

Herstellung von AlSi10Mg-Leiterbahnen durch pulverbettbasiertes Laser-Strahlschmelzen (PBF-LB/M): Aufbauwinkel, Dichte und elektrische Leitfähigkeit

Verfasser des Aufsatzes: Thomas Bareth^a, Olgu Yücel^{a,b}, Maximilian Binder^{a,b}, Christian Seidel^{a,c}

^aFraunhofer IGCV (Institute for Casting, Composite and Processing Technology),
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg, Germany

^bTechnical University of Munich, Institute for Machine Tools and Industrial Management,
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, Germany

^cMunich University of Applied Sciences, Department of Applied Sciences and Mechatronics,
Lothstr. 34, 80335 Munich, Germany

https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2023_001

Zusammenfassung Additive Fertigungsverfahren finden immer häufiger Einzug in industrielle Produktionsprozesse. Ein aktuelles Forschungsgebiet, welches das Potenzial besitzt, diesen Trend zu verstärken, ist die automatisierte Integration von Sensoren in additiv gefertigte Bauteile. Dabei werden Sensoren während des Fertigungsprozesses ohne manuellen Eingriff in das Bauteil eingelegt und mit ebenfalls während des Prozesses gefertigten Leiterbahnen ankontaktiert. Hierdurch können elektrische Signale und Messwerte vom Bauteilinneren zur Außenseite des Bauteils transportiert werden, wodurch eine Zustandsüberwachung der gefertigten Komponente während der Nutzung ermöglicht wird. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse einer Baubarkeitsstudie zu Möglichkeiten und Grenzen des Aufbaus von dünnen Leiterbahnstrukturen aus dem Werkstoff AlSi10Mg mittels Laser-Strahlschmelzen vor. Für diesen Zweck wurden Bereiche definiert, in denen Leiterbahnen zuverlässig und mit ausreichender Qualität gefertigt werden können.

Abstract Additive manufacturing is increasingly finding its way into industrial production. One current area of research that has the potential to strengthen this trend is the automated integration of sensors during the build-up. Thereby, sensors are automatically inserted into the component during the manufacturing process and connected via conductive tracks that are also produced during the build-up. The conductor tracks transport electrical signals and measured values from the inside of the component to the outside and thus enable condition monitoring during its use. This paper presents the results of a feasibility study on the potentials and limitations of building thin conductor track structures from AlSi10Mg using PBF-LB/M. For this purpose, framework conditions were defined in which conductive tracks can be produced reliably and with sufficient quality.

Einleitung

Additive Fertigungsverfahren (AM), wie das pulverbettbasierte Laser-Strahlschmelzen (PBF-LB/M), bieten Entwicklern eine einzigartige Designfreiheit. Durch das Schmelzen von Pulvermaterial mittels eines Laserstrahls werden beispielsweise beim PBF-LB/M Bauteile Schicht-für-Schicht aufgebaut. Nicht nur die Designfreiheit der Gestaltung, sondern auch die Möglichkeit Hochleistungsmaterialien zu verarbeiten, hat zu einer zunehmenden industriellen Nutzung dieser Fertigungsverfahren beigetragen. [1-3] Im Triebwerksbau werden beispielsweise Komponenten aus Nickelbasis-Superlegierungen gefertigt, um extremen Belastungen, verursacht durch beispielsweise hohe Temperaturen und Drücke, standhalten zu können. Da jedes Bauteil eine begrenzte Lebensdauer hat, ist eine angemessene Planung und Durchführung von Wartungsarbeiten an solch hochbelasteten und meist sicherheitsrelevanten Bauteile von großer Bedeutung. Vor allem wenn es darum geht, Schäden vorauszusagen und damit die Betriebssicherheit zu erhöhen, ist eine Zustandsüberwachung des Bauteils durch entsprechende Sensoren erforderlich. Eine reproduzierbare Integration von Sensoren in Bauteile, ohne diese strukturell maßgeblich zu schwächen, stellt jedoch eine Herausforderung dar; vor allem, wenn Sensoren nachträglich integriert werden sollen.

