

# Detektion von Bindefehlern durch Laser-Thermografie beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl

Fabian HERZER<sup>1</sup>, Johannes SCHILP<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer IGCV, Augsburg

Kontakt E-Mail: [fabian.herzer@igcv.fraunhofer.de](mailto:fabian.herzer@igcv.fraunhofer.de)

**Kurzfassung.** Beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (eng. Powder Bed Fusion of Metals using a Laser Beam, PBF-LB/M) stellt das Thema Qualitätssicherung, insbesondere in Form der Prozessüberwachung, nach wie vor eine große Herausforderung dar. Branchen wie beispielsweise die Luft- und Raumfahrt oder die Medizintechnik können stark von der Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigungsbauweise profitieren, erfordern aber aufgrund ihrer starken Regulierungen ein hohes Maß an Qualitätsnachweisen. Aktuell am Markt verfügbare Systeme im Bereich der Prozessüberwachung fokussieren sich auf die Erfassung der Prozessemissionen bei der Schichterzeugung. Durch das Zusammenspiel einer Vielzahl an Parametern und das erneute Aufschmelzen bereits verfestigter Schichten ist die Interpretation der Daten und die Verknüpfung mit resultierenden Ungängen bzw. Defekten hochkomplex und fehleranfällig. Im Rahmen des MULTIMATERIAL-Zentrums Augsburg wird daher im Forschungsprojekt Multisurv untersucht, welches Potenzial die aktive Thermografie unter Nutzung des Anlagenlasers besitzt, um Bindefehler in bereits verfestigten Schichten zu detektieren. Durch die Prüfung der verfestigten Schichten wird das Resultat und nicht der Entstehungsprozess überwacht bzw. kontrolliert. Anhand eines entwickelten Vorgehens konnte bereits die prinzipielle Detektierbarkeit von künstlich eingebrachten Bindefehlern nachgewiesen werden. Nachfolgend wird daher dargestellt, welche Anforderungen durch das Reaktionsverhalten der eingebrachten Ungängen an die Anregung mittels des Prozesslasers resultieren und wie diese bei der Integration der Thermografie in eine PBF-LB-Anlage berücksichtigt werden können.

## 1. Einführung

Nach einem Rückgang im Jahr 2009, wuchs die AM-Branche in den Jahren 2010 bis 2020 stetig. In den Jahren 2016 bis 2020 konnte sogar ein durchschnittliches Wachstum von 23,3 % verzeichnet werden. [1] Die Covid-19-Pandemie hatte in den letzten beiden Jahren unterschiedliche Auswirkungen auf die Branche. Einerseits konnten durch den Einsatz additiver Fertigungssysteme insbesondere in der ersten Jahreshälfte von 2020, wichtige Utensilien wie Gesichtsschutzschilder, Masken oder Ventilatorbauteile hergestellt werden, um Lieferengpässe auszugleichen, andererseits wurde mit der Luftfahrt eine der zentralen Branchen der AM Industrie hart getroffen [2]. Trotz diesem Rückgang wird erwartet, dass sich die Branche im Bereich der Luftfahrt wieder erholen wird, da sie zum einen nicht so stark betroffen war wie vermutet und zum anderen nach wie vor große Entwicklungspotenziale bestehen [3].



Eine zentrale Herausforderung, um in stark regulierten Branchen wie der Luftfahrt weiter Fuß fassen und wachsen zu können, stellt das Thema Qualitätssicherung entlang der Prozesskette insbesondere in Form der Prozessüberwachung dar [4]. Aus diesem Grund ist dieses Gebiet auch ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung [5]. Zerstörungsfreie Prüftechniken, mit denen sich prozessbedingte Fehler wie Risse, Poren, Delaminationen oder Bindefehler detektieren lassen, stoßen bei der Prüfung von gefertigten Bauteilen unter anderem aufgrund der Komplexität der Bauteile oder der Materialeigenschaften der eingesetzten Werkstoffe an ihre Grenzen. Lediglich die Computertomographie ist in der Lage auch komplexe Strukturen auf mögliche Bauteilfehler zu untersuchen. Allerdings bedeuten derartige Scans einen hohen Kosten- sowie Zeitaufwand und die Technologie ist je nach Bauteilgröße und Materialeigenschaften auch in ihrem Auflösungsvermögen zur Erkennung derartiger Fehler begrenzt. [6, 7] Um diese Limitationen zu umgehen, muss die Bauteilprüfung bereits während des Herstellungsprozesses erfolgen. Beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (eng. Powder Bed Fusion of Metals using a Laser Beam, PBF-LB/M) kommen zu diesem Zweck aktuell Technologien zum Einsatz, die sich auf die Erfassung und Interpretation der Prozessemissionen in Form von Strahlung oder Schall beschränken. Sie sind demnach dem Gebiet der Prozessüberwachung und nicht der Bauteilprüfung zuzuordnen. Die Interpretation der Daten stellt hierbei nach wie vor eine große Herausforderung dar. Durch das Zusammenspiel von vielen Prozessparametern sind die Ursachen für Signalabweichungen nur schwer zuzuordnen. [6, 8] Insgesamt sind Ansätze zur Prozessüberwachung für diesen Prozess schwierig umzusetzen, da sie sich mit den Emissionen der Schmelze der aktuellen Schicht befassen und nicht mit dem Ergebnis: den bereits verfestigten Schichten.

