

# Laseradditive Fertigung mit grüner Wellenlänge

Sabrina Vogt<sup>1</sup>, Marco Göbel<sup>1</sup>, Florian Hermann<sup>1,2</sup>, Michael Thielmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen; <sup>2</sup>Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, University of Stuttgart

*Durch den Einsatz eines Lasers mit einer grünen Wellenlänge von 515 nm, können stark reflektierende Materialien verarbeitet werden. Dies ermöglicht auch die additive Fertigung von Kupfer und Kupferlegierungen, die mit Infrarotwellenlänge nur schwer zu verarbeiten sind. In diesem Vortrag wird der Fortschritt bei der Herstellung von Kupfer und Kupferlegierungen mit dem grünen Laser, der durch die Erforschung von Prozessparametern erzielt wurde, präsentiert, es wird auf die einzigartigen Herausforderungen der Laserbearbeitung von hochreflektierenden, hochleitfähigen Materialien eingegangen und es wird ein direkter Vergleich zur Bearbeitung mit infrarotem Laser vorgenommen. Dabei werden Eigenschaften wie das Gefüge, die Dichte sowie die Härte untersucht. Dabei werden die folgenden beiden Verfahren betrachtet: das pulverbettbasiertes Laserschmelzen und das Laserauftragschweißen. Zum Schluss wird eine Übersicht mit möglichen Applikationen und Anwendungen, die für diese Verfahren geeignet sind, dargestellt.*

## 1. Einleitung

Die laserbasierten additiven Fertigungsverfahren werden schon seit langer Zeit zur Herstellung oder Modifikation von anspruchsvollen Materialien und Materialkombinationen eingesetzt. Seit kurzem stehen auch Reinkupfer und Kupferlegierungen im Fokus dieser Technologien [1]. Es besteht das Interesse an additiv gefertigten Bauteilen mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit. Durch Verwendung von Kupferlegierungen könnte beispielsweise die Wärmeabfuhr aus Werkzeugen in Kombination mit konturnahe Kühlkanälen noch gesteigert werden. Die meisten industriellen Festkörperlaser besitzen eine Wellenlänge von ca. 1  $\mu\text{m}$ . Die Laserbearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen ist bei dieser Wellenlänge aufgrund des geringen Absorptionsvermögens bei dieser Wellenlänge herausfordernd.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupferwerkstoffen erfordert generell eine hohe Leistungsdichte, um die Wärmediffusion zu überwinden. Des Weiteren werden Effekte wie Einschweißtiefe und Porenbildung maßgeblich von der Absorption der Energie im Substrat und der Wärmeleitung beeinflusst. Da die Absorption und die Wärmeleitung ebenfalls temperaturabhängige Größen sind, kann es dadurch insbesondere für Kupferwerkstoffe sehr herausfordernd sein einen stabilen, konstanten Arbeitspunkt für additive Prozesse zu etablieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verwendung eines Scheibenlasers mit grüner Wellenlänge (515 nm) für die laserbasierte additive Fertigung untersucht. Bei einer Wellenlänge von 515 nm ist das Absorptionsvermögen von Kupfer und Kupferlegierung um einen Faktor sechs größer als bei einer Wellenlänge von 1  $\mu\text{m}$ , was ein größeres Prozessfenster, sowie verbesserte Prozessergebnisse ergeben könnte.

## 2. Laseradditive Fertigung

Die verbreitetsten und bekanntesten laserbasierten additiven Fertigungstechnologien sind das Pulverbettbasierte Laserschmelzen (LMF) und das Laserauftragschweißen (LMD). Ein qualitativer Überblick und Vergleich der wichtigsten Prozessmerkmale beider Technologien sind in Abbildung 1 dargestellt.