Additive Fertigungsverfahren, im Besonderen PBF-LB/M, bieten hier die Möglichkeit, während der Bauteilfertigung Sensoren an einer gewünschten Position im Bauteil zu integrieren. Dies kann nach aktuellem Stand der Technik manuell oder automatisiert erfolgen. [4, 5] Zur Integration von Sensoren ist häufig eine Ankontaktierung des Sensors durch geeignete Leiterbahnen notwendig, um Daten des Sensors in Form von elektrischen Signalen aus dem Bauteilinneren nach außen transportieren zu können. Hierfür werden dünne Leiterbahnstrukturen benötigt, die ebenfalls direkt während des Prozesses gefertigt werden können. Am Beispiel der Verarbeitung der Aluminiumlegierung AlSi10Mg zeigt der vorliegende Beitrag Möglichkeiten und Grenzen der Fertigung von Leiterbahnen auf.

Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise, die verwendeten Messmittel sowie die genutzte PBF-LB/M-Anlage vorgestellt.

Für die Untersuchungen wurden Leiterbahnen mit einem quadratischen Leiterquerschnitt aufgebaut. Als Qualitätsmerkmal der Leiterbahnen werden eine möglichst hohe Dichte und elektrische Leitfähigkeit angestrebt, die durch Variieren der vorher definierten Einflussfaktoren (Aufbauwinkel, Querschnittsfläche und Bauorientierung) erreicht werden sollen. Aufgrund der unterschiedlichen Bauorientierung wurden eindeutige Koordinatensysteme und Richtungen sowie Bezeichnungen festgelegt, wie in Abbildung 1 gezeigt. Zur Analyse der Ergebnisse wurden Schliffproben der Leiterbahnquerschnitte erstellt, die kalt eingebettet wurden. Dazu kam das Kalteinbettmittel KEM 90 von ATM zum Einsatz. Im Anschluss wurden die Proben auf einer Saphir 530 Schleif- und Poliermaschine präpariert. [6] Für die qualitative Analyse der Querschnitte kam das Auflichtmikroskop BX53M von Olympus und die zugehörige Stream Essentials Software zum Einsatz. [7] Zur Bestimmung der Probendichte wurde die archimedische Dichtemessung gemäß DIN 66137-3 angewandt und die Messung für jede Probe jeweils drei Mal durchgeführt. Anschließend ist daraus der arithmetische Mittelwert gebildet und die Standardabweichung bestimmt worden. Zusätzlich erfolgte eine Analyse der Porendichte innerhalb der Strukturen.

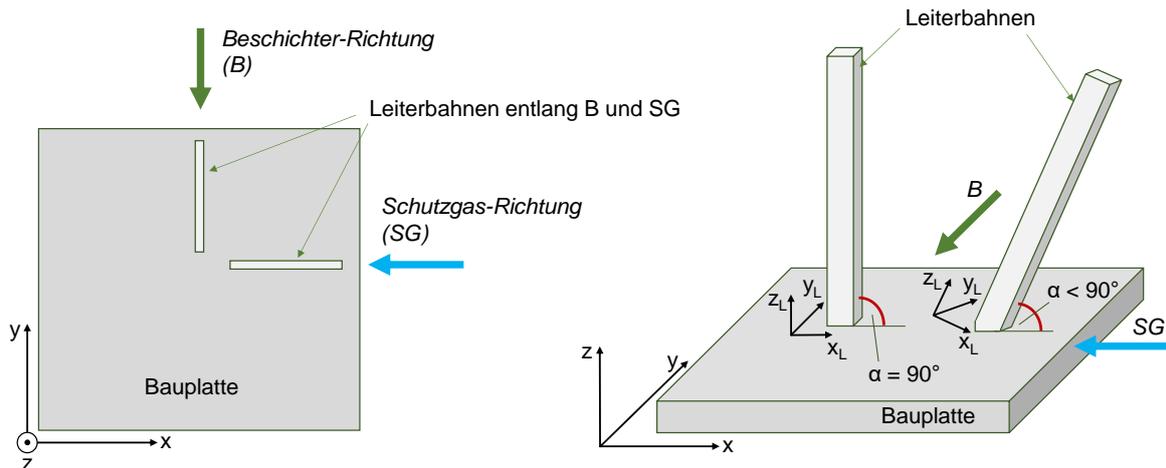


Abbildung 1: Definierte Koordinatensysteme und Richtungen sowie Darstellung des Aufbauwinkels α .
Links: Sicht von oben auf die Bauplatte. Rechts: Schräge Ansicht von rechts oben auf die Bauplatte mit jeweils in verschiedene Richtungen orientierte, beispielhafte Leiterbahnen.

