

Aktive Laserthermografie im L-PBF-Prozess zur in-situ Detektion von Defekten

Philipp Peter BREESE¹, Tina BECKER¹, Simon OSTER¹, Simon J. ALTENBURG¹,
Christian METZ², Christiane MAIERHOFER¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Deutschland

² THETASCAN GmbH, Thyssenstraße 183a, 46535 Dinslaken, Deutschland

Kontakt E-Mail: philipp-peter.breese@bam.de

Kurzfassung. Die zerstörungsfreie Prüfung von metallischen Bauteilen hergestellt mit additiver Fertigung (Additive Manufacturing - AM) gewinnt zunehmend an industrieller Bedeutung. Grund dafür ist die Feststellung von Qualität, Reproduzierbarkeit und damit auch Sicherheit für Bauteile, die mittels AM gefertigt wurden. Jedoch wird noch immer ex-situ geprüft, wobei Defekte (z.B. Poren, Risse etc.) erst nach Prozessabschluss entdeckt werden. Übersteigen Anzahl und/oder Abmessung die vorgegebenen Grenzwerte für diese Defekte, so kommt es zu Ausschuss, was angesichts sehr langer Bauprozessdauern äußerst unrentabel ist. Eine Schwierigkeit ist dabei, dass manche Defekte sich erst zeitverzögert zum eigentlichen Materialauftrag bilden, z.B. durch thermische Spannungen oder Schmelzbadaktivitäten. Dementsprechend sind reine Monitoringansätze zur Detektion ggf. nicht ausreichend.

Daher wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur aktiven Thermografie an dem AM-Prozess *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF) untersucht. Das Bauteil wird mit Hilfe des defokussierten Prozesslasers bei geringer Laserleistung zwischen den einzelnen gefertigten Lagen unabhängig vom eigentlichen Bauprozess erwärmt. Die entstehende Wärmesignatur wird ort- und zeitaufgelöst durch eine Infrarotkamera erfasst. Durch diese der Lagenfertigung nachgelagerte Prüfung werden auch zum Bauprozess zeitversetzte Defektbildungen nachweisbar.

In dieser Arbeit finden die Untersuchungen als Proof-of-Concept, losgelöst vom AM-Prozess, an einem typischen metallischen Testkörper statt. Dieser besitzt eine Nut als oberflächlichen Defekt. Die durchgeführten Messungen finden an einer eigens entwickelten L-PBF-Forschungsanlage innerhalb der Prozesskammer statt. Damit wird ein neuartiger Ansatz zur aktiven Thermografie für L-PBF erforscht, der eine größere Bandbreite an Defektarten auffindbar macht. Der Ansatz wird validiert und Genauigkeit sowie Auflösungsvermögen geprüft. Eine Anwendung am AM-Prozess wird damit direkt forciert und die dafür benötigten Zusammenhänge werden präsentiert.

1. Einführung und Problemstellung

Mit der additiven Fertigung (*Additive Manufacturing - AM*; auch als *3D-Druck* bezeichnet) werden einzelne Schichten in 2,5- oder 3D aufgetragen, um Bauteile zu fertigen. Vorteile gegenüber klassischen metallbasierten Fertigungsverfahren sind bspw. die hohe Freiheit im Design und die Verwendungsmöglichkeit von innovativen Materialien. Jedoch ist das Auftreten von Unregelmäßigkeiten und Defekten nicht auszuschließen - auch bedingt durch die Komplexität des Verfahrens. Diese können im Allgemeinen bspw. Oxidation [1], Porosität [2], mechanische Verzüge [3] oder Fehler in der Anbindung [4] umfassen. Deshalb ist die Sicherung von Reproduzierbarkeit und Qualität essenziell. Dementsprechend nimmt die zerstörungsfreie Prüfung eine wichtige Rolle für AM mit Metallen ein.