Am Fraunhofer IGCV wird im Projekt MULTISURV, welches vom bayrischen Staatsministerium für Wirtschaft gefördert wird, der Ansatz verfolgt, durch Integration einer Infrarot-Kamera und unter Nutzung des prozesseigenen Lasers die aktive Thermografie als Methode zur Prüfung bereits verfestigter Schichten auf Bindefehler einzusetzen. Die Bauteilprüfung würde somit während des Herstellungsprozesses erfolgen und sich auf das Prozessergebnis, die verfestigten Schichten, beziehen.

## **2. Prüfansatz**

### *2.1 Wahl der Anregungsquelle*

Aktive Thermografie-Verfahren kommen dann zum Einsatz, wenn Bauteile in der industriellen Produktion auf oberflächennahe Ungängen bzw. Defekte untersucht werden. Zum Zweck der Prüfung wird ein instationärer Wärmefluss durch eine externe Energiequelle im Prüfobjekt erzeugt und das Verhalten des Bauteils auf diese Anregung mittels Infrarot-Kameras erfasst. Je nach zu detektierender Ungänge können dabei unterschiedliche Anregungsquellen zum Einsatz kommen. Sie unterscheiden sich maßgeblich in Form ihres zeitlichen Anregungssignals. [9]

Generell lassen sich Gefügefehler beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl in die bereits genannten Kategorien Riss, Pore, Delamination und Bindefehler einteilen. Aufgrund der Form, möglicher Größen und Entstehungsort im Bauteil, eignen sich vor allem die Bindefehler für eine Detektion mittels aktiver Thermografie. Sie entstehen aufgrund eines verminderten Energieeintrags (z. B. durch Abweichungen in der Pulverschicht, Schmauchentwicklung oder Balling), können mehrere 100 µm groß werden und führen zu einer unzureichenden Anbindung zwischen Schichten. Die so entstandenen Hohlräume enthalten entweder ungeschmolzenes Pulver oder schließen das Prozessschutzgas

Argon ein. Poren sowie Risse weisen dagegen ein zu geringes Größen-Tiefen-Verhältnis aus, um thermografisch erfasst werden zu können. [6, 7, 10]

Aufgrund dieser Beschaffenheit und dem Umstand, dass sich die Bindefehler gemäß der Schichtdicken des Prozesses wenige Mikrometer tief im Bauteil befinden, eignen sich insbesondere externe Energiequellen mit impulsförmiger Anregung. In Vorversuchsreihen wurde daher untersucht, inwieweit sich eine flächige Blitzanregung und die Laseranregung für diese Prüfaufgabe eignen. Dabei konnte festgestellt werden, dass es mittels Blitzanregung prinzipiell möglich ist, eingebrachte Ungängen zu detektieren, aufgrund der Blitzdauer und dem Nachglühen des Blitzes sich Anregung und Abkühlung bei derart geringen Schichtdicken aber überlagern [11]. Der Laserspot der AM-Anlagen lässt sich hingegen über die Scanner-Systeme je nach Anlage mit bis zu 7.000 mm/s bewegen. Somit überlagert sich die Anregung und Abkühlung bei dieser Anregungsform nicht und weshalb diese in den weiteren Arbeiten als Anregungsquelle eingesetzt wurde.