Als PBF-LB/M-Anlage wurde eine SLM 125^{HL} der Firma SLM Solutions verwendet. Diese ist mit einem IPG-Faserlaser und einer maximalen Leistung von 400 W sowie einer Bauplattformheizung (max. 200 °C) ausgestattet. Das Bauraumvolumen beträgt 125×125×125 mm³, abzüglich der Bauplattformdicke. [8] Das in dieser Arbeit verwendete AlSi10Mg-Pulver (Partikelgröße: 20 – 63 µm) stammt ebenfalls vom Anbieter SLM Solutions. [9] Die verwendeten Prozessparameter (siehe Tabelle 1) wurden aus vorherigen Untersuchungen zu dünnen AlSi10Mg-Strukturen übernommen.

Tabelle 1: Verwendete Prozessparameter

Laserleistung [W]	Scangeschwindigkeit [mm/s]	Schichtdicke [µm]	Energiedichte [J/mm ³]
330	1250	50	330
200 °C Bauplattformheizung			

Um neben der Dichte die elektrische Leitfähigkeit und den elektrischen Widerstand von AlSi10Mg-Strukturen zu bestimmen, wurden balkenförmige Bauteile in SG- und B-Richtung mit einer Länge von 50 mm und einem vergleichsweise großen Querschnitt von 8,0×8,0 mm² aufgebaut. Die große Querschnittsfläche wurde aufgrund der vorgegebenen Probenmindestgröße der verwendeten Messgeräte festgelegt. Für die Messungen der Leitfähigkeit und des Widerstands, sowie des spezifischen Widerstands, wurde die 4-Punkt-Messmethode mit dem Leitfähigkeitsmessgerät Loresta GX (NH Instruments) [10] angewandt. Anschließend wurde die Leitfähigkeit mit dem Wirbelstrommessgerät Sigmascope SMP350 (Fischer) [11] gemessen. Nach erfolgter Messung wurden die Balkenstrukturen gemäß den Angaben des Pulverherstellers für zwei Stunden bei 300 °C in einem Wärmebehandlungsofen spannungsarmgeglüht. Die Abkühlung erfolgte über 24 Stunden bei ausgeschaltetem Ofen und geschlossener Ofentür, um durch zu schnelles Abkühlen einen erneuten Eigenspannungsaufbau zu vermeiden. Nachdem die Temperatur der Bauteile Raumtemperatur erreicht hatte, wurden sie aus dem Ofen entnommen und die Messungen erneut durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Dichte

Die archimedisch bestimmte relative Dichte von Leiterbahnstrukturen mit den quadratischen Querschnittsmaßen $1,0 \times 1,0 \text{ mm}^2$ und Bauwinkeln von 10° bis 90° , ist in Abbildung 2 (linke Seite) dargestellt. Die relative Dichte ergibt sich aus dem Verhältnis der gemessenen Dichte und der theoretischen Dichte von AlSi10Mg-Vollmaterial ($\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$). Die relative Dichte der Proben wird somit ohne Einheit als Zahlenwert zwischen 0 und 1 angegeben. Für beide Bauorientierungen (SG und B) ist mit steigendem Aufbauwinkel α ein Trend hin zu größeren Werten für die relative Dichte zu beobachten, wobei die Werte für die SG-Richtung in 6 von 9 Fällen geringfügig höher liegen als für die B-Richtung. Eine maximale Dichte von 99,7 % wurde beim senkrecht stehenden Leiter, welcher in B-Richtung aufgereiht ist, erreicht. Der niedrigste Wert von 93,4 % wurde für Leiterbahnen mit $\alpha = 10^\circ$ in SG-Richtung ermittelt. Für den Fall, der im rechten Teil von Abbildung 2 gezeigt ist, mit $\alpha = 90^\circ$ und variierten Querschnittsmaßen, ist kein ausgeprägter Trend zu höheren Dichtewerten mit steigender Querschnittsfläche zu verzeichnen. Die relative Dichte ist für senkrecht stehende Leiterbahnstrukturen für unterschiedliche Querschnittsflächen nahezu konstant. Der niedrigste Wert der Dichte liegt bei 98,7 % für die gefertigte Leiterbahn mit einem Querschnitt von $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$ (SG-Richtung). Damit lässt sich festhalten, dass der Bauwinkel einen hohen Einfluss auf die Dichte der Leiterbahnstrukturen hat. Die Dicke der senkrecht aufgebauten Strukturen hat hingegen bei den verwendeten Parametern nur einen geringen Einfluss auf die Dichte. Die Bauorientierung (SG und B) verursacht bei variiertem Aufbauwinkel keinen großen Unterschied. Im Fall $\alpha = 90^\circ$ zeigt sich keine deutliche Abweichung zwischen den in B- und SG-Richtung aufgereihten Leiterbahnen, da sich aufgrund der senkrechten Lage keine Diskrepanz zwischen beiden Richtungen ergibt.