Dennoch finden in der praktischen Anwendung Prüfvorgänge häufig *ex-situ*, also nachgelagert zum Bauprozess, mit klassischen Methoden wie bspw. Computertomografie oder Metallografie [5] statt, womit Defekte und Ausschuss erst im Nachhinein erkannt werden. Das ist speziell für AM-Prozesse unvorteilhaft, u.a. wegen der langen Dauer des Bauprozesses (einige Stunden bis zu mehreren Tagen) und evtl. kostenintensiven Ausgangsstoffen, wie Pulver spezifischer Materialien. Ausschuss ist dementsprechend besonders kritisch. Als geeignete Gegenmaßnahme werden *in-situ* Monitoringmethoden genutzt, die sich größtenteils auf die Charakteristika des Schmelzprozesses während des Aufbaus konzentrieren, wie geometrische Parameter des Schmelzbades [6] oder direkte optische [5] oder bspw. akustische [7] Emissionen. Jedoch werden dabei Effekte, die nach dem Auftrag stattfinden, wie thermische Verzüge durch Spannungen [8] oder Schmelzbadaktivitäten [9], nicht direkt berücksichtigt. Aus diesem Grund wird innerhalb dieser Arbeit der Weg zu einem neuartigen Ansatz erläutert: die Prüfung der jeweiligen erstarrten Bauteilschicht nach ihrer Fertigstellung im AM-Prozess Laser Powder Bed Fusion (L-PBF oder LPBF) mit aktiver Laserthermografie. Als Energiequelle wird dafür der defokussierte Fertigungslaser bei geringer Leistung verwendet und die damit entstehende thermografische Signatur auf Abweichungen aufgrund von Unregelmäßigkeiten im oberflächennahen Bereich untersucht. Dabei ist zusätzlich eine Kombination mit der Anwendung von optischer Tomografie (OT) während der Schichtfertigung [5] angedacht, um zukünftig ggf. eine laserthermografische Prüfung auf in der OT besonders auffällige Bereiche einzuschränken und so die Prüfzeit zu minimieren. Auf diesem Wege wird der reale Status des gefertigten Bauteils optimiert festgestellt. Die Untersuchungen dafür finden im Rahmen des ZIM-Förderprojektes *ATLAMP* in einer Zusammenarbeit von BAM und der THETASCAN GmbH statt. Um eine optimale Kontrolle über Abläufe und Zugänglichkeit bei voller Übersicht über Prozess und Daten zu garantieren, befindet sich aktuell eine eigens entwickelte L-PBF Forschungsmaschine im Aufbau unter dem Namen „**S**ensor-based **A**dditive **M**anufacturing **M**achine“, kurz *SAMMIE*. Im Folgenden wird ein Überblick über diese gegeben, mitsamt eines grundlegenden Vorversuches zur Nutzung von aktiver Laserthermografie mit dem Fertigungslaser innerhalb dieser L-PBF-Maschine. Dafür wird als Proof-of-Concept ein metallischer Probekörper mit erodierter Nut als bekanntem Defekt thermografisch innerhalb der Prozesskammer qualitativ untersucht.

2. Aktueller Stand der Technik

Die Ursachen und Vorgänge für die Entstehung von Defekten innerhalb des L-PBF Prozesses sind mannigfaltig. Einige der Hauptarten von Defekten sind Risse, Anbindungsfehler (Lack of Fusion) und Poren, und ihr Auftreten ist direkt mit Material- und Prozessparametern korreliert. Risse entstehen bei additiver Fertigung als Hochtemperaturanwendung, wenn auftretende thermische Verzüge nicht durch die elastische oder plastische Deformation des Materials ausgeglichen werden können.[10] Die lokalen thermischen Gradienten spielen dabei eine entscheidende Rolle und die Größenausprägung der Risse kann stark variieren. Anbindungsfehler können zwischen einzelnen aufgetragenen Bahnen (Hatches) oder Lagen entstehen, wobei bspw. eine erhöhte Energieeinbringung durch gesteigerte Laserleistung oder geringere Vorschubgeschwindigkeiten des Laserspots (Scanning Speed) eine Strategie zur Vermeidung darstellt.[11] Jedoch werden damit potenziell thermische Spannungen sowie die Prozessdauer erhöht. Als weitere mögliche Defektart können Poren innerhalb des metallischen Materials auftreten, die zu einer gesteigerten Porosität des gefertigten Bauteils führen. Mögliche Ursachen sind dabei Gase der umgebenden Schutzgasatmosphäre und -strömung, die während der Erstarrung der metallischen Schmelze eingeschlossen werden [2] oder die Bildung von sogenannten Keyhole-Poren. Letztere bilden sich bei sehr hohem Energieeintrag durch den Laser, sodass es zur Verdampfung des Metalls kommt und Poren unterhalb des Schmelzbades nach der Verfestigung bestehen bleiben.[12] Diese aufgeführten Beispiele für mögliche Defekte während des L-PBF Prozesses zeigen deutlich, dass sie Integrität und Homogenität des gefertigten Bauteils kompromittieren. Dies wirkt sich negativ auf dessen Eigenschaften (z.B. Festigkeit) aus und ist dabei auf Grund einer gestörten Wärmeleitung mittels aktiver Thermografie nachweisbar.[13] Das Ziel des Forschungsgebiets der aktiven Laserthermografie ist es in diesem Zusammenhang, dieser Herausforderung im laufenden AM-Prozess zu begegnen.