## 2.2 Anlagenintegration

Für die Integration der Thermografie in die Anlage, wurde ein Modul entwickelt, welches es ermöglicht, die Kamera in einem Winkel von  $65^\circ$  und mit einem Abstand von 285 mm zur Bauplatte zu positionieren. Ein Germanium-Glas vor der Kamera verhindert das Erfassen von Streustrahlung [12]. Um eine Teilautomatisierung der thermografischen Schichtprüfung umsetzen zu können, wurden die Systeme AM-Anlage, Thermografie-Kamera und Rechneinheit wie folgt miteinander vernetzt:

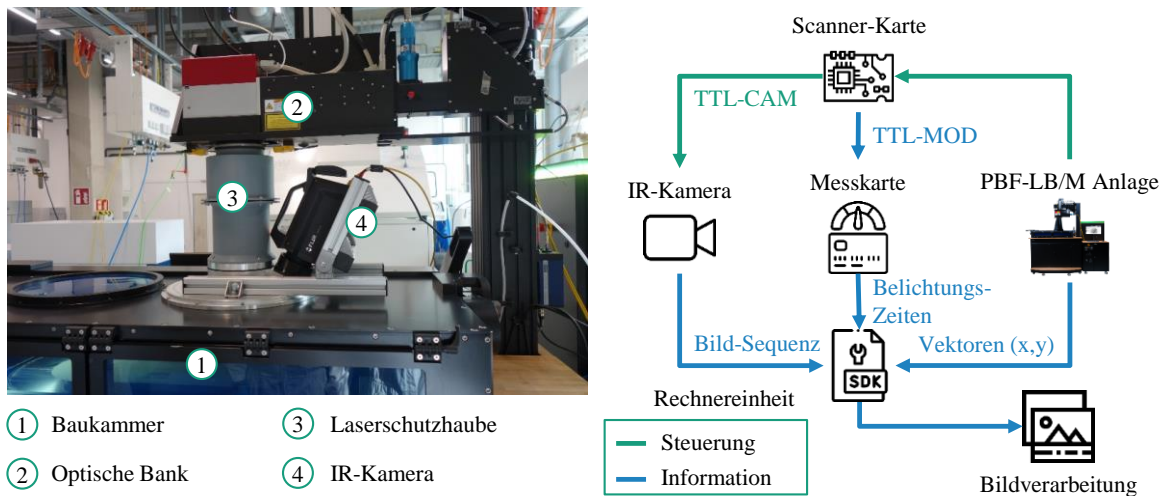
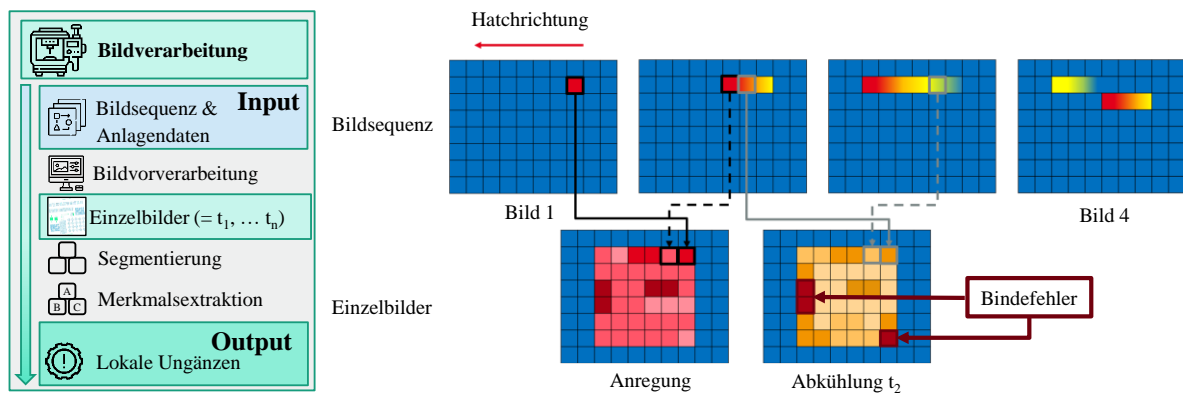