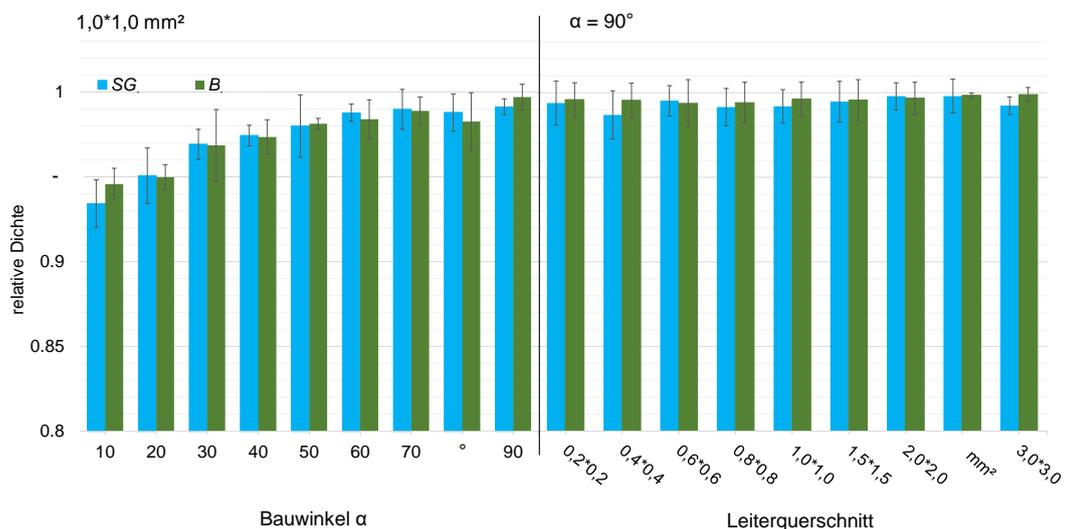


Abbildung 2: Links: archimedisch bestimmte relative Dichte der $1,0 \times 1,0 \text{ mm}^2$ Leiterbahnen für verschiedene Aufbauwinkel α . Rechts: archimedisch bestimmte relative Dichte der Leiterbahnen für verschiedene Querschnittsmaße bei Bauwinkel $\alpha = 90^\circ$; Legende: SG: Schutzgasrichtung, B: Beschichterrichtung