Dabei wird mit Hilfe eines Lasers aktiv Energie in den zu prüfenden Probekörper eingebracht, wodurch sich dessen Temperatur zeitlich verändert und thermografische Prüfmethode ermöglicht werden. Verglichen mit anderen Arten der Energieeinbringung (Blitz, Halogenlampe) sind auch Defekte mit Behinderung der Wärmeleitung parallel zur Oberfläche nachweisbar.[13] Verschiedene Ansätze für die konkrete Laseranwendung sind verbreitet, bspw. die Flying Spot Methode. Dabei wandert ein Laserspot über die Oberfläche des Probekörpers mit konstanter Geschwindigkeit und Leistung in einem vorher definierten Pattern.[14] Typische Parameter für einen erfolgreichen Prüfvorgang sind bekannt [15] und Defektkontraste können durch Algorithmen zur nachgelagerten Analyse erhöht werden (bspw. mit räumlichen Ableitungen und Sortierungen [16] oder Kantenerkennungen auf Basis eines Canny-Algorithmus [14]). Eine tiefgehende Nutzung der Flying Spot Methode mit dem Fertigungslaser für eine lagenweise AM-Bauteilprüfung basierend auf aktiver Thermografie fand bisher noch nicht statt. Zwar wurden bereits gesamte Lagen thermografisch betrachtet, was aber nur passiv mit der Restwärme des Prozesses stattfand.[17] Herzer et al. [18] betrachteten kürzlich aktive in-situ Laserthermografie für den L-PBF-Prozess und identifizierten dessen Durchführbarkeit erfolgreich. Dabei wurde allerdings mit fokussiertem Fertigungslaser gearbeitet, womit ein großer lokaler Energieeintrag stattfand, dessen Auswirkungen noch zu klären sind. Aktuell sind somit lediglich die Grundlagen für eine erfolgreiche Nutzung und das vielversprechende Potenzial gelegt.

3. Versuchsaufbau

Im Folgenden wird ein Überblick über die aufgebaute Anlage für den L-PBF Prozess mit ihren Subkomponenten gegeben. Des Weiteren wird die verwendete thermografische Infrarotkamera sowie der untersuchte Probekörper beschrieben.

3.1. Übersicht der verwendeten Anlage

Die nach Eigenentwicklung aufgebaute L-PBF-Anlage *SAMMIE* besteht aus mehreren modularen Subkomponenten. Diese lassen sich in Laserquelle samt Strahlengang, Scanner-Einheit, Prozesskammer und Steuerung unterteilen (Abbildung 1). Darüber hinaus verfügt die Anlage über vier optische Zugänge, in die in-situ Messtechniken wie Infrarotkameras, Kameras für OT, Hochgeschwindigkeitskameras im sichtbaren Spektralbereich usw. integriert werden können. Diese *off-axis* Zugänge können außerdem mit Spiegelsystemen und/oder Strahlteilern erweitert werden.

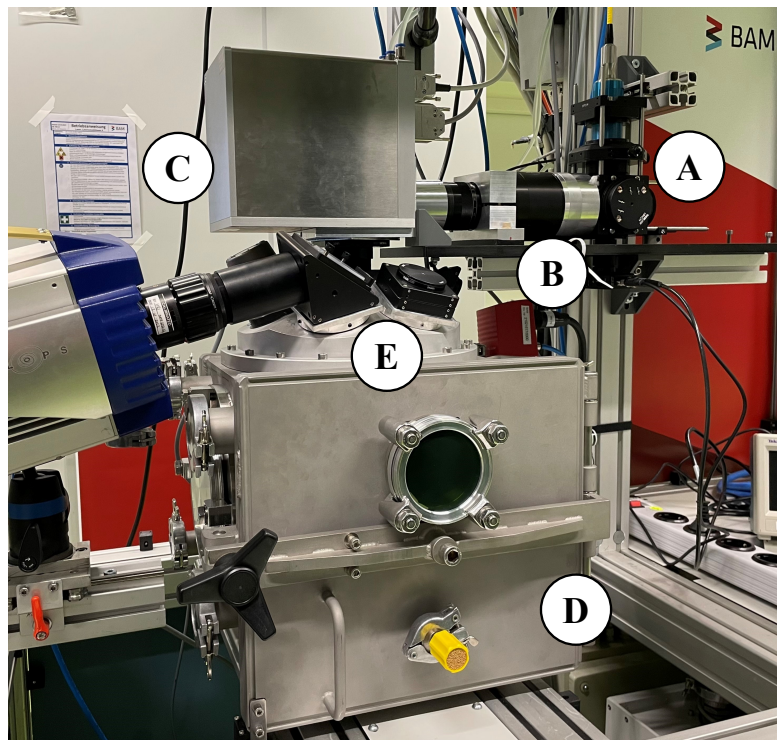


Abb. 1: Übersicht über die aufgebaute AM-Anlage *SAMMIE* mit ihren Subkomponenten Strahlengang (A), Scanner-Einheit für Fokussierung (B) und Umlenkung (C) sowie Prozesskammer (D) samt optischen Zugängen (E).

