

FOTOS: FRAUNHOFER IFAM

Reinkupfer-Würfel für eine Parameterstudie.
Jeder Würfel wurde mit unterschiedlichen
Prozessparametern gefertigt.

Selektives Elektronenstrahlschmelzen

Drucken von hochreflektivem Reinkupfer ohne Wärmenachbehandlung

Das Selektive Elektronenstrahlschmelzen ist ein werkzeugloses pulverbett- und strahlbasiertes additives Fertigungsverfahren für die Verarbeitung selbst stark reflektierender Werkstoffe unter hochreinen Bedingungen – ideale Voraussetzungen für formkomplexe Bauteile aus Reinkupfer mit einzigartiger Kombination aus elektrischer und thermischer Leitfähigkeit.

FLORIAN HÄSLICH, DRESDEN

1 Einleitung

Am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Dresden wird ein breites Spektrum additiver Fertigungsverfahren erforscht. Alle Verfahren beruhen auf dem schichtweisen Aufbau dreidimensionaler Metallbauteile, ausgehend von CAD-Daten. Hieraus ergeben sich enorme geometrische Freiheiten, ein hoher Individualisierungsgrad und

eine ausgezeichnete Rohstoffeffizienz. Das Selektive Elektronenstrahlschmelzen (engl.: Selective Electron Beam Melting, SEBM; auch: Electron Beam Powder Bed Fusion, EPBF) erfolgt unter Hochvakuum ohne jegliche Prozesshilfsmittel, wodurch hochreaktive und auch hochreine Werkstoffe verarbeitbar sind. Der fokussierte Elektronenstrahl ermöglicht die additive Fertigung selbst hochreflektiver, hochschmelzender, verschleißbeständiger oder rissanfälliger Werkstoffe ohne nachträgliche Wärmebehandlung der Bauteile von bis zu mehreren Dezimetern Größe.



Bild 1: SEBM-Anlage Q20plus mit geöffneter Baukammer.

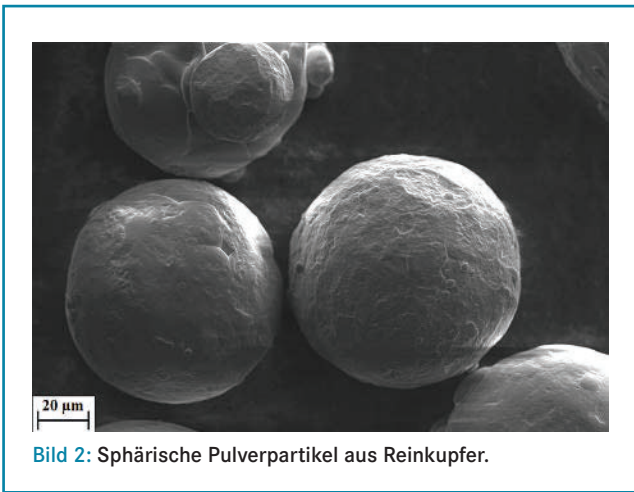


Bild 2: Sphärische Pulverpartikel aus Reinkupfer.

2 Prozessablauf

Die Baukammer einer SEBM-Anlage (Bild 1) beinhaltet eine Bauplattform, die in der Höhe verstellt werden kann, und Vorratsbehälter, aus denen Pulver durch Schwerkraft nachfließt. Auf der Bauplattform wird eine metallische Grundplatte, z.B. aus Edelstahl, platziert. Der Elektronenstrahl kann durch elektromagnetische Spulen trägheitslos in der Bauebene abgelenkt werden, wodurch sich hohe Scangeschwindigkeiten von mehreren Metern pro Sekunde realisieren lassen. Im Hochvakuum der Baukammer wird der zunächst stark defokussierte Elektronenstrahl zum Vorheizen der Grundplatte genutzt. Die entsprechende Vorheiztemperatur richtet sich nach dem zu verarbeitenden Werkstoff und liegt für Reinkupfer bei 300 °C, wohingegen für Nickelbasis-Superlegierungen und Refraktärmetalle etwa 1000 °C notwendig sind. Nach dem Absenken der Bauplattform um die entsprechende Schichtdicke von typischerweise 50 bis 150 µm wird Pulver von einer Edelstahl-Rakel zu einer gleichmäßigen losen Schicht verteilt und bildet das Pulverbett. Jede Pulverschicht wird ebenfalls zunächst mittels defokussiertem Elektronenstrahl vorgeheizt, was zum geringfügigen Versintern benachbarter Pulverpartikel führt. Das Pulverbett wird dadurch elektrisch und thermisch leitfähig und erhält eine gewisse mechanische Stützwirkung, im Gegensatz zu losem Pulver. Anschließend wird die entsprechende Pulverschicht mit dem fokussierten Elektronenstrahl gemäß der CAD-