Zusätzlich zur archimedischen Messung wurde für die gefertigten Leiterbahnstrukturen eine Porenanalyse durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die Schlibfbilder der Leiterbahnen mit einer $1,0 \times 1,0 \text{ mm}^2$ -Querschnittsfläche, die in verschiedenen Bauwinkeln α in SG-Richtung gefertigt wurden. Einzelne Querschnitte, mit sichtbarem Unterschied in der Porenkonzentration innerhalb der Leiterbahn, sind durch eine rote Linie in zwei Bereiche unterteilt. Die Porendichte ist dabei teilweise für den oberen, unteren sowie für den Gesamtquerschnitt angegeben. In den Schlibfbildern ist eine sinkende Porendichte mit größer werdendem Bauwinkel α erkennbar. Dies stimmt mit den Ergebnissen der archimedischen Dichtemessungen überein. Die Schlibfbilder zeigen zusätzlich, dass sich bei kleinen Bauwinkeln Poren im unteren Bereich der Strukturen konzentrieren. Die höchste Porendichte mit einem Wert von 3,05 % weist das Schlibfbild mit einem Bauwinkel $\alpha = 10^\circ$ auf. Zusätzlich sind unregelmäßige Strukturen im Downskin-Bereich der Leiterbahnen zu erkennen. Dies ist vermutlich dem großen Überhangwinkel der Leiterbahnen geschuldet, da hier das lose Pulverbett durch den Laser belichtet wird und – da keine Supportstrukturen eingesetzt wurden – keine geregelte Wärmeabfuhr über das schlecht wärmeleitende Pulverbett stattfinden kann. Es entstehen dadurch ungleichförmige Bereiche an der Unterseite der Leiterbahnen und vermehrt Porosität. Besonders im Bereich des Bauwinkels α von 10° bis 30° äußert sich dies in größeren Ansinterungen von Pulver oder fehlendem Material, wie es der Fall bei $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 40^\circ$ ist. Dadurch entsteht eine große Abweichung von der Soll-Geometrie. Bei einem Bauwinkel von $\alpha = 50^\circ$ und darüber wird die Präsenz der Poren verschwindend gering, was gleichbedeutend mit einer größeren Bauteildichte ist. Zusätzlich wird bei einem höheren Bauwinkel die Geometriegenauigkeit erhöht.

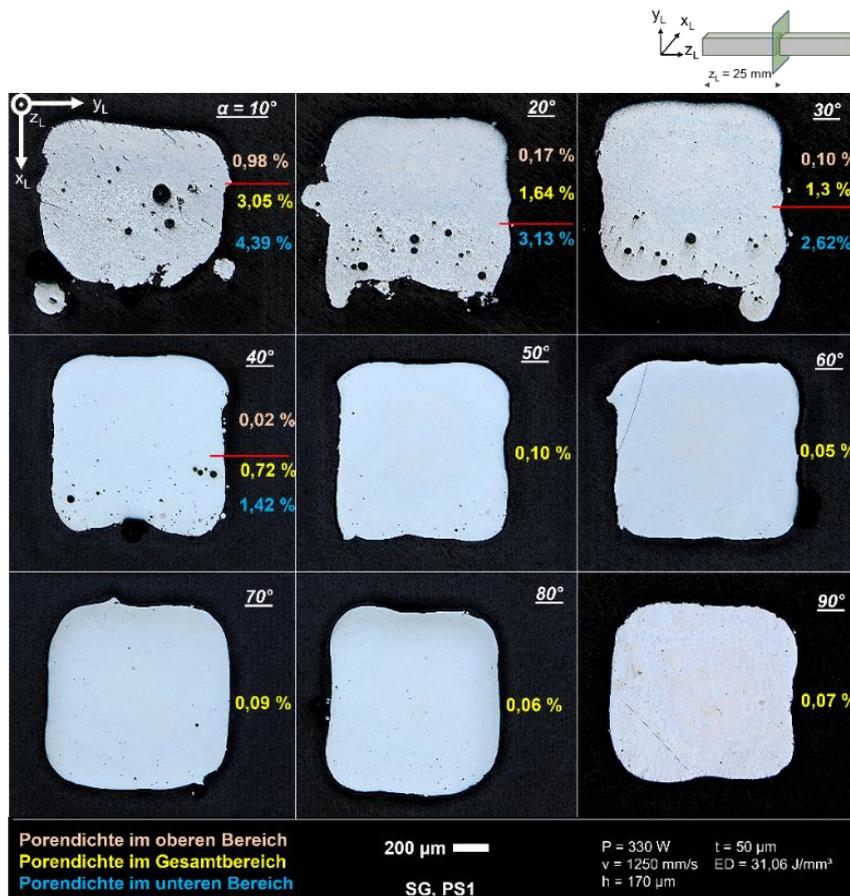


Abbildung 3: Schlibfbilder und Porendichte von Querschnitten der Leiterbahnen mit $x_L \times y_L = 1,0 \times 1,0 \text{ mm}^2$ und $\alpha = 10 - 90^\circ$, in SG-Richtung. Der Gesamtbereich wird durch die rot markierte Linie in den oberen und unteren Bereich unterteilt.