Als Laserquelle wird ein Ytterbium Faserlaser von IPG Photonics mit einer Wellenlänge von 1070 nm und einer maximalen nominellen Leistung von 500 W genutzt. Innerhalb des Strahlengangs bietet sich die Möglichkeit der Installation von weiterer Messtechnik (ebenfalls mit Hilfe von Spiegeln und/oder Strahlteilern) zusätzlich zur genannten *off-axis* Variante. Damit lässt sich u.a. detailliert und ortsfest das Schmelzbad während des AM-Prozesses beobachten. Auch eine Anwendung in der Flying Spot Thermografie wäre denkbar, wovon aber zu diesem Zeitpunkt noch kein Gebrauch gemacht wird.

Der kollimierte Strahl wird von der Scanner-Einheit (SCANLAB GmbH) mit Hilfe des integrierten bewegbaren Spiegelsystems fortlaufend so umgelenkt, dass die

gewünschten Scanstrategien und -muster realisiert werden. Damit sind maximale Vorschubgeschwindigkeiten in der Größenordnung von etwa 10 m/s möglich. Des Weiteren umfasst die Scanner-Einheit ein Linsensystem innerhalb des Strahlengangs, um eine konstante Fokussierung des Lasers in der Bauebene zu erzielen. Es ermöglicht außerdem eine Defokussierung und damit eine Vergrößerung des Spotdurchmessers des Laserstrahls, um die Energie pro Fläche lokal zu verringern und damit eine zerstörungsfreie Anwendung des Fertigungslasers in der Prüfung mit Laserthermografie zu gewährleisten.

Abschließend wird der so manipulierte Strahl in die Prozesskammer geleitet, welche die erwähnte Vielzahl an optischen *off-axis* Zugängen besitzt. Die Prozesskammer beinhaltet die Bauplattform, auf der die Komponenten gefertigt werden, samt Einheit für Pulverauftrag und Höhenanpassung nach jeder einzelnen gefertigten Schicht. Ebenfalls ist die Integration einer Einheit zur Vorwärmung angedacht. Die Kammer ist außerdem gasdicht, sodass mit einem Pumpensystem und einem Argonzulauf eine inerte Schutzgasatmosphäre während des Bauprozesses und der Prüfung mit Laserthermografie geschaffen werden kann. Zusätzlich ist die Integration einer Schutzgasfilteranlage vorgesehen. Sie dient der Filterung des während der Fertigung entstehenden Schmauchs.

Als übergreifende Subkomponente sei final die Steuerung zu nennen. Laser und Scanner werden gemeinsam mit Hilfe der Software laserDESK von SCANLAB gesteuert. Die weiteren Hardware-Komponenten werden über ein in LabVIEW von National Instruments realisiertes Human Machine Interface (HMI) gesteuert. Kühlkreisläufe für Wasser und Druckluft gewährleisten zudem einen sicheren Betrieb.

3.2. Messtechnik und Probekörper

Für die Aufzeichnung der entstehenden Wärmesignatur während der Laserthermografie wurde eine Infrarotkamera genutzt. Dabei handelte es sich um eine MS M3k der Firma Telops Inc. mit einem empfindlichen Spektralbereich von 1,5 μm bis 5,4 μm und einer Bildauflösung von 320 x 256 Pixeln. Es wurde ein 50 mm Objektiv genutzt und die Anbringung erfolgte direkt an einen der erwähnten optischen Zugänge der Prozesskammer mit Hilfe eines Spiegelsystems (siehe Abbildung 2). Damit ergab sich eine räumliche Auflösung von 250 μm pro Pixel.