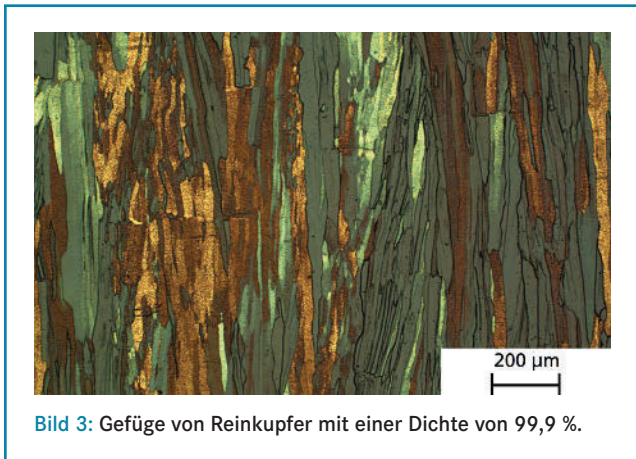


Bild 3: Gefüge von Reinkupfer mit einer Dichte von 99,9 %.

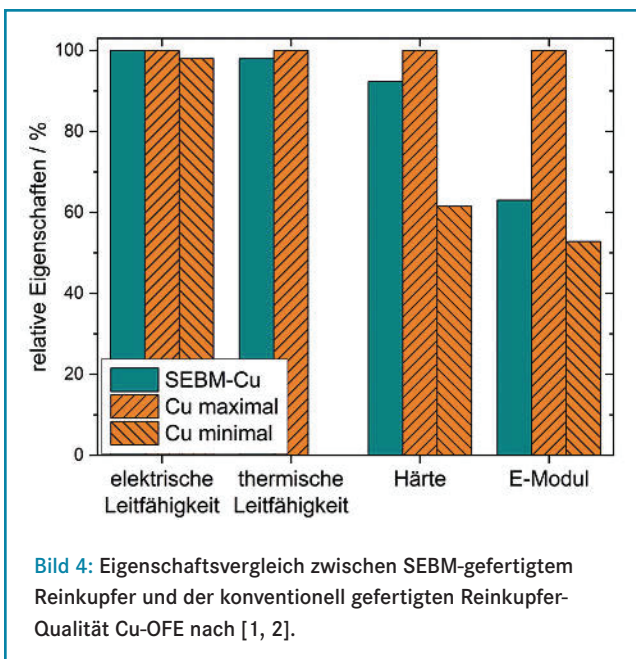


Bild 4: Eigenschaftsvergleich zwischen SEBM-gefertigtem Reinkupfer und der konventionell gefertigten Reinkupfer-Qualität Cu-OFE nach [1, 2].

