materialeigenschaften in der Größenordnung von wenigen Mikrometern



**Bild 5: Topographisch strukturierte Cu-Oberfläche (hohe Laserfluenz) zur Steigerung der Solarabsorption; links oben: „graded refractive index model“ anhand des Oberflächenprofils**



**Bild 6: Reduzierung des Reibungskoeffizienten durch Topographieeffekt auf laserstrukturiertem Kupfer**

periodisch zu variieren. In Bezug auf Verschleiß und Reibeigenschaften nehmen diese intermetallischen Phasen die Rolle von harten Einschlüssen in einer duktileren Matrix ein, was ebenfalls vorteilhafte tribologische Eigenschaften mit sich bringt.

Die Laser-Interferenzstrukturierung liefert eine grundlegende Methodik, mit deren Hilfe die verschiedensten Materialeigenschaften lokal präzise und gleichzeitig flächendeckend im Mikro/Nano-Bereich periodisch konfiguriert werden können. Sie eignet sich speziell im Fall von Kupfer und anderen Metallen (Laser-Interferenzmetallurgie - LIMET) zur gezielten Funktionalisierung von Werkstoffoberflächen in vielfältiger Weise.

**Literatur**

[1] F. Mücklich, A. Lasagni, C. Daniel, "Laser Interference Metallurgy – using interference as a tool for micro/nano structuring", Int. J. Mat. Res. 97 (2006) 10  
 [2] R. Catrin, A. Lasagni, C. Gachot, U. Schmidt, F. Mücklich, „Microstructural design of advanced Architectures in Titanium/Platinum thin Films“, Adv. Mat. Eng. 10 (2008) 5, 466-470  
 [3] A. Lasagni, M. Nejati, R. Clasen, F. Mücklich, "Periodical surface structuring of metals by laser interference Metallurgy

as a new fabrication method of textured solar absorbers", Adv. Eng. Mat., 8 (2006) 6  
 [4] B. Raillard, C. Gachot, F. Mücklich, "Optimizing friction and wear properties of bulk copper and aluminum by Laser Interference Metallurgy", Submitted, Wear (2009)  
 [5] M. Duarte, A. Lasagni, R. Giovanelli, J. Narciso, E. Lois, F. Mücklich, "Increasing lubricant lifetime by grooving periodical patterns using laser interference metallurgy", Adv. Eng. Mat., 10 (2008) 6, 554-558

(1) Prof. Dr. Frank Mücklich, Dipl.-Ing. Michael Hans, Dipl.-Ing. Carsten Gachot, Dipl.-Ing. Rodolphe Catrin, Dipl.-Ing. Brice Raillard, Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe, Universität des Saarlandes; Steinbeis Forschungszentrum - Material Engineering Center Saarland (MECS)

# Anwendbarkeit des Elektronenstrahlschweißens für CuCrZr-Legierungen

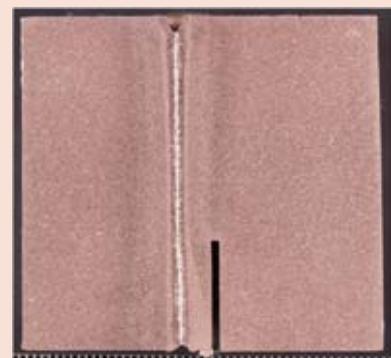
Mayer, G.; Zähr, J.; Füssel, U.; TU Dresden; Wobker, H.-G.; Schulze, H.; KME; Krüssel, Th.; Mushack, S.; pro-beam

Beim Schweißen von niedriglegierten, aushärtbaren Kupferlegierungen mit Blechstärken über 30 mm kann beim Einsatz konventioneller Fügeverfahren infolge der hohen Wärmeeinbringung ein teilweiser oder vollständiger Verlust des Aushärtungseffektes auftreten sowie die Festigkeits- und Dehnungswerte sinken. Zur Verhinderung bzw. Minimierung dieser negativen Effekte ist die Verringerung der Wärmeeinbringung während des Schweißens erforderlich, wie es z. B. durch die Anwendung des Elektronenstrahlschweißverfahrens realisiert werden kann. Dieses Verfahren ist durch eine sehr konzentrierte Wärmeeinbringung und extrem schlanke Schweißnähte gekennzeichnet, Bild 1. Durch systematische Untersuchungen zur Wirkungsweise einzelner Parameter [1] konnten Parametersätze entwickelt werden, mit denen das Ein- und Durchschweißen bei verschiedenen Blechstärken möglich war. Mit Hilfe dieser Parametersätze wurden anschließend

Versuche zum Einfluss bestimmter Legierungselemente, zur Schweißposition sowie zum überbrückbaren Spaltmaß durchgeführt. Da die Schweißnähte ein Rohr mit einem Flansch verbinden, musste das fehlerfreie Überschweißen des Nahtanfangs ebenfalls untersucht werden.

Bei der Bestimmung des überbrückbaren Luftspaltes wurde festgestellt, dass bis zu einer Materialstärke von ca. 50 mm das Spaltmaß nur einen geringen Einfluss auf das Schweißergebnis hat. Bei größeren Blechdicken hingegen ist neben dem Spaltmaß auch die Vorwärmung des Bauteils ausschlaggebend für die Qualität der Schweißnaht. Im Bereich des Nahtanfangs wurden häufig Lunker in der Nahtmitte und in der Wurzel, insbesondere entlang der Erstarrungsringe, detektiert. Auch Risse konnten nachgewiesen werden. Die Anzahl der Fehler und Ungenzen nimmt mit steigender Nahtlänge ab und nach ca. 100 mm Nahtlänge sind keinerlei Störungen mehr detektierbar.

Ein weiterhin ungelöstes Problem besteht in der Wahl der Parameter für den Überschweißbereich. Mit keiner der untersuchten Strahlauslaufstrategien konnte die Lunkerbildung gänzlich vermieden werden. Da diese sich bis in den oberen Nahtbereich ziehen, stellt das Nahtende eine Schwachstelle in der Schweißnaht dar. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.



**Schweißnaht mit parallelen Flanken und Badsicherung Durchschweißung mit Oberraupeneinfall und Wurzelrückfall**