

Entwicklung eines Multisensorsystems zur in-situ Charakterisierung von additiv gefertigten HyPo-Komponenten

Peter Shobowale, Lennart Hinz, Markus Kästner

Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

<mailto:peter.shobowale@imr.uni-hannover.de>

Im Rahmen der Prozessüberwachung für die additive Fertigung hybrider poröser Bauteile wird ein multimodales Messsystem entwickelt. Das Verfahren kombiniert Thermographie und Lasertriangulation, um schichtweise Temperatur- und Geometriedaten zu erfassen. In diesem Beitrag wird der Fokus auf die Herausforderungen bei der Systementwicklung gelegt.

1 Einleitung

Bei der Laser Direct Energy Deposition (L-DED) wird Metallpulver oder -draht mithilfe eines fokussierten Laserstrahls direkt auf ein Werkstück aufgetragen und aufgeschmolzen. Dieses additive Fertigungsverfahren ermöglicht nicht nur die Herstellung komplexer Bauteile aus unterschiedlichen bzw. hybriden Werkstoffen, sondern auch die gezielte Erzeugung definierter Porositäten. Derartige Bauteile werden als hybridporöse Komponenten (HyPo-Komponenten) bezeichnet. Proben einer solchen L-DED-gefertigten Oberfläche sind in Abbildung 1 dargestellt.

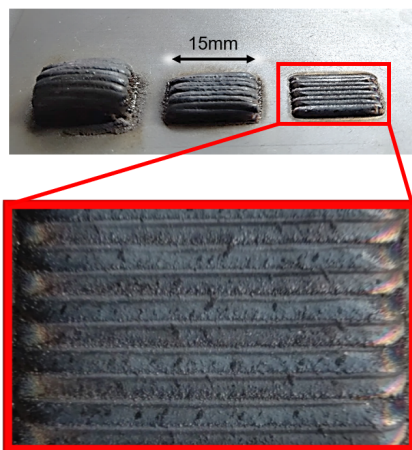


Fig. 1 Nahaufnahme der Oberfläche einer L-DED-Probe

Eine zentrale Herausforderung des L-DED-Prozesses stellt der hohe, inhomogene Wärmeeintrag in das Werkstück dar, der zu Eigenspannungen, Formabweichungen, Rissbildung sowie Defekten wie Poren oder unvollständig aufgeschmolzenen Partikeln führen kann. Ursache hierfür sind schwankende Schmelzbadtemperaturen in Folge von ungleichmäßiger Materialzufuhr und unzureichender Prozessstabilität [1].

Zur Verbesserung der Stabilität können geeignete in-situ Messverfahren beitragen. Im Fokus stehen

insbesondere die Geometrie der aufgetragenen Schicht, ihre Temperaturverteilung sowie Material- und Porositätsgradienten. Aktuell konzentrieren sich Arbeiten auf optische Multisensorsysteme, die gleichzeitig Geometrie, Temperatur und Oberflächeneigenschaften erfassen können. Gängige Ansätze umfassen hierbei Strategien wie die direkte Überwachung des Schmelzbades oder die großflächige Erfassung des Bauraums [2]. Beide Ansätze teilen jedoch eine wesentliche Einschränkung: Sie liefern aufgrund ihrer begrenzten räumlichen Auflösung bzw. des eingeschränkten Sichtfeldes nur unzureichende Informationen über die erstarrte Oberfläche. Qualitätsbestimmende Merkmale wie feine Risse oder Poren bleiben dadurch unentdeckt. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept adressiert diese Limitierung, indem es Thermografie und Laserlinientriangulation prozessnah kombiniert, um eben diese qualitätsrelevanten Merkmale zuverlässig zu erfassen.

2 Herausforderungen

Die Realisierung einer in-situ Überwachung für den gesamten Prozess erfordert die Lösung spezifischer Zielkonflikte, die durch die Einsatzumgebung entstehen. Um Defekte wie Poren oder Risse zuverlässig zu detektieren, ist eine hohe laterale und axiale Auflösung erforderlich. Diese kann bei Thermografiekameras jedoch in der Regel nur bei geringem Arbeitsabstand erzielt werden. Gleichzeitig limitiert der begrenzte Bauraum innerhalb der Fertigungsanlage die Größe und Anordnung der Sensorik. Der daraus resultierende Zwang zur Prozessnähe setzt die optischen Komponenten potenziell extremer Prozesswärme, aufgeschmolzenen Partikeln und Materialabscheidungen aus. Mögliche passive Schutzmaßnahmen umfassen die Abwendung der optischen Komponenten vom Prozess und den Einsatz von Gehäusen mit Schutzfenstern. Sollte es dennoch zu einer übermäßigen Erwärmung kommen, können als aktive Gegenmaßnahmen eine Kühlung mittels Druckluft bzw. Schutz-

gas oder eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes in Erwägung gezogen werden. Ersteres erhöht jedoch den Platzbedarf und das Gewicht des Systems, während Letzteres die Messdauer verlängert und so stärker auf den Prozess rückwirken kann.