	LMD	LMF
Productive method for repairing, coating and generating components	***	*****
Precise method for generative fabrication of complex parts out of a powder bed	*****	***
Application		
Geometric complexity	*****	***
Building on top of existing parts	*****	***
Max. build volume	***	***
Material bandwidth	***	***
Build rate	***	**
Level of detail / accuracy	**	*****
Surface quality	*	***

Abbildung 1: Qualitativer Vergleich der laserbasierten Fertigungstechnologien LMF und LMD

Bei der LMF-Technologie werden Bauteile schichtweise in einer mit Inertgas gefüllten Baukammer gedruckt (Abbildung 2, oben). Typische Schichtdicken liegen im Bereich von 30 bis 120  $\mu\text{m}$ . Der Laserstrahl wird durch Spiegel schnell über das Pulver geführt, was Scangeschwindigkeiten zwischen 500 mm/s und 2.000 mm/s ermöglicht. Die Pulverpartikel verschmelzen beim Auftreffen des Laserstrahls zu Schweißspuren, die mit dem Substrat oder den darunter liegenden Schichten verbunden werden. Je nach Maschinentyp und Anwendung können diese einzelnen Schweißspuren eine Breite von mehreren 10  $\mu\text{m}$  bis zu mehreren 100  $\mu\text{m}$  Breite aufweisen.

Bei der LMD-Technologie wird typischerweise eine koaxiale Pulverdüse verwendet, um Schweißspuren, Schichten oder Volumina auf Freiformflächen aufzuschweißen (Abbildung 2, unten). [3, 4, 5]

Im Gegensatz zur LMF-Technologie werden beim LMD typischerweise größere Laserspots, von 0,2-8,0 mm ge-

nutzt. Die Vorschubgeschwindigkeit – also die Relativgeschwindigkeit von Optik und Düse zur Werkstückoberfläche – ist mit 0,5 - 4 m/min deutlich kleiner als beim LMF. Beim LMD werden typische Schichthöhen von 0,3-2 mm erzielt.

Aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften wird die LMF-Technologie überwiegend für die additive Fertigung kleiner Gesamtbauteile mit filigranen Merkmalen und komplexen Designs verwendet, während die LMD-Technologie überwiegend für größere Bauteile und vorwiegend zur Reparatur oder Beschichtung von Bauteilen und der additiven Fertigung auf bestehenden 3D-Formen eingesetzt wird. [6, 7, 8]

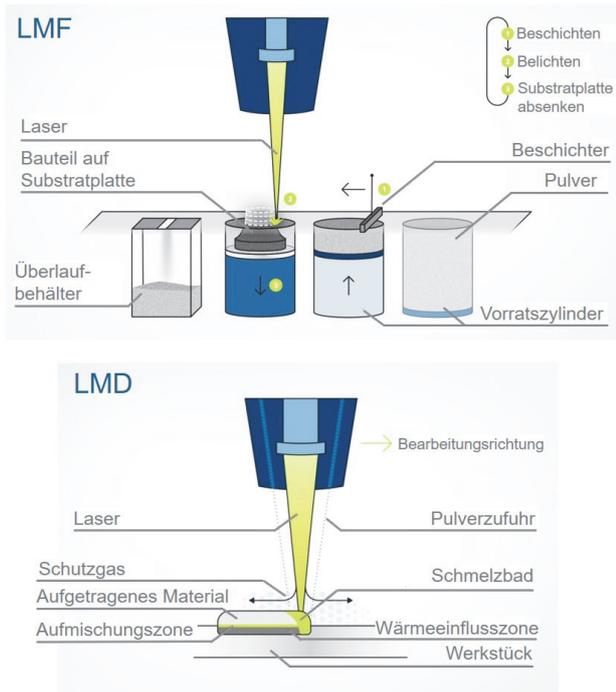


Abbildung 2: Funktionsprinzip der LMF-Technologie (oben) und LMD-Technologie (unten)

Neue Multi-Kilowatt-Industrielaserstrahlquellen ermöglichen die laseradditive Fertigung mit verbesserter Oberflächenfunktionalisierung von Kupfer und Kupferlegierungen. Durch die Verwendung der grünen Laserwellenlänge (515 nm) kann die Absorption des Laserlichts deutlich gesteigert werden. Sie beträgt ca. 30 %, wohingegen mit der Infrarot-Laserstrahlung lediglich ein Absorptionsgrad von ca. 5 % erreicht wird (Abbildung 3). Die grüne Wellenlänge kann insbesondere bei Bronze- oder Kupferlegierungen von Vorteil sein, wenn feine Strukturen hergestellt oder der Wärmeeintrag minimiert werden soll.

