

# Gefügeoptimierung durch Laserumschmelzen an CuAl – Legierungen

Hemann, U. (1); Winkel, G. (2)

Die MMG Mecklenburger Metallguß GmbH gehört zu den führenden Schiffspropellerherstellern der Welt. Es werden Propeller für alle Schiffsklassen und -größen hergestellt. Neben Festpropellern in den Abmessungen ca. Ø 11,4 m und einem Fertiggewicht von max. 140 t werden auch Flügel und Naben für Verstellpropelleranlagen gefertigt.

Eingangsdaten für den Entwurf eines Propellers sind unter anderem Angaben der Werft zu der zu übertragenden Antriebsleistung, der geforderten Schiffsgeschwindigkeit und der Schiffsförmigkeit am Hinterschiff. Aus diesen Angaben und weiteren bei Probefahrten oder Schiffsmodellversuchen und Festigkeitsberechnungen ermittelten Parametern wird maßgeschneidert für jeden Schiffstyp das Propellerdesign entwickelt und letztendlich die Propellergeometrie modelliert.

Der Propellerentwurf stellt jedoch in vielen Fällen einen Kompromiss hinsichtlich Wirkungsgrad, Kavitationsgefährdung, Schwingungserregung und Festigkeitsanforderungen dar. Die Vermeidung von Propellerschäden durch Kavitationserosion bekommt für Werften und Reedereien zunehmend stärkere wirtschaftliche Bedeutung.

Der Hauptweg zur Vermeidung der Kavitationserosion besteht in der Verhinderung des Entstehens der Kavitation. Dieser Weg kann aus physikalischen, technischen oder ökonomischen Gesichtspunkten jedoch nicht immer beschritten werden, so dass Kavitationserscheinungen am Propeller auftreten können.

Die durch die Kavitation (Bild 1) hervorgerufene Erosion verringert den Wirkungsgrad des Propellers und damit auch den Propulsionswirkungsgrad des Gesamtsystems Schiff-Propeller und zieht außerdem Reparaturkosten nach sich. Fragen

der Kavitation und Erosion müssen daher beim Design des Propellers ebenso wie bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden.

Wenn es gelingt, die Oberfläche des Pro-

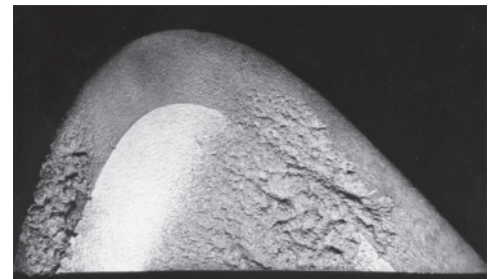
pelliers unempfindlich gegenüber Erosionserscheinungen zu machen, kann der Propeller anders ausgelegt werden, so dass insbesondere folgende Merkmale verbessert werden:

- höherer Propellerwirkungsgrad,
- höherer Propulsionswirkungsgrad des Gesamtsystems Schiff-Propeller,
- damit verbunden Treibstoffeinsparungen für den Reeder,
- Wegfall von Reparaturkosten infolge Erosion,
- Wegfall von Stillstandszeiten bzw. Erhöhung der Lebensdauer,
- verringerte Schallabstrahlung durch den Propeller,
- verringerte Vibration im Hinterschiffsbereich sowie
- Gebrauchswerterhöhung des Produktes Schiff insgesamt.

## Verfahrensprinzip Laserstrahlumschmelzen

Das Laserstrahlumschmelzen stellt für Mehrstoffaluminiumbronzen ein geeignetes Verfahren dar, die Eigenschaften in der Randzone lokal zu modifizieren und diese dem Beanspruchungsprofil anzupassen. In früheren Arbeiten konnte gezeigt werden, dass durch das Umschmelzen der Oberfläche die Beständigkeit gegenüber Kavitationserosion erheblich gesteigert werden kann (Bild 2).