Elektrische Leitfähigkeit und elektrischer Widerstand

Abbildung 4 stellt die Messergebnisse der Leitfähigkeit und des Widerstands in vier Diagrammen dar, in denen die Bauteile im Normalzustand nach dem Fertigungsprozess mit einem zusätzlich spannungsarmgeglühten Zustand verglichen werden. Die Werte für die Leitfähigkeit liegen im as-built-Zustand (Normalzustand) teilweise unter den Literaturwerten für AlSi10Mg. Aufgrund der Verringerung des Bauwinkels und der damit verbundenen Entstehung von Poren wird die Leitfähigkeit entsprechend herabgesetzt, was gleichbedeutend mit einem steigenden Widerstand ist. Des Weiteren beeinflussen siliziumreiche Aluminium-Korngrenzen die Leitfähigkeit. Elektronen sind einem höheren Widerstand beim Passieren von Bereichen mit erhöhtem Siliziumgehalt ausgesetzt, da Silizium eine geringere Leitfähigkeit als Aluminium besitzt. Die Korngrenzen bilden sich dabei entlang der Aufbaurichtung z und stellen ein Hindernis für Elektronen bei horizontal gebauten Leiterbahnen dar. In senkrecht aufgebauten Strukturen hingegen liegen die Korngrenzen in Richtung der Leiterbahn-Längsachse, wodurch der Stromfluss weniger behindert wird. [12] Für beide Leitfähigkeitsmessungen liegen die Werte im as-built-Zustand erst ab einem Aufbauwinkel von $\alpha = 40^\circ$ im Bereich der Literaturangaben. Senkrecht aufgebaute Leiterbahnen weisen die höchsten Werte mit 22.7 MS/cm (Loresta) bzw. 21.3 MS/cm (Sigmascope) auf. Den niedrigsten Wert von 16.1 MS/cm (Sigmascope) bzw. 16.3 MS/cm (Loresta) weisen die 10° -Strukturen sowohl in SG-Richtung, als auch in B-Richtung auf und liegen somit knapp 25 % unterhalb des Wertes für die senkrecht aufgebauten Balken. Zwischen einem Bauwinkel α von 10° und 90° steigen die Werte gleichmäßig an.

