

Einfluss der Abkühlrate auf das Korngefüge von Bauteilen aus austenitischem Edelstahl, hergestellt durch pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (LPBF)

**Johannes Diller M.Sc.¹, Dr.-Ing. Christina Radlbeck¹
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (NDS) Martin Mensinger¹**

¹ *Lehrstuhl für Metallbau, Arcisstr. 21, Technische Universität München, Deutschland
E-Mail: johannes.diller@tum.de*

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird der Einfluss der Abkühlrate auf das Korngefüge von additiv gefertigten Bauteilen aus 316L (1.4404) untersucht. Zu diesem Zweck wurden Zugproben mit unterschiedlicher Probengeometrie per pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen hergestellt. Die Abkühlrate wurde durch In-Situ Thermographie erfasst. Anschließend wurden Zugversuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Das Gefüge wurde mittels REM und EBSD untersucht. Dabei konnte eine sehr feine Struktur als Resultat des Herstellprozesses beobachtet werden, was zur Erhöhung der Dehngrenze und Zugfestigkeit im Vergleich zu den normierten Werten aus der DIN EN 10088-3 geführt hat. Dieser Bericht ist als Fortführung von (J. Diller, 2019) zu betrachten.

1 Allgemeines

Die additive Fertigung wird bisher nur für Bauteile verwendet, die nicht sicherheitsrelevant sind. Dies ist hauptsächlich auf die unzuverlässige Reproduzierbarkeit von mechanischen Eigenschaften zurückzuführen. Der Schlüsselparameter hierbei ist die Abkühlrate während des Druckens. Diese ist maßgeblich für den Aufbau des Gefüges. Der Wärmeleitkoeffizient der Schmelze ist zehn Mal größer als der des Pulvers. Folglich ist die Wärmeleitung in das nicht aufzuschmelzende Pulver vernachlässigbar und findet hauptsächlich in der Schmelze Richtung Bauplattform statt. (Meiners, 1999) Die Veränderung der Laserparameter beeinflusst die Wärmeleitung (Energieaufnahme) und resultiert in unterschiedlichen Temperaturgradienten und Abkühlraten. Wenn die Fläche größer ist, erwärmt sich diese langsamer, als kleine Flächen, was auf die Wärmeleitung nach Fourier zurückzuführen ist. (Meiners, 1999) Da der Laserstrahl jedoch gepulst einzelne Punkte hintereinander aufschmilzt, entsteht eine lokale Erwärmung. Ist folglich die Wärme in das bereits aufgeschmolzene Material durch Absorption des Laserstrahls eingeführt worden, entsteht bei einer größeren Fläche dennoch ein größerer Wärmestrom und damit auch eine größere Abkühlrate. (Meiners, 1999) (Bugeda, 1999)

2 Parameterstudie

2.1 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden mit einer EOS M270 mit einem 200W Yb:YAG-Laser hergestellt. Der untersuchte Baujob besteht aus insgesamt acht Probekörpern, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. Die Proben wurden liegend gedruckt und im sogenannten „As-built“-Zustand, d.h. ohne nachfolgende (Wärme-)Behandlung geprüft. Die Schichtdicke betrug 20 µm. Der Baujob bestand aus zwei mal drei unterschiedlich großen Probengeometrien nach DIN EN 50125 mit einer

Querschnittsfläche von 12, 24 und 50 mm² und zwei Würfeln (004 und 008) mit Abmessungen von 10x10x10mm für die Untersuchung des Gefüges.

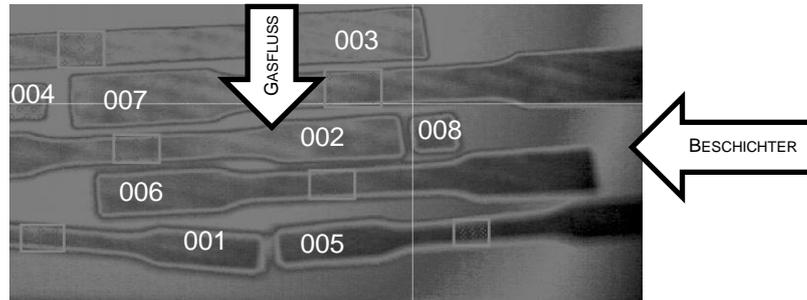


Abbildung 1: Probekörper und Lage auf der Bauplattform mit markierten Messpunkten zur Auswertung der Thermographiedaten (J. Diller, 2019)

2.2 Thermographische und mechanische Auswertung

Bei der Analyse der Thermographiedaten wurden die höchsten Abkühlraten jeder Schicht ausgewertet. Abbildung 1 zeigt die Messpunkte zur Auswertung der Thermographiedaten (siehe auch (J. Diller, 2019)):