Beim Umschmelzen wird die Oberfläche des Metalls lokal durch den Laser bis oberhalb der Schmelztemperatur erwärmt. Dabei wird entweder der

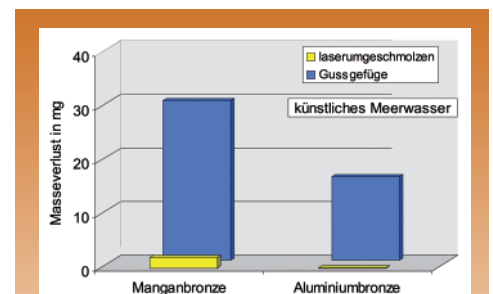


**Bild 1:** Durch Kavitationserosion geschädigte Spitze eines Schiffspropellers

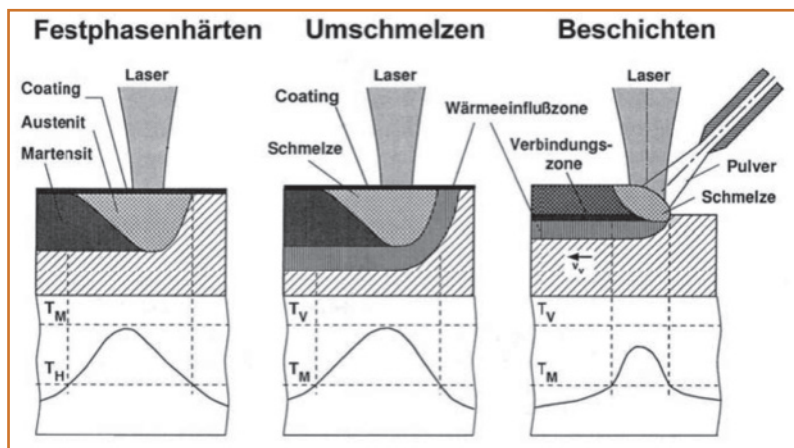
Laserstrahl über die Oberfläche bewegt oder das Werkstück bewegt sich unter dem Laserstrahl. Das Metall wird kurzzeitig flüssig und erstarrt nach Wegnahme des Laserstrahls sofort infolge der Selbstabschreckung. Eine sogenannte Haltezeit existiert nicht. Die Veränderung der Randschichtigenschaften beruht auf der

- schnellen Erstarrung aus der Schmelze,
- Kornfeinung,
- Homogenisierung,
- Phasenumwandlungen (Bildung von Ungleichgewichtsphasen)
- und dem Auflösen nichtmetallischer Einschlüsse.

Eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung findet dabei nicht statt.



**Bild 2:** Verringerung des Masseverlustes infolge Kavitationserosion von Propellerbronzen nach Laserflächenbehandlung



**Bild 3: Verfahren der Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlen nach [1]**

Wesentliche Einflussgrößen beim Laserstrahlumschmelzen sind die

- Leistungsdichte (ergibt sich aus Laserleistung und Brennfleckgröße),
- Bearbeitungsgeschwindigkeit,
- physikalische Eigenschaften des Werkstoffes sowie die
- Energieeinkopplung.

### Materialien

CuAl-Legierungen mit Zusätzen an Fe, Ni und Mn werden als Mehrstoffaluminiumbronzen bezeichnet. Mehrstoffaluminiumbronzen vom Typ CuAl10NiFe finden auf Grund ihrer hervorragenden mechanischen, tribologischen und korrosiven Eigenschaften in verschiedenen Bereichen der Industrie Anwendung. Diese Werkstoffe besitzen einen mehrphasigen Gefügebau. Bei mehrphasigen Legierungen lassen sich die Eigenschaften durch Wärmebehandlungen verändern. Ähnlich wie bei Baustählen können solche Legierungen gehärtet und vergütet werden.

Die in diesem Projekt untersuchte Schiffspropellerbronze CuAl10Ni5Fe5-C-GS (Tabelle 1) ist

in DIN EN 1982 sowie in den Vorschriften des Germanischen Lloyd (GL) genormt. Da Schiffspropeller stets der Abnahme durch eine Klassifikationsgesellschaft unterliegen, werden hier die Forderungen des GL für die Eigenschaften herangezogen.