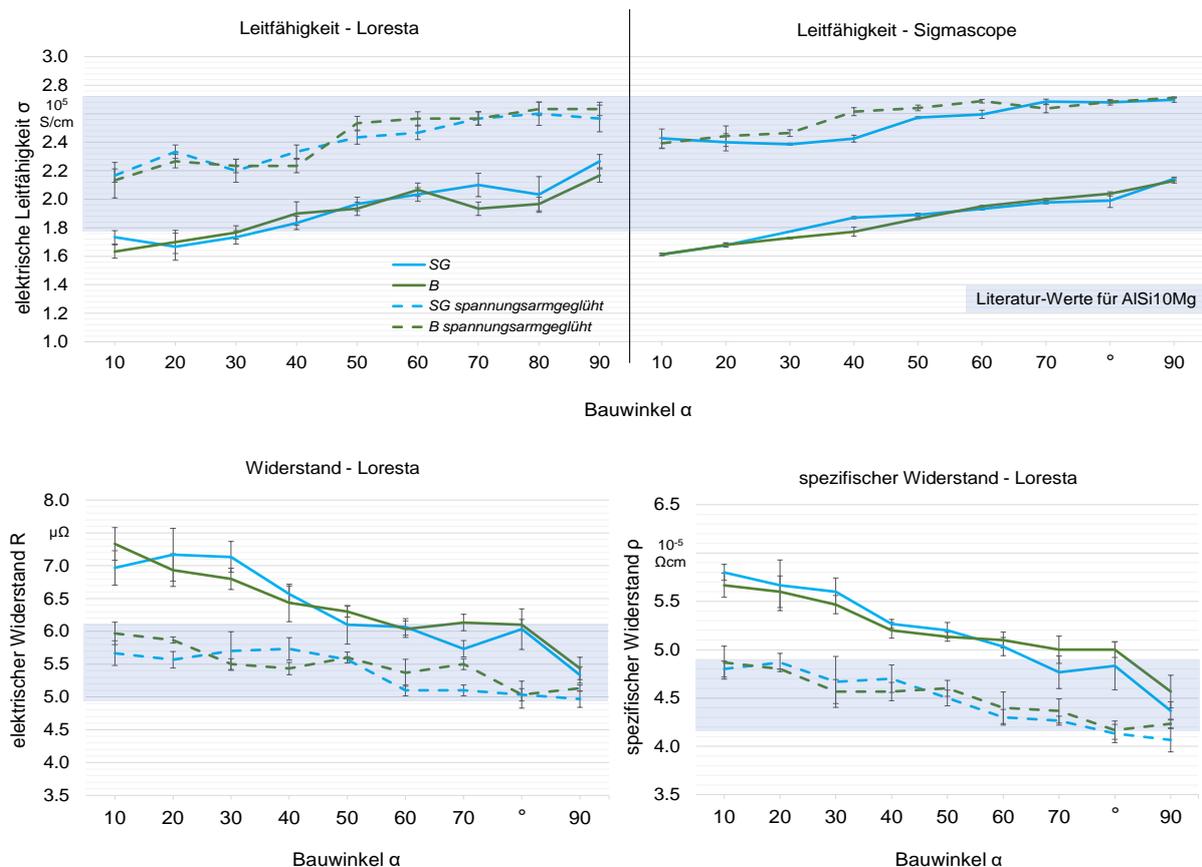


Abbildung 4: Leitfähigkeit, Widerstand und spezifischer Widerstand der Balkenstrukturen in SG- und B-Richtung, jeweils im Normalzustand und spannungsarmgeglühten Zustand bei 300 °C für zwei Stunden.

Die Ergebnisse für die spannungsarmgeglühten Balken liegen allesamt im blau markierten Bereich und damit im Bereich der Literaturwerte. Durch das Spannungsarmglühen wird eine Gefügeänderung verursacht. [13] Dabei findet keine ersichtliche Veränderung der Poren statt, da die Temperatur von 300 °C hierfür zu gering ist. Das Gefüge homogenisiert sich jedoch, indem sich die Aluminium-Matrix entmischt (Verarmung an Legierungselementen, hier Silizium) und Grenzflächen im Gefüge teilweise abgebaut werden, wodurch eine höhere Leitfähigkeit resultieren kann. [14] Die Unterschiede zwischen höchstem und niedrigstem Messwert für die Leitfähigkeit liegen für den Normalzustand bei circa 30 % (Loresta) bzw. bei 25 % (Sigmascope) zwischen einem Bauwinkel α von 10° bis 90°. Für den spannungsarmgeglühten Zustand fällt der Unterschied mit 20 % (Loresta) bzw. 11 % (Sigmascope) niedriger aus. Gleiches gilt für die Widerstände.

Zusammenfassung und Ausblick

Insbesondere senkrecht aufgebaute AlSi10Mg-Leiterbahnen weisen eine hohe Dichte, Maßgenauigkeit und elektrische Leitfähigkeit auf. Je kleiner der Winkel zwischen Leiterbahn und Bauplatte wird, desto stärker wird die Qualität der Strukturen in negativer Weise beeinflusst. Eine nicht ausreichende Wärmeabfuhr in den Downskin-Schichten erzeugt ein unkontrolliertes Schmelzbad, wodurch es zu Ansinterungen und in manchen Fällen zu fehlendem Material an der Leiterbahnunterseite kommt. Zusätzlich entstehen Poren, die sich vor allem im unteren Bereich der Leiterbahn konzentrieren und den effektiven Querschnitt reduzieren. Aufgrund von Poren und Fehlstellen im Material sinkt die elektrische Leitfähigkeit erheblich. Außerdem behindern senkrecht verlaufende, siliziumreiche Korngrenzen den Stromfluss in waagrecht gefertigte Leiterbahnen. Für senkrechte Strukturen verlaufen diese Korngrenzen parallel zur Längsachse der Leiterbahn und Elektronen können durch eine durchgängige Aluminiummatrix fließen. Allerdings können durch eine Wärmebehandlung mittels Spannungsarmglühen Korngrenzen teilweise aufgelöst und das Gefüge homogenisiert werden, wodurch die elektrische Leitfähigkeit auch für horizontale Leiterbahnen steigt. Leiterbahnen sollten demnach möglichst senkrecht gebaut werden, wobei Winkel über 40° im tolerierbaren Bereich liegen.