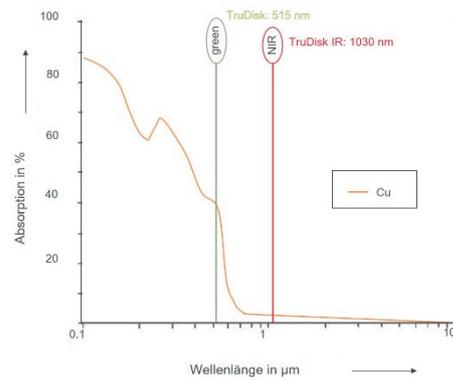


Abbildung 3: Absorptionskurve von Kupfer über die Wellenlänge

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Pulverbettbasiertes Laserschmelzen von Reinkupfer

Für die LMF-Versuche wurde Pulver mit einer Korngrößenverteilung von 10 – 45 µm verwendet. Die Prozessparameter wurden mit einem Design-of-Experiment-Ansatz durch Variation von Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand optimiert (Gleiche Vorgehensweise auch im Abschnitt 3.2.). Ziel der Optimierung ist es, eine elektrische Leitfähigkeit von 100% IACS und eine Porosität unterhalb von 0,5% zu erreichen.

Mit einer Volumenenergie von 225 J/mm<sup>3</sup>, kann eine Porosität von <0,5% und nahezu 100% IACS erzielt werden. Die Aufbaurrate beträgt dabei 8 cm<sup>3</sup>/h. Bei einer Steigerung der Aufbaurrate auf 16 cm<sup>3</sup>/h wird ebenfalls eine Dichte von >99,5% erzielt, die elektrische Leitfähigkeit nach IACS Standard beträgt dabei 95%.

Die Oberflächenrauheit in vertikaler Ausrichtung und einer Schichtdicke von 30 µm beträgt dabei R<sub>a</sub>=14 µm (Abbildung 4)

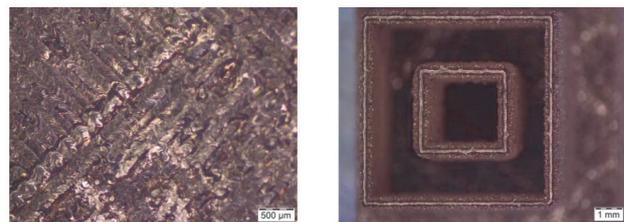


Abbildung 4: Mikroskopbilder der Oberfläche

Typische Anwendungen sind Induktoren zum Erwärmen und Härten sowie Wärmetauscher. In Abbildung 5 ist ein Wärmetauscher, der zur Kühlung von elektronischen Hochleistungskomponenten verwendet wird, dargestellt. Die Kühlkanäle sind für die Wärmeübertragung, für die additive Fertigung optimiert und für minimale Nachbearbeitung optimiert. Die Wandstärke der Struktur beträgt weniger als 1 mm, um die Wärmeübertragung von der Komponente auf die Kühlflüssigkeit zu maximieren, während der Wärmetauscher einen Kühlwasserdruck von 10 bar Stand hält. Fünf dieser Wärmetauscher werden innerhalb von 15 Stunden gebaut.



Abbildung 5: Applikationsbeispiel aus reinem Kupfer mit 100% IACS: Wärmetauscher

### 3.2. Pulverbettbasiertes Laserschmelzen von Kupferlegierung

Durch die Zulegierung von 0,5-1,2% Cr und 0,03-0,3% Zr kann ein guter Kompromiss zwischen Leitfähigkeit (bis zu 43 MS/m) und mechanischer Festigkeit erzielt werden. Diese Legierungstypen sind insbesondere für Luft- und Raumfahrtanwendungen wie beispielsweise die additive Fertigung von Verbrennungskammerbauteilen von Interesse.