Abb. 1 Integrationsmodul und Kommunikationskonzept für die AconityOne

Wie der **Abb. 1** zu entnehmen ist, gilt es zwischen Steuerungs- und Informationsdaten zu unterscheiden. Die Laserstrahlschmelzanlage AconityOne fungiert innerhalb des Systems als Master. Bei einer Schichtanalyse löst sie die Laser-Anregung sowie die Aufnahme des Thermogramms per Kamera aus. Ermöglicht wird dies über das Abgreifen und Nutzen von TTL-Signalen (Transistor-Transistor-Logik, 0 bis 5 V), welche zur Steuerung von der Anlagensoftware an die Scanner-Karte übergeben werden. Das CAM-Signal ist nur zu Beginn einer Schichtbelichtung einmalig im High-Zustand und wird daher zur Synchronisation der Aufnahme mit der Belichtung eingesetzt. Ist dies erfolgt, enthält die aufgezeichnete Bild-Sequenz sowohl die Anregung zu prüfender, als auch das Abkühlverhalten bereits angeregter Bereiche. In dieser Form ist es nur unter großem manuellen Aufwand möglich, das Reaktionsverhalten der einzelnen Bereiche zu analysieren und qualitativ miteinander zu vergleichen. Daher wurde das in **Abb. 2** dargestellte Vorgehen abgeleitet, um aus einer Bildsequenz einzelne Schichtbilder generieren zu können, die unterschiedliche Zeitpunkte nach der Laseranregung darstellen.



**Abb. 2** Bildverarbeitungs-konzept zur Generierung von Schichtbildern unterschiedlicher Reaktionszeitpunkte und Datenverarbeitung der Bildvorverarbeitung

Wie auf der linken Seite der Grafik zu erkennen ist, wurde die Bildverarbeitung in die Einzelschritte Bildvorverarbeitung, Segmentierung und Merkmalsextraktion unterteilt. Anhand der aufgezeichneten Bildsequenz und der Anlagendaten werden innerhalb der Bildvorverarbeitung Einzelschichtbilder erzeugt, welche jeweils unterschiedliche Zeitpunkte des Abkühlverhaltens nach der Laseranregung wiedergeben. Eine schematische Darstellung dieser Datenverarbeitung ist im rechten Teil der **Abb. 2** zu sehen. Hierbei werden die Intensitätswerte der einzelnen Pixel gemäß dem Laserverlauf in neue Bilder übertragen. Der Zeitabstand zwischen zwei Bildern der Sequenz definiert dabei die zeitliche Auflösung des Abkühlverlaufs und somit die Zeitpunkte der Einzelbilder. In den Schritten Segmentierung und Merkmalsextraktion erfolgt dann zunächst die Identifikation von Hotspots und anschließend die Erfassung der definierten Merkmale Intensität, Größe und Zeitpunkt des Auftretens. Anhand dieser Merkmale kann abschließend beurteilt werden, ob es sich tatsächlich um eine Reaktion eines Bindefehlers aus dem Bauteilinneren handelt.

Um den Schritt der Bildvorverarbeitung umsetzen zu können, war es notwendig, das Kamera-Bild mit dem Koordinatensystem der Anlage zu matchen und eine zeitliche Synchronisation zwischen Belichtung und Aufnahme herzustellen. Dazu wurde im ersten Schritt die Kamera in einem 90°-Winkel zur Bauplatte platziert. Der Ursprung des Koordinatensystems der Anlage befindet sich im Zentrum der Bauplatte, der Ursprung des Koordinatensystems der Kamera hingegen im Bild links oben. Damit über die Platzierung der Bauteile, der Bildausschnitt der Kamera und der Vektorbereich der Anlage abgeleitet werden kann, wurde ein Tool entwickelt, welches die Koordinatentransformation zwischen den Systemen vornimmt und somit die Parametrisierung des Bildausschnittes der Kamera ermöglicht. Des Weiteren kann darüber der Koordinatenbereich eingegrenzt werden. Über eine Export-Funktion der Anlage wurde ermöglicht, die einzelnen Vektoren der Schicht in einem Logfile im txt-Format zu extrahieren und diese Information der Rechereinheit für die Bildverarbeitung zur Verfügung zu stellen.

Für die zeitliche Synchronisation wurde die Scanner-Karte mit einer Messkarte gekoppelt, die mit einer Abtastrate von 250 kHz TTL-Signale erfassen und aufzeichnen kann. Das LM-Mod-Signal ist während jeder Einzel-Hatch-Belichtung im High-Zustand. Dadurch ist es möglich, über die Dauer dieses High-Zustandes, die realen Zeiten für die Belichtung zu messen. Mathematische Ansätze unter Berücksichtigung der Parameter bzw. der Delays einzelner Anlagenkomponenten würden hierbei zu ungenau sein und Fehler aufweisen. Über ein, am IGCV entwickeltes, Tool ist es möglich, die exportierte Logfile der (x,y)-Vektoren mit den aufgezeichneten Belichtungszeiten der Laserstrahlschmelz-Anlage zu matchen. Das Ergebnis ist eine Liste der Einzelvektoren mit Orts- und Zeitinformation. Dies stellt die datentechnische Grundlage für die Bildvorverarbeitung dar.