Um eine Steigerung der Qualität von Leiterbahnen und eine freie geometrische Gestaltung ermöglichen zu können, sollten die allgemeinen Prozessparameter (z. B. Laserparameter und Scanstrategie) und der Downskin-Prozessparameter optimiert werden. Zusätzlich erscheint es sinnvoll eine Untersuchung der Wärmeabfuhr(-mechanismen) durch Rohrstrukturen bzw. Vollmaterial in unmittelbarer Leiterbahnnähe durchzuführen.

Durch den stabilen und maßgenauen Aufbau von filigranen Leiterbahnen können Strukturen kompakter gebaut werden. In einem Multimaterial-System ist ein Design von Bauteilen mit integrierten Leiterbahnen denkbar, sofern Support-Strukturen aus einem nichtleitenden Material, oder einem Material, welches im Anschluss durch Ätzen oder chemisches Auflösen entfernt werden kann, bestehen. Zusammen mit einem automatisierten Einlegemechanismus für Sensoren und anschließendem Ankontaktieren der Leiterbahnen können so Smart Parts in einem Prozess additiv gefertigt werden.

Literatur

Bücher

- [1] Gebhardt, Andreas, 3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), Carl Hanser Verlag, München, 2016.
- [2] Richard, Hans Albert, Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2017.

Zeitschriften

- [4] Hossain, Mohammad Shojib, "Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology", The University of Texas at El Paso, 2016.
- [5] Binder, Maximilian, "Procedure and Validation of the Implementation of Automated Sensor Integration Kinematics in an LPBF System", Procedia CIRP, 2020.
- [12] Silbernagel, Cassidy, "Electrical resistivity of additively manufactured AlSi10Mg for use in electric motors", Additive Manufacturing, 2018.
- [13] Kleiner, Simon, "Heat Treatment Response of Selectively Laser Melted AlSi10Mg", HTM Journal of Heat Treatment and Materials, 2020.
- [14] Tönjes, Anastasiya, "Empirische Methode zur schnellen Charakterisierung von Wärmebehandlungszuständen hochfester Aluminiumlegierungen", Universität Bremen, 2019.

Internet

- [3] Siemens, "Additive Manufacturing: Siemens nutzt innovative Technologie in der Fertigung von Gasturbinen," 2018. [Online]. Verfügbar: <https://press.siemens.com/global/de/feature/additivemanufacturing-siemens-nutzt-innovative-technologie-der-fertigung-von-gasturbinen>
- [6] QATM, "Präparationsmethoden für die materialographische Analyse - Aluminiumlegierungen," 2022. [Online]. Verfügbar: www.qatm.de/de/applikationen/praeparationsmethoden/
- [7] Olympus, "Moderne Mikroskopie leicht gemacht," 2022. [Online]. Verfügbar: <https://www.olympus-ims.com/de/microscope/bx53m/>
- [8] SLM Solutions, "Single Laser Additive Manufacturing Prototyping Machine," 2022. [Online]. Verfügbar: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/slm-125/>
- [9] SLM Solutions, "Material Data Sheet Al-Alloy AlSi10Mg," 2022. [Online]. Verfügbar: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>
- [10] NH Instruments, "NH INSTRUMENTS: 2- und 4-Punkt Messung," 2022. [Online]. Verfügbar: <https://www.nh-instruments.de/2-und-4-punkt-messung/>
- [11] Helmut Fischer GmbH, "Leitfähigkeit von Kupfer messen - SIGMASCOPE SMP350," 2022. [Online]. Verfügbar: <https://www.helmut-fischer.com/de/produkte/sigmascope-smp350>

Kontaktangaben

Thomas Bareth, M. Sc.
Fraunhofer IGCV
Am Technologiezentrum 10
86159 Augsburg
E-Mail: thomas.bareth@igcv.fraunhofer.de
WEB: www.igcv.fraunhofer.de