Als Ergebnis der Prozessentwicklung wurden Parametersätze identifiziert, welche eine relative Dichte von 99,9 % bei Aufbautraten von 17 cm<sup>3</sup>/h aufweisen. Die Oberflächenrauheit weist wie beim reinen Kupfer eine R<sub>a</sub> von 14 µm auf.



Abbildung 6: Schliffbild einer Probe aus CuCr1Zr (links); Demonstrator für eine Brennkammer (rechts). Bauzeit 10h 40 min.

### 3.3. Laserauftragschweißen

Beim Laserauftragschweißen werden für die ersten Versuche die Kupferlegierung CuCr1Zr (Abschnitt 3.2) gewählt. Neben der Prozessentwicklung steht für die ersten Untersuchungen die Verarbeitbarkeit des Materials mit grüner Wellenlänge im Vergleich zur Verarbeitbarkeit des Materials mit infraroter Wellenlänge der Laserstrahlung im Mittelpunkt. Dazu werden zunächst Laserleistungen von maximal 1kW verwendet.

Als Ergebnis der Prozessentwicklung beim Laserauftragschweißen wurden Parametersätze identifiziert, welche eine gute Anbindung zum Stahlsubstrat, eine gute Anbindung zwischen den Schichten, sowie eine geringe Anzahl an Poren aufweisen (Abbildung 7).

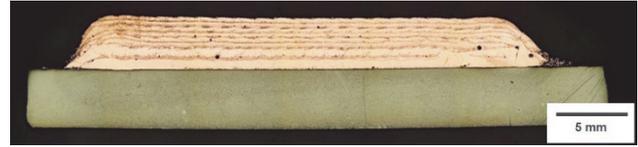


Abbildung 7: Schliffbild einer Probe aus CuCr1Zr auf ein Stahlsubstrat

Beim Aufbau der ersten Lage auf einer Stahlplatte gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Wellenlängen von 515 nm und 1030 nm. Die Schweißspur ist bei 515 nm etwas breiter. Beim Aufbau der darauffolgenden Schichten, wird mittels einer Wellenlänge von 515 nm eine deutlich größere Aufbaurrate von 0,23 mm<sup>3</sup>/min (bzw. 13,8 cm<sup>3</sup>/h) im Vergleich zu 0,06 mm<sup>3</sup>/min (bzw. 3,6 cm<sup>3</sup>/h) bei der Wellenlänge 1030 nm (Abbildung 8) erzielt.

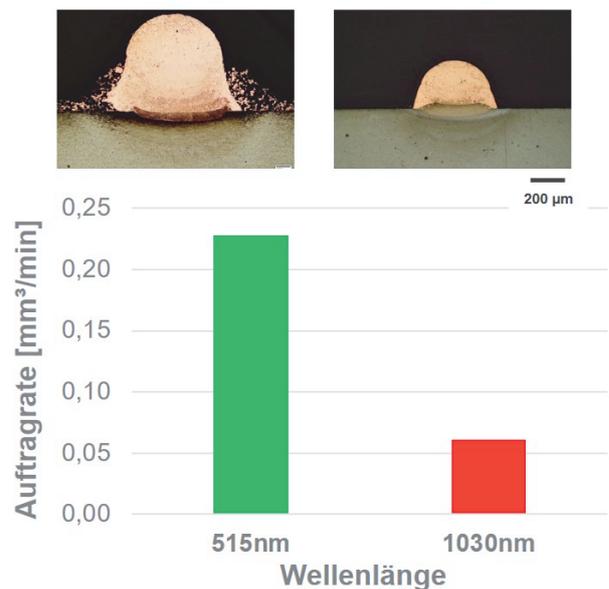


Abbildung 8: Schliffbilder und Auftragsrate von Proben aus CuCr1Zr auf ein Stahlsubstrat bei Bearbeitung eines Laserstrahls mit 515 nm (links) und 1030 nm (rechts) Wellenlänge im Vergleich

Um mittels infraroten Laserstrahlquellen vergleichbare Aufbautraten zu denen von mit grüner Wellenlänge aufgebauten Volumina zu erzielen, ist in der Regel ein Vielfaches der eingesetzten infraroten Laserleistung erforderlich. In diesem Beispiel ist circa 2,3-fach mehr Laserleistung bei einer Wellenlänge von 1 µm erforderlich, um die gleiche Aufbaurrate wie mit einer grünen Wellenlänge zu erzielen (Abbildung 9).