### 2.3 Vorgehen zur Identifikation der Anforderungen

Bevor das beschriebene Konzept zur Bildverarbeitung final umgesetzt werden kann, mussten zunächst die Anforderungen an die Anregungsparameter für die aktive Thermografie bestimmt werden. Sie bestimmen sowohl den örtlichen als auch den zeitlichen Vektorverlauf des Lasers und haben somit Einfluss auf die konkrete Umsetzung des Konzepts zur Datenvorverarbeitung und die anschließenden Analyseschritte bei der Segmentierung und Merkmalsextraktion. In bereits durchgeführten Arbeiten wurde dazu ein Vorgehen entwickelt, welches es ermöglicht, Bindefehler gezielt an einem definierten Ort, in einer vorgegebenen Größe und realitätsnah in der Beschaffenheit in ein Bauteil einzubringen. Dies erfolgte über die Einbringung von Hohlkörpern im CAD-Model. Mittels dieses entwickelten Prüfkörpers wurde somit eine Grundlage geschaffen, unterschiedliche Anregungsformen zu testen und deren Auswirkungen auf das Reaktionsverhalten der Bindefehler zu untersuchen. Im Zuge dieser Arbeiten konnte bereits festgestellt werden, dass ein zu groß gewählter Hatch-Abstand die Kontrastausprägung zwischen Bindefehler und defektfreien Bereichen negativ beeinflusst. [13]

Aufbauend auf den damaligen Arbeiten wurde der Prüfkörper modifiziert, um sowohl einfache als auch komplexe Strukturen simulieren zu können:

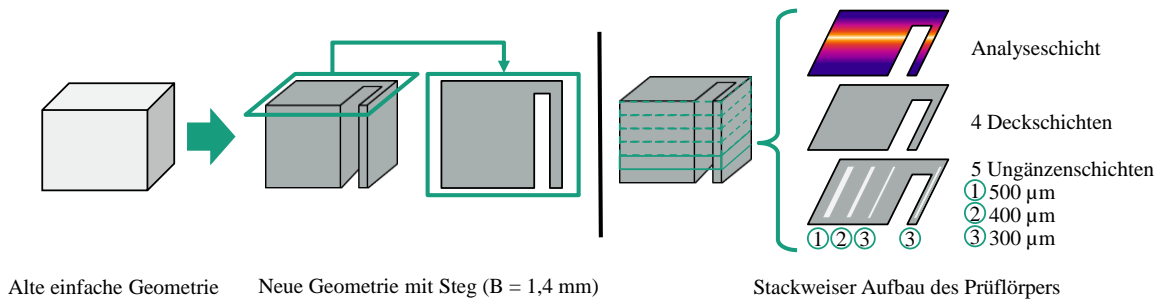


Abb. 3 Modifikation der Prüfkörper-Geometrie

Der stackweise Aufbau des in Abb. 3 dargestellten Prüfkörpers blieb ebenso wie das allgemeine Versuchsvorgehen gemäß der Vorarbeiten unverändert. Dementsprechend wurden oberhalb der Ungänzenschichten vier Deckschichten gefertigt. Diese haben zum einen den Zweck, dass sich auftretende Oberflächenveränderungen durch die Kavitäten innerhalb der vier Schichten ausheilen und sorgen zudem dafür, dass sich die Analyseschicht außerhalb des Wirkungsbereichs des Schmelzbades bei der Schichtverfestigung befand. Somit konnte sichergestellt werden, dass die eingebrachten Ungänzen zum Zeitpunkt der Analyse nicht mehr durch den Prozess verändert wurden.

### 3. Ergebnisse der Untersuchungen

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, Anforderungen an die Anregungsstrategie der Analyseschichten und somit auch für die konkrete Umsetzung der Programmierung der Bildvorverarbeitung abzuleiten. Folgende feste Parameter kamen dabei bei der Anregung bzw. der Bildaufnahme zum Einsatz:

Tabelle 1 Feste Parameter bei der Anregung und Aufnahme

Anregung (AconityOne)		Aufnahme (FLIR SC5650)	
Leistung	80 W	Auflösung	256 x 192 Px
Scangeschwindigkeit	5000 mm/s	Integrationszeit	100 µs
Hatchabstand	100 µm	Bildwiederholrate	500 Hz