### Laserstrahlumschmelzen mit dem Faserlaser

Die Umschmelzungen an der SLV M-V im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Komplexe Gebrauchswerterhöhung von Schiffen durch verbesserte Propeller“ erfolgten mit dem 10 KW-Faserlaser YLR-10000 der Fa. IPG Photonics. Die Wellenlänge der Laserstrahlung beträgt 1,07 µm. Die Strahlung wird von der Laserquelle bis zum Bearbeitungskopf über eine Faser mit einem Durchmesser von 200 µm geführt. Für die Anwendung des Laserstrahlumschmelzens ist ein Kompromiss zwischen der erreichbaren Umschmelztiefe, der Spurbreite und der Bearbeitungsgeschwindigkeit erforderlich. Für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sollte die Bearbeitungsgeschwindigkeit möglichst hoch sein. Ebenso ist eine relativ große Umschmelztiefe

bei gleichmäßiger Spurausbildung anzustreben.

Die durchgeführten Arbeiten umfassen die Untersuchungen hinsichtlich der Variation folgender Parameter:

- Einfluss der Laserleistung,
- Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit,
- Einfluss der Fokusslage,
- Einfluss des Einstrahlwinkels / Anstellung Laserkopf sowie
- Einfluss des Neigungswinkels / Kippung der Bauteiloberfläche.

In Bild 4 ist die Oberfläche großflächig umgeschmolzener Materialbereiche und der Querschnitt einer überlappten Laserspür dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass sowohl die Laserspür als auch die Oberfläche der Laserspür keine Defekte aufweisen. Eine Spürüberhöhung ist ebenfalls nicht nachweisbar. Auch im Überlappbereich der Einzelspuren sind keine Unregelmäßigkeiten bzgl. der Oberflächenausbildung nachweisbar. Dieser Fakt spielt für die mechanische Nacharbeit der laserbearbeiteten Oberflächen eine große Rolle. Mit diesen Ergebnissen kann bestätigt werden, dass die Laserumschmelzung der Propellerflächen im endbearbeiteten Oberflächenzustand erfolgen kann und nach der Behandlung nur ein Schleifen der Oberfläche erforderlich ist.

### Gefügeausbildung des laserumgeschmolzenen Materials

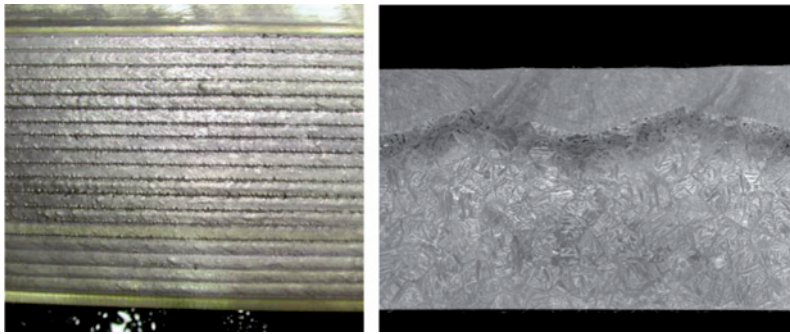
Der thermische Kurzzeit-Zyklus beim Laserstrahlumschmelzen bewirkt verschiedene Veränderungen im o. g. untersuchten Werkstoff. Durch die hohen Abkühlraten kommt es zur Ausbildung metastabiler Phasen. Die Ungleichgewichtsgefüge können durch martensitische oder bainitische Umwandlungen entstehen, wobei unter bestimmten Bearbeitungsbedingungen auch diffusionsgesteuerte Umwandlungen nicht unterdrückt werden können.

Die Umschmelzgefüge unterscheiden sich von den groben, heterogenen Gussgefügen durch:

- eine homogenere Elementverteilung,
- eine geringere Korngröße,

Cu	Al	Mn	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb
77 - 82	7,0 - 11,0	0,5 - 4,0	max. 1,0	2,0 - 6,0	3,0 - 6,0	max. 0,1	max. 0,03

**Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Legierung CuAl10Ni5Fe5-C-GS (CU3) nach [2] in Gew.-%**



**Bild 4: Oberfläche eines großflächig umschmolzenen Materialbereiches mit Querschliff der Laserspuren [3]**

- die Anwesenheit metastabiler Phasen sowie
- eine veränderte Phasenzusammensetzung.

Das Gefüge besteht nach dem Laserstrahlumschmelzen aus dem geordneten  $\beta 1'$ -Martensit und  $\alpha$ -Phase. Die Bildung der  $\alpha$ -Phase lässt sich auch bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten nicht unterdrücken. Diese Phasen sind in allen Umschmelzspuren unabhängig von den Bearbeitungsparametern präsent. Durch Variation der Bearbeitungsparameter lässt sich das Mengenverhältnis dieser beiden Phasen verändern.