Eine weitere Herausforderung stellt das intensive, breitbandige Prozesslicht dar, welches vom Schmelzbad und dem prozessimmanenten Funkenflug emittiert wird und das Nutzsignal der optischen Sensoren überlagern kann. Mögliche Lösungsansätze hierfür sind der Einsatz von Lichtquellen im prozessfernen Spektralbereich, etwa bei verwendeten optischen Triangulationsverfahren, sowie die Nutzung optischer Bandpassfilter zur Unterdrückung des Störlichts.

Um die durch inhomogene Wärme- und Materialzufuhr entstehenden Defekte langfristig zu vermeiden, müssen Geometrie- und Temperaturdaten zunächst erfasst und anschließend ausgewertet werden. Erst die ausgewerteten Messwerte ermöglichen die Erkennung von Fehlstellen und bilden die Basis für spätere Korrekturschritte. Für diese Auswertung ist es entscheidend, die unterschiedlichen Modalitäten räumlich und zeitlich zueinander in Beziehung zu setzen. Dies erfordert eine vorherige Kalibrierung der Sensoren, wofür wiederum ein Referenzkörper mit eindeutigen Merkmalen in allen beteiligten Spektren [3] erforderlich ist. Zusätzlich setzt diese extrinsische Kalibrierung ein möglichst überlappendes Sichtfeld der entsprechenden Sensoren voraus.

3 Konzept

Um den zuvor genannten Herausforderungen zu begegnen, wurde ein kompaktes Multisensorsystem entwickelt, welches ein Laserlinientriangulationsverfahren zur Geometrieerfassung in Kombination mit einer Thermografiekamera im langwelligen Infrarotspektrum zur Messung der Oberflächentemperatur vereint. Abbildung 2 zeigt die Anordnung der Komponenten innerhalb des Gehäuses.

Um den Einfluss von Partikelemissionen und des intensiven Prozesslichts auf die Messergebnisse zu minimieren, erfolgt die Messung nachlaufend zum eigentlichen Materialauftrag. Um die Optik vor potenziellen Schäden durch Hitzewirkung und Materialabscheidungen zu schützen, sind die Sensoren in einem Gehäuse untergebracht, das vom Prozess abgewandt ist. Über Schutzfenster ist der Blick auf die erzeugte Oberfläche möglich. Der Aufbau des Laserlinientriangulationssystems ist gezielt auf die Unterdrückung des breitbandigen Prozesslichts ausgelegt. Ein zentraler Aspekt zur Adressierung des breitbandigen Störlichts ist die Wahl des eingesetzten Linienlasers, welcher im Spektrum um 405 nm emittiert und somit bewusst außerhalb des thermisch dominanten Emissionsspektrums des Prozesses liegt. Ein opti-

cher Bandpassfilter, dessen Eigenschaften hierauf abgestimmt wurden, wird vor dem 45°-Spiegel des Boroskops eingesetzt, um zusätzlich Umgebungs- und Prozesslicht herauszufiltern und möglichst nur das Laserlicht zur am Borroskop angeschlossenen Industriekamera passieren zu lassen.



Fig. 2 Darstellung der Komponenten im Multisensorsystem: boroskopische Kamera (1), Thermografiekamera (2), Linienlaser (3) und Gehäuse (4) mit Schutzfenster (5) sowie optischem Filter (6).

4 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung des Projektes – Project-ID 511263698 – SFB/TRR 375. Die Autoren sind verantwortlich für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

References

- [1] T.-S. Liu, P. Chen, F. Qiu, H.-Y. Yang, N. T. Y. Jin, Y. Chew, D. Wang, R. Li, Q.-C. Jiang, and C. Tan, "Review on laser directed energy deposited aluminum alloys," *International Journal of Extreme Manufacturing* 6(2), 022004 (2024). Publisher: IOP Publishing, URL <https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/ad16bb>.
- [2] L. Ye, H. Xue, Z. Li, Y. Zhou, G. Chen, F. Xu, R. Melentiev, S. Newman, and N. Yu, "Review of online quality control for laser directed energy deposition (LDED) additive manufacturing," *International Journal of Extreme Manufacturing* 7(6), 062005 (2025). Publisher: IOP Publishing, URL <https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/aded4f>.
- [3] P. O. Shobowale, L. Hinz, and M. Kästner, "Cheap targets for expensive equipment: a novel, integrated, high-contrast approach to LWIR camera calibration," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIV*, vol. 13567, pp. 478–487 (SPIE, 2025). URL <https://doi.org/10.1117/12.3060711>.