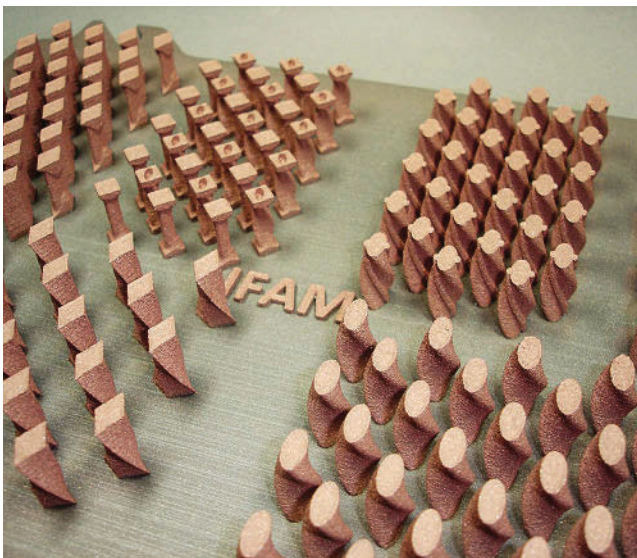


Bild 5: Demonstrator verschiedener Kühlstrukturen aus Reinkupfer auf Edelstahl-Grundplatte.

Daten lokal aufgeschmolzen und erstarrt zum festen Bauteil. Diese Abfolge wiederholt sich so lange, bis die endgültige Bauteilhöhe erreicht ist. Nach vollendetem Baujob kühlen Bauteil und Pulverbett auf Raumtemperatur ab, die Baukammer wird belüftet und überschüssiges, nicht-aufgeschmolzenes Pulver

kann entfernt werden. Überschusspulver ist durch mechanisches Sieben nachweislich mehr als 15-mal rezyklierbar, woraus sich die hohe Rohstoffeffizienz des SEBM-Verfahrens ergibt.

Überhänge von geometrisch komplexen Bauteilen können durch Stützstrukturen realisiert werden, welche im schichtweisen Aufbau durch entsprechendes lokales Schmelzen mit gefertigt und abschließend vom Bauteil entfernt werden. Stützstrukturen müssen nicht bis zur Grundplatte hinab konstruiert und gefertigt werden, sondern lediglich wenige Millimeter in das stützend wirkende Pulverbett hineinragen. Auch diese Prozesseignheit trägt zur hohen Materialeffizienz bei.

Das Vorheizen des Pulverbetts wirkt neben dem geringfügigen Versintern der losen Pulverschichten weiterhin als integrierte Wärmebehandlung des Bauteils während des Baujobs; SEBM-gefertigte Bauteile sind frei von Eigenspannungen und ein nachträgliches Spannungsarmglühen als zusätzlicher Prozessschritt ist nicht erforderlich.

3 Baumaterial

3.1 Anforderungen an die Pulverqualität

Der zu verarbeitende Werkstoff muss als Pulver mit typischen Partikelgrößen von 45 bis 105 µm verfügbar sein. Diese gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren vergleichsweise groben Pulver sind kostengünstiger und ermöglichen, neben anderen Einflussfaktoren, hohe Bauraten im Bereich von 10 bis 80 cm³/h, resultieren allerdings in hohen Rauheiten der Bauteiloberflächen von etwa 40 µm R_a.

Da das Pulver durch Schwerkraft aus den Vorratsbehältern fließen und zu einer gleichmäßigen Schicht gerakelt werden muss, ist eine hinreichende Fließfähigkeit erforderlich. Dies wird durch sphärische Pulverpartikel mit wenigen Satelliten (Bild 2) und einen geringen Feinanteil des Pulvers begünstigt.

3.2 Verarbeitung von hochreflektivem Reinkupfer

Die Absorption des Elektronenstrahls im Metallpulver ist unabhängig von dessen optischen Eigenschaften, wodurch selbst bei optisch stark reflektierenden Werkstoffen wie Reinkupfer die zur Verfügung stehende Eingangsleistung vollständig ins Pulverbett eingekoppelt werden kann. In Kombination mit der starken Fokussierung des Elektronenstrahls ergeben sich hohe Energiedichten zum lokalen Schmelzen der Pulverschichten. Außerdem besteht keinerlei Risiko der Reflexion des Elektronenstrahls, weshalb keine Anlagenkomponenten durch Reflexionen beschädigt werden können.