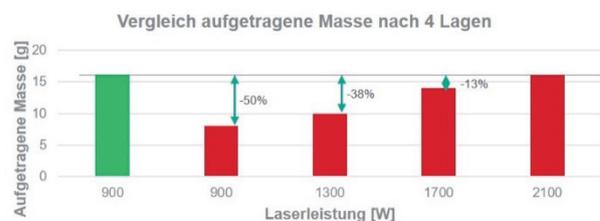


Abbildung 9: Vergleich der aufgetragenen Masse nach 4 Schichten bei 515 nm (grün) und 1030 nm (rot) in Abhängigkeit der Laserleistung.

In den nächsten Schritten werden Untersuchungen mit höheren Laserleistungen (bis zu 3 kW) durchgeführt, um bei der Verarbeitung von Kupferlegierungen bessere Ergebnisse – wie bspw. höhere Aufbauraten, tiefere Einschweißstiefen, usw. – zu erzielen und auch reines Kupfer effizient verarbeiten zu können. Mit dem verwendeten Equipment für das Laserauftragschweißen ist 1 kW für reines Kupfer nicht ausreichend, um qualitative gute Ergebnisse zu erzielen. In einem weiteren Schritt sollen Demonstratoren aufgebaut werden.

#### 4. Zusammenfassung

Durch den Einsatz der grünen Laserstrahlquelle für die laserbasierten additiven Fertigungsverfahren, dem pulverbettbasierten Laserschmelzen (LMF) und dem Laserauftragschweißen (LMD), kann eine verbesserte Bearbeitung von hochreflektierenden Werkstoffen wie Kupfer und Kupferlegierungen aufgezeigt werden. Die höhere Absorption bei der kürzeren Wellenlänge von 515 nm gegenüber 1030 nm verbessert die Energieeinkopplung deutlich, was insbesondere beim Verschmelzen von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie reinem und niedriglegiertem Kupfer wichtig ist. Dadurch wird der Prozess robuster und verbessert die Oberflächengüte. Die höhere Absorptionsrate verbessert auch die Prozesseffizienz und die Aufbaurate. Der Einsatz der grünen Laserstrahlquelle bei den additiven Fertigungsverfahren wird neue Anwendungen für Bauteile aus einem erweiterten Materialspektrum ermöglichen, die in der Vergangenheit nur bedingt oder gar nicht verarbeitbar waren.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Becker, S.: Selektives Laserschmelzen von Kupfer und Kupferlegierungen. Apprismus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2014
- [2] Amorosi et al., "Reliable micro-spot welding of copper", Proc. SPIE 5063, (2003)
- [2] Meiners, W.: Direktes selektives Laser Sintern ein-komponentiger metallischer Werkstoffe. Dissertation. Shaker, Aachen 1999
- [3] Zhang, D.: Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) für Aluminiumwerkstoffe. Dissertation. Shaker, Aachen 2004
- [4] Bremen, S.; Meiners, W.; Diatlov, A.: Selective Laser Melting. Laser Technik Journal; Volume 9, Issue 2, 2012
- [5] Nowotny, S.; Scharek, S.; Beyer, E.; Richter, K.-H.: Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding and direct 3D metal deposition; Journal Therm. Spray Technol.; Volume 16, pp.344-348; 2007
- [6] Candel-Ruiz, A.; Metzger, J.: Reparaturlösungen für höchste Ansprüche – Laserauftragschweißen zur Reparatur von Bauteiloberflächen; Laser Technik Journal; Volume 8, Issue 6; 2011
- [7] Gasser, A.; Meiners, W.; Weisheit, A.; Willenborg, W.; Stollenberg, J.; Wissenbach, K.: Maßgeschneiderte Oberflächen und Bauteile; Laser Technik Journal; Volume 7, Issue 4; 2010