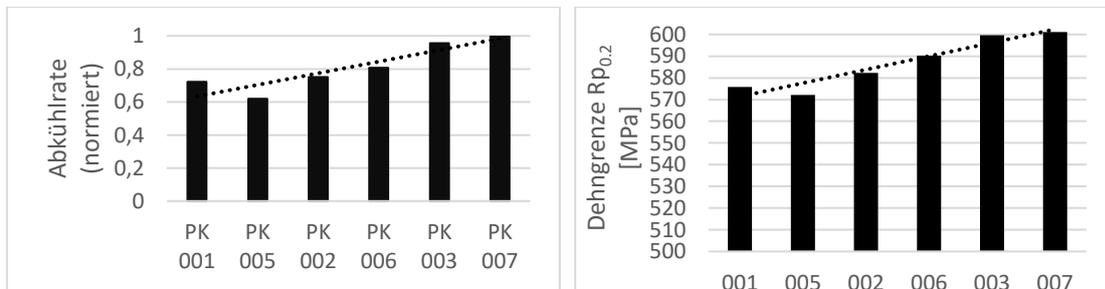


Abbildung 2: Abkühlrate (links) und Dehngrenze (rechts) der Probekörper (J. Diller, 2019)

Die Abkühlrate nimmt in der Gesamtbetrachtung mit größer werdender Probengeometrie zu. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Scangeschwindigkeit und daraus resultierend die Energiedichte einen Einfluss auf die Abkühlrate haben. Die Mittelwerte der Abkühlraten eines Probekörpers verhalten sich proportional zur Probengröße. Entsprechend steigt die Abkühlrate mit zunehmender aufzuschmelzender Fläche und somit der dem Wärmetransport zur Verfügung stehenden Querschnitt an. Die mechanischen Eigenschaften verhalten sich folglich ebenfalls proportional zur Abkühlrate.

2.3 Einfluss des Gefüges auf die mechanischen Eigenschaften

Abbildung 2 zeigt, dass mit zunehmender Probengröße auch die Dehngrenze ansteigt. Es ist ein maximaler Unterschied von 29 MPa vorhanden. Die Proben wurden jeweils mit 750 mm/s und 1000 mm/s Scangeschwindigkeit gefertigt, wodurch sich eine Veränderung der Energiedichte ergibt. Dies ist in den Werten der ermittelten mechanischen Festigkeiten ebenfalls deutlich

erkennbar. So hat beispielsweise PK001 eine geringere Zugfestigkeit als PK005, wie auch an der Abkühlrate zu sehen ist.

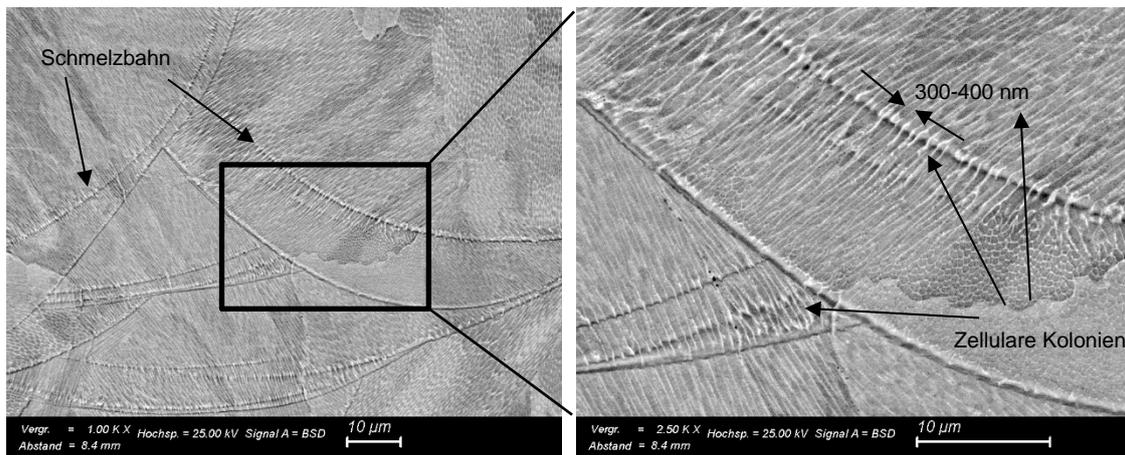


Abbildung 3: Geätzte Probe PK004 (V2A-Beize), links 1000-fache Vergrößerung, rechts 2500-fache Vergrößerung, Zellulare Strukturen mit 300 - 400 nm

In Abbildung 3 ist zu sehen, dass Wachstum von sehr feinen, nadelförmigen Strukturen über die Korngrenzen hinaus stattgefunden hat. Diese Lamellen haben eine Breite von 400 – 600 nm. Konventionell hergestelltes 316L besitzt deutlich größere Strukturen. (Gümpel P., 1989) Die dunkleren Grenzen der Schmelzbahnen sind wahrscheinlich auf Mikroseigerungen zurückzuführen. Des Weiteren ist die Orientierungsrichtung der zellulären Strukturen teilweise 90° zueinander gerichtet. Dies ist durch die Belichtungsstrategie erklärbar. In Abbildung 4 auf dem linken Bild ist zudem zu erkennen, dass das Kornwachstum über die Schweißgrenzen hinaus geht. Einige Kolonien haben eine Länge von bis zu 200 µm. Eine Schweißlinse hat eine maximale Höhe von 50 µm. Aus den Messungen der Elektronenrückbestreuung (EBSD) wird deutlich, dass der Lasereintrag von oben zu starker Anisotropie führt, da das Gefüge PK 008 zum Großteil in eine Richtung orientiert ist.