Für die SEBM-Verarbeitung von Kupferpulver mit einer Reinheit von 99,95 % wurde mithilfe der Methode der Statistischen Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments, DoE) ein sehr weites Prozessfenster entwickelt. Bei einer Vorheiztemperatur von 300 °C und einer Schichtdicke von 50 µm ergaben sich anwendbare Leistungen von 600 bis 1500 W und Scangeschwindigkeiten von 1000 bis 5000 mm/s bei Abständen der Schmelzlinien von 50 bis 150 µm für Bauteile mit Dichten von > 99 % und maximalen Dichten von 99,9 %. Sämtliche Bauteile waren rissfrei und es waren keine makroskopischen Defekte nachweisbar.

Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigten stark gerichtete Gefüge mit feinkörnigen Stängelkristallen parallel zur Bauichtung, wie sie typisch für strahlbasierte additive Fertigungsverfahren sind (Bild 3), da die hohe thermische Leitfähigkeit von Reinkupfer zu ausgeprägten thermischen Gradienten und hohen Abkühlgeschwindigkeiten beim Erstarren des lokalen Schmelzbads führt. Dies konnte durch analytische Temperaturfeld-Simulationen der Erstarrungsfronten bestätigt werden.

Im Zustand wie gebaut, ohne nachträgliche Wärmebehandlung, wurden elektrische Leitfähigkeiten von 100 % IACS (International Annealed Copper Standard), thermische Leitfähigkeiten von 360 bis 385 W/(m*K), Mikrohärtungen von 60 HV0,05 und Elastizitätsmoduln von 80 GPa nachgewiesen (Bild 4). Der im Vergleich zu Reinkupfer mit globularem Gefüge niedrigere E-Modul resultiert aus der gerichteten Kornstruktur mit Stängelkristallen, welche eine kristallografische <100>-Orientierung parallel zur Baurichtung aufweisen. Entsprechend ist in Bild 4 als niedriger Vergleichswert der E-Modul von <100>-Einkristallen aus Reinkupfer dargestellt. Diese Ergebnisse bestätigen die hervorragende Eignung des SEBM-Verfahrens für die additive Fertigung von Bauteilen aus hochleitfähigem Reinkupfer, z.B. für formkomplexe Wärmeübertrager im thermischen Management (Bild 5) oder elektronische Bauteile.

4 SEBM-Entwicklungen

Am Fraunhofer IFAM Dresden stehen zwei SEBM-Anlagen des Herstellers GE Additive (vormals Arcam EBM) mit jeweils 3 kW Leistung zur Verfügung, eine Anlage A2X mit einem Bauraum von 200 × 200 × 380 mm³ für die Verarbeitung von Hochtemperaturwerkstoffen und eine Anlage Q20plus mit einem zylindrischen Bauraum von ø 300 × 380 mm³ mit integrierter schichtweiser Prozessüberwachung. Nach GE Additive erweitern zunehmend mehr Anlagenhersteller die Vielfalt verfügbarer SEBM-Anlagen auf dem Markt, darunter ALD Vacuum Technologies, Freemelt, JEOL, Pro-Beam und Wayland Additive.

Mit dem SEBM-Verfahren sind prinzipiell alle elektrisch leitfähigen Werkstoffe verarbeitbar, die in hinreichender Pulverqualität zur Verfügung stehen. Das Fraunhofer IFAM verfügt über umfangreiches SEBM-Know-how zu folgenden Werkstoffen: Titan-Legierungen und Titanaluminide, Nickelbasis-Superlegierungen, Edelstahl- und Warmarbeitsstähle, Eisenbasis-Legierungen (Bild 6), die Refraktärmetalle Wolfram und Molybdän (Bild 7) sowie Reinkupfer. Die SEBM-Verarbeitung von Kupfer-, Aluminium- und Hoch-Entropie-Legierungen ist Gegenstand aktueller Forschung.

Das Fraunhofer IFAM bietet Kunden F&E-Kompetenzen für Pulveranalytik im eigenen akkreditierten Labor, Prozessentwicklung, Qualifizierung neuer Werkstoffe für die SEBM-Verarbeitung, optionale nachträgliche Wärmebehandlung sowie Herstellung von Prototypen, Demonstratoren und Kleinserien. Neben dem Selektiven Elektronenstrahlschmelzen stehen Kunden hier die Verfahren Filamentdruck (FFF), Lithography-based Metal Manufacturing (LMM), MoldJet, Gel Casting und 3-D-Siebdruck zur Verfügung.