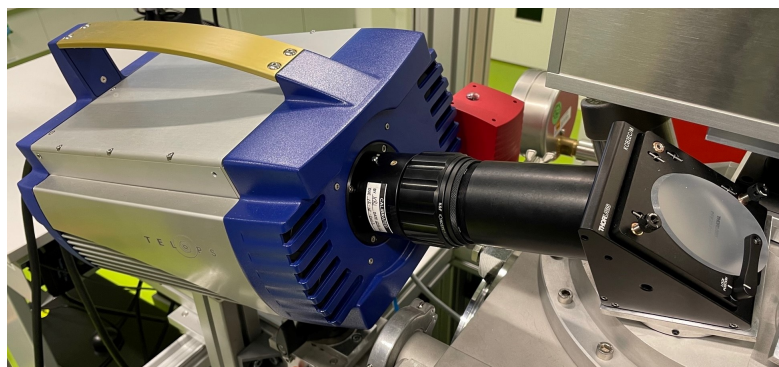
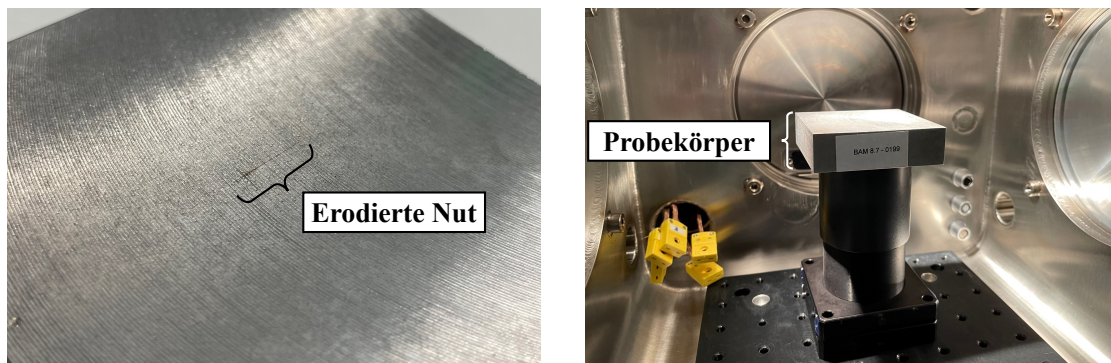


Abb. 2: An die Prozesskammer angebrachte Infrarotkamera Telops MS M3k.

Die Kamera besitzt eine maximale Bildwiederholrate von 3100 Hz im Full Frame Modus. Mit Hilfe einer Reduzierung der Bildgröße (Subwindowing) sind deutlich höhere Bildwiederholraten nutzbar. Ferner gibt es die Möglichkeit für multispektrale

Bildgebung durch ein integriertes rotierendes Filterrada, das mit verschiedenen Bandpassfiltern bestückt ist. Davon wurde in dieser Arbeit jedoch kein Gebrauch gemacht und es wurde lediglich der breitbandige Filter eingesetzt, der eine Nutzung des gesamten empfindlichen Spektralbereichs des Detektors ermöglicht. Ansteuerung und Handling fand mit der Software *Reveal IR* von Telops statt.

Ein Ausschnitt des untersuchten Probekörpers ist in Abbildung 3a gezeigt. Er besteht aus Kaltarbeitsstahl mit der Kennzeichnung 90MnCrV8 (1.2842) und besitzt die Maße 70 mm x 70 mm x 20 mm.



(a) Probekörper mit erodierter Nut.

(b) Position innerhalb der Prozesskammer.

Abb. 3: Untersuchter Probekörper mit künstlichem Defekt.

Als Defekt zur Untersuchung wurde eine erodierte Nut betrachtet, die sich zentral auf dem Probekörper befand und auf Grund ihrer Form einem Riss nachempfunden war. Die Nut weist eine Länge von 10 mm, eine mittlere Breite von etwa 35 μm bis 50 μm und eine sich über ihren Verlauf erhöhende Tiefe mit einem Maximum von etwa 50 μm auf. Damit ist der Defekt mit dem bloßen Auge nur bedingt sichtbar. Die Oberfläche des Probekörpers weist leichte gleichmäßige Riefen auf (wie auch in Abbildung 3a erkennbar) und war frei von Verunreinigungen, Korrosion etc. Für die Untersuchungen befand sich kein Pulverbett in der Prozesskammer und der Probekörper wurde so positioniert, dass sich seine Oberfläche auf Höhe der Bauebene befand (siehe Abbildung 3b).