In Bild 5 ist der Übergang von der Laserspur über die WEZ (Wärmeeinflusszone) hin zum Grundwerkstoff dargestellt.

### Mechanische Eigenschaften

Für den Nachweis der mechanischen Eigenschaften erfolgte die Probenentnahme aus dem für die Umschmelzversuche verwendeten Propellerflügel.

### Zusammenfassung

Im Rahmen des INNOREGIO-Verbundprojektes „Komplexe Gebrauchswerterhöhung von Schiffen durch verbesserte Propeller“ erfolgten Untersuchungen zum Laserstrahlumschmelzen der Mehrstoffaluminiumbronze CuAl10Ni5Fe5-C-GS.

Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, die Voraussetzungen für die Überführung des Laserstrahlumschmelzens vom Labor- in den Praxisbetrieb zu schaffen. Dazu wurden Umschmelzversuche an Probemate-

rial zur Ermittlung geeigneter Parameter und großflächige Umschmelzungen an Segmenten eines Propellerflügels vorgenommen.

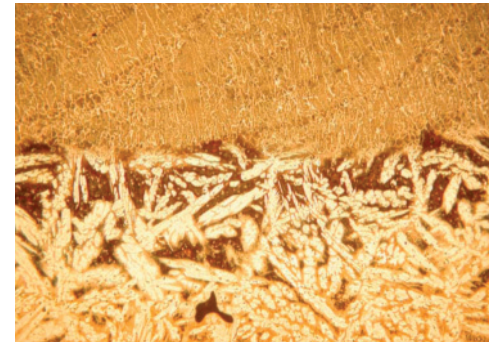
Als Laserquelle wurde der mobile 10-kW-Faserlaser YLR-10000 eingesetzt. Die Oberflächenbearbeitung erfolgte sowohl mit einem Roboter als auch mit der 6achsigen Führungsmaschine TLC105.

Die Auswertung der Umschmelzversuche umfasste unter anderem die Bewertung verschiedener Einflussgrößen wie Einstrahlwinkel, Defokussierung, Laserleistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit sowie die aufgetretenen Gefüge- und Eigenschaftsänderungen.

Die bislang vorliegenden Ergebnisse haben gezeigt, dass eine Übertragung der Bearbeitungsparameter von Probematerialien auf großvolumige Bauteile wie Schiffspropeller möglich ist.

Bislang existierten keine Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften der laserumgeschmolzenen Gefüge. Als weiterer wichtiger Aspekt ist zu erwähnen, dass diese Eigenschaften nicht an separat gegossenen Proben ermittelt wurden, sondern an Proben aus einem groß-

volumigen Probestück. Die Zugfestigkeit in der Umschmelzspur wird durch das Laserstrahlumschmelzen nahezu verdoppelt, die Streckgrenze wird verdreifacht. Die steigenden Festigkeiten bewirken gleichzeitig eine Reduzierung der Bruchdehnung auf Werte zwischen 10 und 20 % der Ausgangsbruchdehnung.



**Bild 5: Übergang Laserspur WEZ / Grundwerkstoff [3]**

### Literatur

- [1] Herziger, G.; Loosen, P.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung, Carl Hanser Verlag, München Wien 1993
- [2] Klassifikations- und Bauvorschriften des Germanischen Lloyd, II Werkstoffe und Schweißtechnik, Teil 1 Metallische Werkstoffe, Ausgabe 2005
- [3] Winkel, G.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, „Komplexe Gebrauchswerterhöhung von Schiffen durch verbesserte Propeller“, InnoRegio-Projekt: Maritime Allianz Ostsee, FKZ 0310738B

- (1) Uwe Hemmann, MMG Mecklenburger Metallguß GmbH
- (2) Dr.-Ing. Gerlinde Winkel, SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt M-V GmbH

(siehe auch Firmenreportage in METALL 11/2005, S. 680)

	$R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ in %	Härte HV 5
Unbehandeltes Grundmaterial	218 - 222	500 - 530	10,3 – 12, 3	170
Material in der Laserspur	450 - 600	700 - 850	0,5 - 2	300 - 350

**Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften des untersuchten Materials CuAl10Ni5Fe5-C-GS**