Zusammenfassung

Das Selektive Elektronenstrahlschmelzen ermöglicht die additive Fertigung eines weiten Spektrums von Metallen und Sonderwerkstoffen. Unter Einbezug des Materials der Grundplatte ergeben sich außerdem Möglichkeiten für hybride Werkstoffverbunde, wie z.B. Reinkupfer auf Edelstahl. Die gute Verarbeitbarkeit von Reinkupfer mittels SEBM konnte nachgewiesen werden, wobei defektfreie Bauteile mit hervorragenden Eigenschaften ohne den nachträglichen Prozessschritt einer Wärmebehandlung erzielt wurden. Das sehr weite Prozessfenster bietet hierbei Potenziale für weiterführende Optimierungen, z.B. der Bauraten oder erzielbaren Oberflächengüten von formkomplexen Bauteilen für thermische und elektronische Anwendungen.

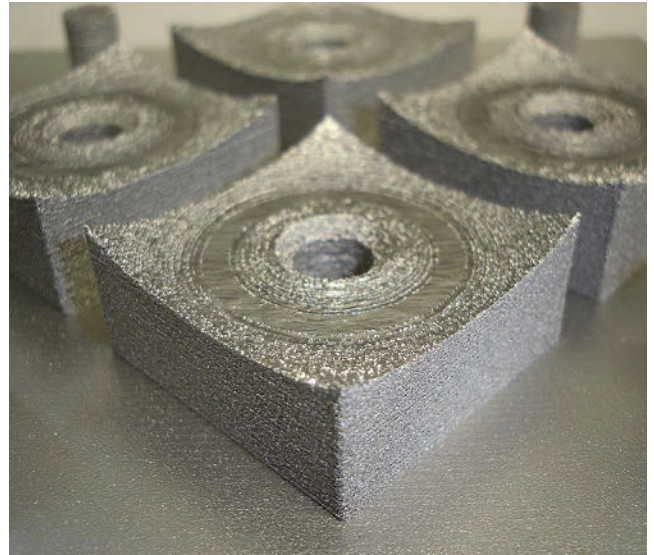


Bild 6: FeCrV-Schneidkronen auf Grundplatte aus warmfestem Stahl.

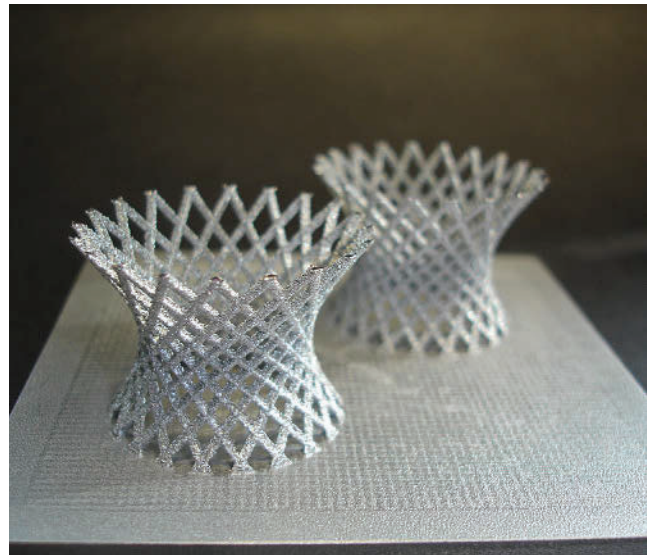


Bild 7: Molybdän-Gitterstruktur auf Grundplatte aus Molybdän.

Dipl.-Ing., M. Eng. Florian Häslich, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden

[1] Deutsches Kupferinstitut: Datenblatt Cu-OFE. 2005.

[2] Rösler J.; Bäker M.: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.