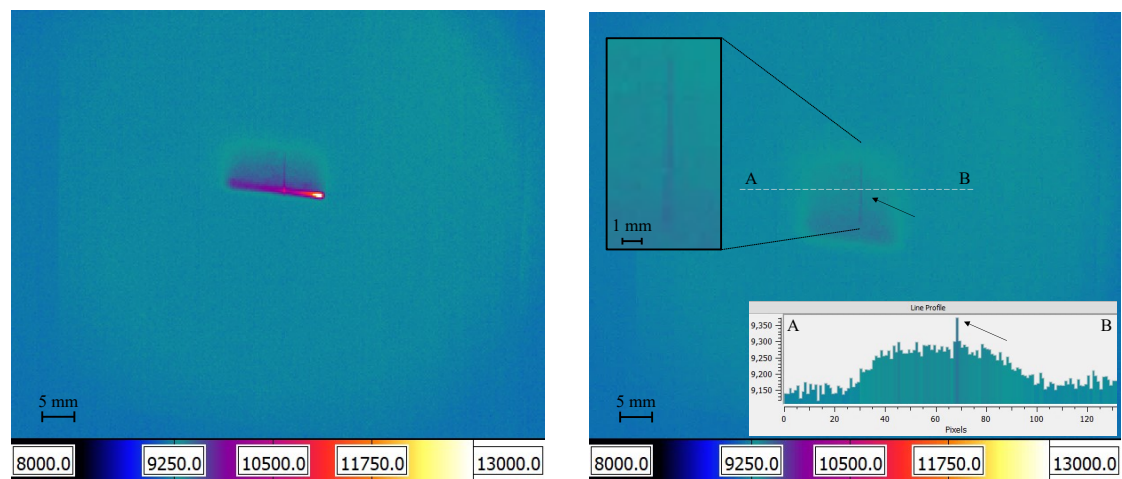
4. Methodik

Für die Durchführung der Laserthermografie zur Sichtbarmachung der Nut als Defekt wurde ein Scanpattern auf der Oberfläche des Probekörpers mit dem defokussierten Fertigungslaser bei verringerter Leistung abgefahren. Der Spotdurchmesser ergab sich dabei zu 1,1 mm mit einer Laserleistung von 110 W. Beide effektiven Parameter wurden mit Messtechnik von Ophir Optronics gemessen. Das genutzte Pattern bestand aus einem Quadrat mit Seitenlängen von 15 mm, wobei die 26 einzelnen Scanvektoren parallel und monodirektional (rechtwinklig kreuzend zur Nut) angeordnet waren. Damit ergab sich ein Hatchabstand von 600 μm = 0,6 mm. Mit dem angegebenen Spotdurchmesser stellte dies in Summe eine ganzflächige Erwärmung dar. Als Vorschubgeschwindigkeit des Lasers wurden 1 m/s = 1000 mm/s genutzt, womit der Scanprozess eine Dauer von 0,3 s aufwies. Damit ergab sich eine Prüfgeschwindigkeit von 7,5 cm^2/s und eine Energie pro Fläche von 14,7 J/cm^2 . Die Infrarotkamera zeichnete mit einer Bildwiederholrate von 1200 Hz bei einer konstanten Belichtungszeit von 50 μs auf. Höhere Raten waren für die gewählten Parameter nicht notwendig. Die erhaltenen Thermogramme innerhalb der Kamerasoftware wurden abschließend zur Beurteilung genutzt, wobei Werte

in Digital Values betrachtet wurden. Der Grund dafür war, dass ohne genaue Informationen zum optischen Weg und den Emissionsgraden der zu prüfenden Oberfläche, keine exakten Aussagen zur realen Temperatur möglich waren. Dies ist aber bei einer Ortung von Defekten mit Laserthermografie auch nicht notwendig. Erst bei Rekonstruktionsrechnungen, z.B. zur Bestimmung von Defekttiefen, sind reale Temperaturen vonnöten.

5. Ergebnisse und Diskussion

Die direkten Ergebnisse aus der Kamerasoftware ohne weitere Nachbearbeitung sind in Abbildung 4 dargestellt. Dabei zeigt Abbildung 4a einen Frame während der aktiven Erwärmung durch den Laser, wobei sehr gut dessen Bahn entlang des Scanvektors (von links nach rechts) auf Grund der eingebrachten Wärme sichtbar ist. Ebenso ist darüber die Restwärme der vorherigen Laserbahnen sowie der sich abzeichnende Defekt mit gesteigertem Kontrast vertikal erkennbar. Abbildung 4b zeigt das Thermogramm nach Abschluss des Scanvorgangs mit dem Laser. Das quadratische Scanpattern ist noch zu erahnen und der Defekt zeigt sich deutlich durch den Kontrast bedingt durch eine erhöhte Temperatur, die sich in gesteigerten Digital Values niederschlägt. Das ist ebenfalls in der Anzeige der einzelnen Werte über die Pixel der eingezeichneten Linie (A-B) erkenntlich. Der Bereich, der vom Laser erwärmt wurde hebt sich ab, wobei der Maximalwert am Ort des Defekts erreicht wird. Der Grund hierfür ist zum einen die erhöhte lokale Energieeinbringung durch den Laser bei Eindringen in einen Defekt während der Überfahrt. Zum anderen hindert ein Defekt den Wärmefluss innerhalb des Probekörpers, sodass es zu einem Wärmestau kommt. Mit Hilfe des letzteren Effekts wären auch verdeckte Defekte bis zu einem gewissen Grad detektierbar.