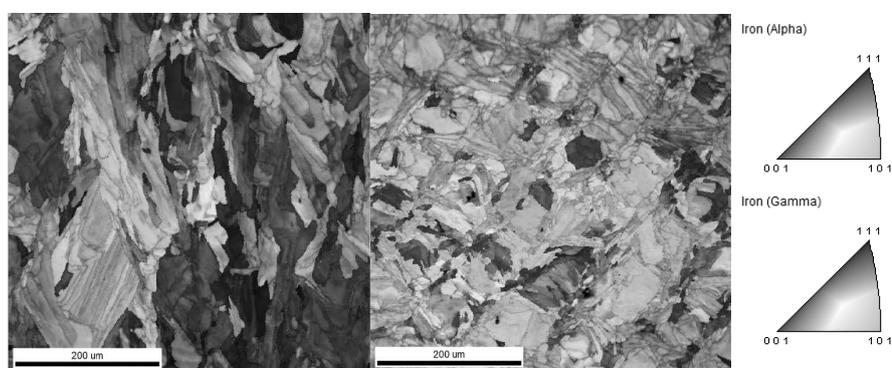


Abbildung 4: EBSD Messung zeigt starke Anisotropie und Kornwachstum über Schmelzbahn hinaus, PK 004 (li, Seitenansicht) und PK 008 (re, Draufsicht)

Weitere EBSD Messungen zeigen außerdem, dass kein δ -Ferrit vorhanden ist. Das Material besteht ausschließlich aus γ -Eisen, also Austenit. Dies bedeutet, dass die Nano-Lamellen γ -

Lamellen/Nadeln sind. Da keine Dendriten zu erkennen sind, wird von einem starken Ungleichgewicht des Gefüges ausgegangen.

3 Fazit

Während des Abkühlprozesses entstehen sehr feine, zelluläre Nano-Lamellen, welche über die Korngrenzen des Schmelzbades hinauswachsen. Feinkörniges Gefüge ist dafür bekannt, dass es die Versetzungsbewegung der Atome stark verhindert. Dementsprechend muss eine höhere Kraft aufgebracht werden, um eine initiale Bewegung der Atome zu erzielen. δ -Ferrit erhöht die Dehngrenze und den Widerstand gegen Spannungsrisskorrosion. (Wegrzyn, 1992) Es konnte jedoch kein δ -Ferrit festgestellt werden. Das feine Gefüge scheint folglich für die Erhöhung der Dehngrenze verantwortlich zu sein. Der Unterschied der Festigkeit zwischen den Probengeometrien ist dementsprechend auf unterschiedlich feines Korngefüge zurückzuführen. Grundsätzlich ist zu folgern, dass die Probengeometrie einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und das Gefüge von additiv gefertigten Bauteilen hat. So kann bei sehr feinen, dünnwandigen Strukturen von einer niedrigeren Festigkeit ausgegangen werden. Bei dickwandigeren Bereichen ist die Festigkeit jedoch höher. Die Bruchdehnung ändert sich hingegen nicht, sondern bleibt konstant. Um die additive Fertigung in das Bauwesen und andere Branchen für sicherheitsrelevante Bauteile einzuführen ist es notwendig, reproduzierbare mechanische Eigenschaften gewährleisten zu können. Weitere Untersuchungen sind daher erforderlich und bereits geplant.

4 Ausblick

Laserparameter sind bisher nur Material- und Maschinenabhängig und werden ohne Berücksichtigung der Geometrie des aufzuschmelzenden Bereichs gewählt. Es ist jedoch unerlässlich den Zusammenhang und mögliche Abhängigkeiten zwischen Fertigungsprozess und Bauteilgeometrie zu erforschen. Zudem ist die Anisotropie aufgrund von unterschiedlichen Aufbaurichtungen in Bezug auf die Abkühlrate zu untersuchen, da diese – wie oben gezeigt - die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Des Weiteren basieren die Ergebnisse in diesem Beitrag lediglich auf statischen Versuchen. Um den Einfluss der Abkühlrate weiter zu untersuchen, sollten auch dynamische und multiaxiale, statische Versuche durchgeführt werden.

5 Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 414265976 – TRR 277

6 Literaturverzeichnis

Bugeda. (1999), "Numerical prediction of temperature and density distributions in selective laser melting processes" Catalunya: *Rapitd Prototyping Journal*.

Gümpel P., A. N. (1989). "Nichtrostende Stähle" Düsseldorf: *Stahleisen mbH*.

J. Diller, U. A. (2019), "Einfluss der Abkühlrate auf mechanische Eigenschaften von Zugproben aus 316L, hergestellt durch pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (LPBF)" *Münchner Stahlbautage 2019*. München.

Meiners, W. (1999) "Direktes Selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe" Aachen: *Shaker*.

Wegrzyn, T, (1992), "Delta ferrite in stainless steel weld metals" *Welding International*, 9(6), 690-694.