Neben den bereits erwähnten Auswirkungen des Hatchabstandes, wurde in vorangegangenen Untersuchungen auch eine erste Einschränkung der Scanstrategie vorgenommen. Bauteile müssen mittels unidirektionaler Hatchausrichtung angeregt werden, da das „Wenden“ des Lasers für die Belichtung des benachbarten Scans zur Temperaturspitzen führen würde [13]. Daher wurde diese Strategie auch bei diesen Versuchen angewendet, wie in Abb. 4 zu sehen ist:

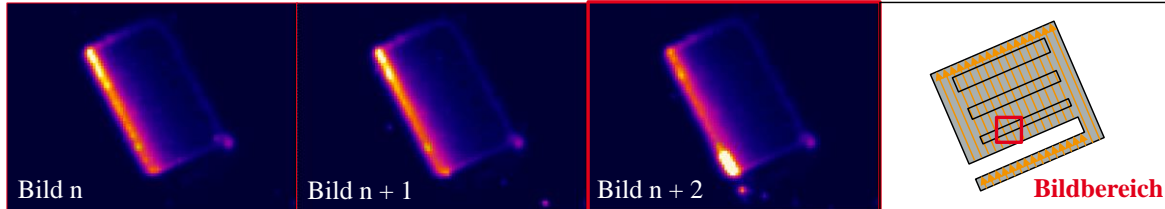


Abb. 4 Bildsequenz mit schematischer Darstellung der Anregungsstrategie

Der Laser regt den Prüfkörper mit den genannten Parametern von unten unten rechts nach oben links unidirektional mit einem Hatchabstand von  $100 \mu\text{m}$  an. Der Hotspot des eingebrachten Bindefehlers kann insbesondere im Bild  $n + 1$  gut erkannt werden. Die dargestellte Bildsequenz zeigt das Reaktionsverhalten von drei aufeinanderfolgenden Bildern. Um dieses Verhalten quantifizieren zu können, wurden Region of Interests (kurz ROIs) mit einer Größe von  $3 \times 3$  Pixeln sowohl über dem Hotspot, als auch in direkt daneben in einem defektfreien Bereich platziert. Der Verlauf der Intensitäten für diese beiden ROIs können nachfolgender Abb. 5 entnommen werden:

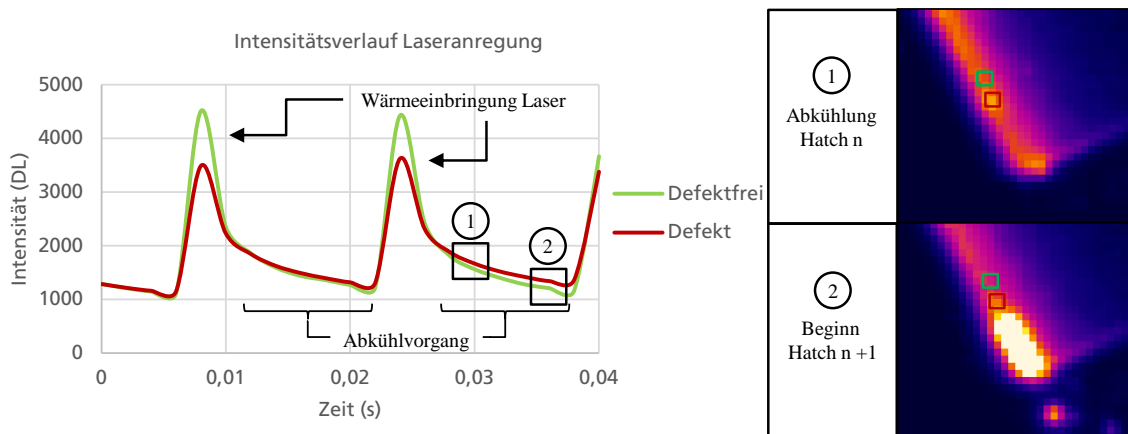


Abb. 5 Intensitätsverlauf der ROIs nach der Laseranregung

Der zu betrachtende Abkühlvorgang des Bauteils an der Stelle des vorangegangenen Hatches ist bei einer Hatchlänge von  $10 \text{ mm}$  noch nicht abgeschlossen, weshalb sich Abkühlung und Anregung überlagern (Bild 2 in Abb. 5). Bei kürzeren Hatches würde sich dieser Effekt noch verstärken. Dies hätte zudem zur Folge, dass nicht dieselbe Ausgangstemperatur vor dem Anregen vorläge und die Kontrastausprägung nicht ausreichend vergleichbar verlief. Demnach eignet sich eine versetzte Anregung der Hatches für die Ausbildung des besten Kontrasts.