(a) Während der Erwärmung durch den Laser. Die einzelnen von links nach rechts laufenden Laserbahnen wurden von oben nach unten abgefahren.

(b) Nach der Erwärmung durch den Laser. Die aufgetragenen Werte entlang der Linie A-B zeigen die erhöhten Digital Values mit dem Maximalwert am Ort des Defekts.

Abb. 4: Unkalibrierte Bilder der Infrarotkamera mit Werten in Digital Values.

Trotz seiner geringen Ausmaße in Breite und Tiefe ($< 50 \mu\text{m}$) sowie der begrenzten räumlichen Auflösung der Kamera von $250 \mu\text{m}$ pro Pixel ließ sich der Defekt quasi über seine gesamte Länge von 10 mm im Thermogramm darstellen. Es war kein zusätzliches Equipment vonnöten, das nicht auch in-situ während des AM-Prozesses verfügbar wäre. Des Weiteren waren keine spezifischen Vorkehrungen, Vorbereitungen oder auch

Nachbearbeitungen nötig, um selbst mit der gewählten, relativ hohen Prüfgeschwindigkeit einen ausreichenden Defektkontrast zu erzielen. Ferner reichte eine einfache Defokussierung des Fertigungslasers aus, damit keine Beschädigungen am Probekörper während des Vorgangs auftraten. Eine nachgelagerte Sichtprüfung bestätigte, dass es zu keinen Veränderungen kam, sodass eine zerstörungsfreie und berührungslose Prüfung mit Laserthermografie vorlag. Ein weiterer zu beachtender Punkt ist, dass der Probekörper Raumtemperatur während der Messung besaß. Nach einer beendeten Schicht besitzt das sich im Aufbau befindliche AM-Bauteil eine Restwärme, was eine Findung von geeigneten Parametern für die Laserthermografie erschweren kann. Dabei ist die jeweilige auftretende Temperatur zwischen den Lagen von einer Vielzahl an Parametern abhängig und damit nicht konstant.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beleuchtet die Nutzung von aktiver Laserthermografie als berührungslose, schnelle ZfP-Methode im Kontext der Prüfung von einzelnen Lagen in-situ während des AM-Prozesses L-PBF. Die Flying Spot Thermografie mit Hilfe des Fertigungslasers stellt dafür eine mögliche Prüfmethode mit hohem Potenzial dar. Für eine grundlegende Validierung wurde in diesem Rahmen die Durchführung innerhalb einer L-PBF-Anlage anhand eines Probekörpers aus Kaltarbeitsstahl (90MnCrV8) mit eingebrachter Nut als Defekt getestet. Die dafür genutzte eigens entwickelte Maschine und ihre Vorteile wurden vorgestellt und das Ergebnis der Prüfung mit einer Infrarotkamera präsentiert. Dieses zeigte den erfolgreichen optischen Nachweis des Defekts trotz der Einfachheit des Aufbaus und legt damit die Grundlage für weiterführende Untersuchungen. Es zeigte auch, dass die Prüfparameter und eine korrekte Anwendung des Lasers essenziell sind für eine aussagekräftige und zerstörungsfreie Analyse.

In einem nächsten Schritt werden als weitere Vorstufe mittels AM-gefertigte Probekörper mit bekannten Defekten untersucht. Damit lassen sich Begrenzungen ermitteln und geeignete Prüfparameter finden. In diesem Rahmen wird die räumliche Auflösung der Bildgebung verbessert und es werden Algorithmen zur Nachbearbeitung genutzt, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Des Weiteren wird die Möglichkeit der Vorwärmung genutzt, um den Einfluss einer gesteigerten Probekörpertemperatur einzubeziehen. Basierend auf diesem vorbereitenden Grundwissen erfolgt die Anwendung innerhalb des L-PBF-Prozesses, wobei eine Kombination mit optischer Tomografie angedacht ist, um besonders kritische Bereiche vorab zu identifizieren und die Prüfzeit zu verkürzen. Damit wird das Potenzial für eine lagenweise in-situ Prüfung voll ausgeschöpft und der L-PBF-Prozess reproduzierbarer und sicherer gestaltet.