Neben dem zeitlichen, wurde auch das flächenmäßige Reaktionsverhalten der Defekte untersucht. Dazu wurden ROIs über Hotspots platziert, welche sich in den Bereichen der unterschiedlich großen Ungängen befanden. Das Reaktionsverhalten für Hotspots der Ungängen  $300$  und  $500 \mu\text{m}$  sind exemplarisch in nachfolgender Abb. 6 zu sehen:

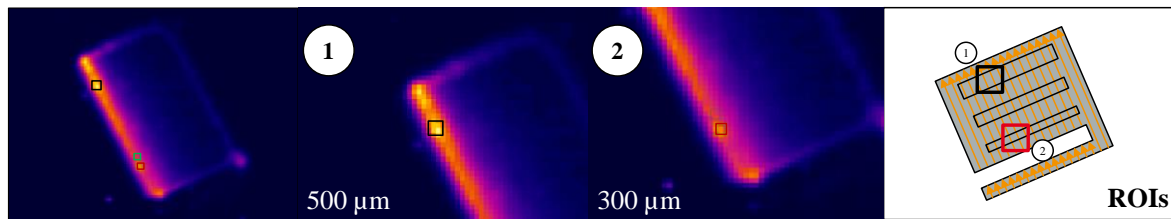


Abb. 7 Flächenmäßiges Reaktionsverhalten unterschiedlicher Ungänzengrößen

Anhand der Nahaufnahmen der einzelnen ROIs kann erkannt werden, dass der exemplarische Hotspot im Bereich der 500 µm Ungänze mit 4 x 4 Pixeln größer ausfällt, als der exemplarische Hotspot der 300 µm Ungänze (3 x 3 Pixeln). Demnach lässt sich daraus ableiten, dass es hier einen Zusammenhang mit den Größen der Defekte geben könnte. In weiteren Analysen wurde untersucht, wie sich die Bereiche der Hotspots bei benachbarten Scans verhalten. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Bereiche bei einem Versatz des Lasers um den Hatchabstand von 100 µm nicht im selben Maß an dieser Stelle ausprägen. Um die Ursache für dieses Verhalten finden zu können, wurden die eingebrachten Ungänzen einiger aufgebauter Würfel mit CT-Scan untersucht.

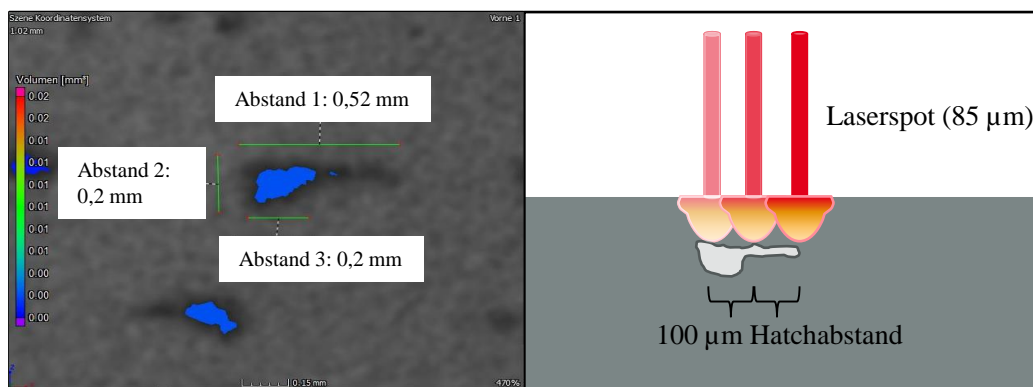


Abb. 6 CT-Scan und Verlauf der Wärme

Die Bilder des beispielhaften CT-Scans zeigen eine unregelmäßige Form der eingebrachten Ungänzen. Die Maße bzw. die Tiefe können zwischen 100 und 500 µm variieren und sind demnach nicht mit der Form aus dem CAD-Model vergleichbar. Somit wird das festgestellte Reaktionsverhalten durch diese Aufnahmen gestützt. Bereits bei einem Versatz von 100 µm kann die Wärme nicht vergleichbar in das Bauteil eindringen und verursacht ein anderes Reaktionsverhalten. Ein weiteres Indiz für das Verhalten ist die Ausbreitung der Wärme. Die Wärme dringt kegelförmig in das Bauteil ein. Tiefe und Breite des wärmebeeinflussten Bereichs sind dabei von der Scangeschwindigkeit sowie der Laserleistung abhängig. Durch den Umstand, dass der Laserspot mit 85 µm kleiner als der Hatchabstand war, kann dieser Versatz ausreichen, um die Ungänze beim Scannen des benachbarten Hatches nicht mehr detektieren zu können.

Um für die Analyse alle Informationen zur Verfügung zu haben, müssen demnach innerhalb der Bildvorverarbeitung die Intensitätswerte eines Bereichs von 4 x 4 Pixeln um die Vektorkoordinaten extrahiert werden. Bei einer Überlagerung der Bereiche benachbarter Scans erfolgt eine Überschreibung der Werte nur bei höheren Intensitäten. Somit kann vermieden werden, dass die Intensitäten lokal sehr begrenzt auftretender Hotspots direkt wieder überschrieben werden.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Versuche konnte festgestellt werden, dass sich bei Hatchlängen kleiner als 10 mm der Abkühlverlauf eines Hatches mit der Belichtung des nachfolgenden Hatches überlagern. Dementsprechend müssen bei der Anregung Hatches versetzt zueinander belichtet werden, um dies zu vermeiden. Des Weiteren ergaben die Versuche, dass bei der Extrahierung der Informationen im Zuge der Bildvorverarbeitung aus den Einzelbildern ein 4 x 4 Pixel großer Bereich um den Vektorverlauf in das Einzelbild zu übertragen ist. Diese Erkenntnisse müssen im weiteren Verlauf des Projektes Multisurv berücksichtigt und die Programmierung der Bildvorverarbeitung gemäß dieser Anforderungen gestaltet werden. Ist dies erfolgt, müssen im nächsten Schritt konkrete Grenzwerte für das Merkmal Intensität ermittelt werden. Hierfür muss innerhalb der Bildverarbeitungskette im Teilschritt der Merkmalsextraktion untersucht werden, ob eine Identifikation von Bindefehlern besser über die Analyse bestimmter Reaktionszeitpunkte, über die integrierten Intensitätswerte des gesamten Abkühlvorgangs oder über eine Kombination beider Ansätze erfolgen kann.

#### Referenzen

- [1] T. Wohlers *et al.*, *Wohlers report 2020: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins, Colo.: WOHLERS Associates, 2020.
- [2] T. Wohlers *et al.*, *Wohlers Report 2021: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*. Fort Collins, Colo.: WOHLERS Associates, 2021.
- [3] A. W. Khan, "Global Aerospace Additive Manufacturing Applications Growth Opportunities: Increased Technology Adoption and Materials Innovation Transforming Aerospace Parts Production," Global Aerospace & Defense Research Team at Frost & Sullivan, Santa Clara, USA, 2021.
- [4] E. Witt and C. Anton, Eds., *Additive Fertigung: Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Stellungnahme*. Halle (Saale), Mainz, München: Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2020.
- [5] M. Basso *et al.*, "An Additive Manufacturing Breakthrough: A How-to Guide for Scaling and Overcoming Key Challenges," Whitepaper, World Economic Forum, Genf, Jan. 2022.
- [6] M. Grasso and B. M. Colosimo, "Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 4, p. 44005, 2017.
- [7] B. Dutton, M. H. Rosli, and D. Ross-Pinnock, "NDT Standards for Additive Manufacturing," Grenoble, Apr. 10 2018.
- [8] S. K. Everton *et al.*, "Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing," *Materials & Design*, vol. 95, pp. 431–445, 2016.
- [9] *Zerstörungsfreie Prüfung - Aktive Thermografie*, DIN 54192, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- [10] A. Ladewig *et al.*, "Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process," *Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 1–9, 2016.
- [11] F. Herzer and J. Schilp, "Aktive Thermografie als In-Prozessüberwachungsmethode für Selektives Laserstrahlschmelzen," in *DGZfP-Berichtsband BB 173*, Halle (Saale), 2019.
- [12] F. Herzer and J. Schilp, "Pulverbettüberwachung bei der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen durch aktive Thermografie," in *ZfP heute - wissenschaftliche Beiträge zur zerstörungsfreien Prüfung 2020*, A. Erhard, Ed., Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2020, pp. 53–55.
- [13] F. Herzer *et al.*, "Detection of Defects in Solidified Layers within Laser-based Powder Bed Fusion using Active Thermography," *Procedia CIRP*, vol. 104, no. 4, pp. 518–523, 2021.