Danksagung

Das Projekt *ATLAMP* (Aktive Thermografie mit Laseranregung zur in-situ Detektion von Fehlern während der Additiven Fertigung im Metall-Pulverbettverfahren) wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Förderkennzeichen - BAM: 16KN086124; THETASCAN GmbH: 16KN086125.

Referenzen

- [1] T. Hauser, R. Reisch, P. Breese et al. „Oxidation in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys“. In: *Additive Manufacturing* 41 (Mai 2021), S. 101958. ISSN: 22148604.
- [2] T. Hauser, R. Reisch, P. Breese et al. „Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys“. In: *Additive Manufacturing* 41 (Mai 2021), S. 101993. ISSN: 22148604.
- [3] A. Wu, D. Brown, M. Kumar et al. „An Experimental Investigation into Additive Manufacturing Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel“. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 45 (13 Dez. 2014), S. 6260–6270. ISSN: 1073-5623.
- [4] R. Reisch, T. Hauser, B. Lutz et al. „Distance-Based Multivariate Anomaly Detection in Wire Arc Additive Manufacturing“. In: 19th IEEE International Conference on Machine Learning und Applications (ICMLA), Dez. 2020, S. 659–664. ISBN: 978-1-7281-8470-8.
- [5] G. Mohr, S. Altenburg, A. Ulbricht et al. „In-Situ Defect Detection in Laser Powder Bed Fusion by Using Thermography and Optical Tomography - Comparison to Computed Tomography“. In: *Metals* 10 (1 Jan. 2020), S. 103. ISSN: 2075-4701.
- [6] M. Kogel-Hollacher, M. Strebel, C. Staudenmaier et al. „OCT sensor for layer height control in DED using SINUMERIK controller“. In: Proceedings Volume 11271, Laser 3D Manufacturing VII, 2020, S. 23. ISBN: 9781510633056.
- [7] D. Ye, G. Hong, Y. Zhang et al. „Defect detection in selective laser melting technology by acoustic signals with deep belief networks“. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (5-8 2018), S. 2791–2801. ISSN: 14333015.
- [8] W. Fu, C. Haberland, E. Klapdor et al. „Streamlined frameworks for advancing metal based additive manufacturing technologies“. In: *Journal of the Global Power and Propulsion Society* 2 (Jan. 2018), QJLS4L. ISSN: 2515-3080.
- [9] T. Hauser, P. Breese, T. Kamps et al. „Material transitions within multi-material laser deposited intermetallic iron aluminides“. In: *Additive Manufacturing* 34 (2020). ISSN: 22148604.
- [10] H. Hyer, L. Zhou, A. Mehta et al. „Composition-dependent solidification cracking of aluminum-silicon alloys during laser powder bed fusion“. In: *Acta Materialia* 208 (Apr. 2021), S. 116698. ISSN: 13596454.
- [11] T. Mukherjee und T. DebRoy. „Mitigation of lack of fusion defects in powder bed fusion additive manufacturing“. In: *Journal of Manufacturing Processes* 36 (Dez. 2018).
- [12] S. Shrestha und Y. Chou. „A Numerical Study on the Keyhole Formation During Laser Powder Bed Fusion Process“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141 (10 Okt. 2019). ISSN: 1087-1357.
- [13] M. Ziegler, P. Myrach, J. Schlichting et al. „Laser-Thermografie für die schnelle Prüfung auf mikroskopische Risse in reflektierenden metallischen Oberflächen“. In: DGZfP-Jahrestagung, 2013.
- [14] N. Pech-May und M. Ziegler. „Detection of Surface Breaking Cracks Using Flying Line Laser Thermography: A Canny-Based Algorithm“. In: MDPI, Nov. 2021, S. 22.
- [15] M. Ziegler, P. Myrach und B. Neding. „Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Prüfung: Oberflächenrisse mit der Laser-Thermografie finden“. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 70 (4 Aug. 2015), S. 190–195. ISSN: 2194-1831.
- [16] J. Schlichting, M. Ziegler, C. Maierhofer et al. „Flying Laser Spot Thermography for the Fast Detection of Surface Breaking Cracks“. In: 18th WCNDT, Apr. 2012.
- [17] J. Mireles, S. Ridwan, P. Morton et al. „Analysis and correction of defects within parts fabricated using powder bed fusion technology“. In: *Surface Topography: Metrology and Properties* 3 (3 Aug. 2015), S. 034002. ISSN: 2051-672X.
- [18] F. Herzer, F. Abraham, C. Tammer et al. „Detection of Defects in Solidified Layers within Laser-based Powder Bed Fusion using Active Thermography“. In: *Procedia CIRP* 104 (2021), S. 518–523. ISSN: 22128271.