

# Neuartige Methode zur orts aufgelösten Temperaturmessung mittels konventioneller RGB-Farbkamera

Dieter Tyralla\*, Thomas Seefeld\*, Claus Thomy\*

\*BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

[tyralla@bias.de](mailto:tyralla@bias.de)

Die laserbasierte Additive Fertigung erfordert die genaue Kenntnis des gesamten Temperaturfeldes innerhalb der Prozesszone. Daher wurde ein emissionsgrad-korrigiertes Messprinzip für die orts aufgelöste Temperaturmessung entwickelt und am Laser-Pulver-Auftragschweißprozess validiert.

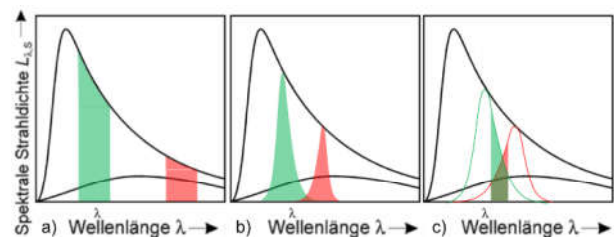
## 1 Einführung

Thermische Fertigungsprozesse erfordern oftmals die Kenntnis der Temperaturen innerhalb der Prozesszone oder sogar des gesamten Temperaturfeldes. In der Additiven Fertigung zeigen sich Abweichungen oder Fehler im Prozess deutlich und schnell in der Änderung lokaler Temperaturen, was das Temperaturfeld zu einem geeigneten Indikator für Imperfektionen macht. Für die in der Industrie häufig verwendeten additiven Fertigungsverfahren, das Pulverbett-basierte Laserstrahlschweißen (LPBF) und das 3D-Laser-Pulver-Auftragschweißen (DED), ergeben sich für die optische Temperaturmessung allerdings besondere Herausforderungen. Hier sind vor allem die Richtungs- und Geometrieabhängigkeit des Prozesses, die auftretenden Änderungen der Emissivität und die notwendige Ortsauflösung der Temperaturmessung zu nennen [1].

Eine einfache Methode zur optischen Temperaturmessung stellt das Spektral-Strahlungsthermometer dar, welches die Strahlung auf einer Wellenlänge, in einem schmalen Band oder dem gesamten Spektrum misst und ihr anhand des planckschen Strahlungsgesetzes eine entsprechende Temperatur zuordnet [2]. Eine verbesserte Methode stellt das Verhältnis-Strahlungsthermometer (2-Kanal-Pyrometrie) dar, welches die Strahlungsleistung zweier diskreter Wellenlängen oder zweier Wellenlängenbereiche ins Verhältnis setzt. Dadurch kann der Emissionsgrad unter der Voraussetzung, dass er in beiden Messbändern gleich ist, herausgekürzt werden, so dass emissionsgradunabhängige Messungen möglich werden [2]. Beide Methoden sind in Abbildung 1a) gezeigt. Neue Ansätze nutzen die Farb-Kanäle einer RGB-Kamera, um das 2-Kanal-Prinzip auf kostengünstige Sensoren im sichtbaren Spektralbereich zu übertragen (Abbildung 1b). Der Fehler der Messung ist aufgrund der Breite der spektralen Bänder für reale Prozess aber hoch.

In der Industrie haben sich Geräte etabliert, die einzelne Anforderungen abdecken, wie 2-Kanal-Pyrometer, die die Messungen der Maximaltemperatur

zulassen, oder Kamerasysteme, die eine orts aufgelöste Temperaturbestimmung nach dem 1-Kanal-Pyrometerprinzip erlauben oder spezielle High-Speed IR-Kamerasysteme [3]. Eine Lösung, die in den Strahlengang des Bearbeitungslasers integriert werden kann, unabhängig vom Emissionsgrad ist und orts aufgelöste Temperaturbestimmung erlaubt, existiert allerdings nicht.



**Abb. 1** Schematische Darstellung der Strahlungsthermometrie (rot) und der Verhältnis-Strahlungsthermometrie (grün & rot) nach a) konventioneller Methode, b) unter Verwendung einer RGB-Kamera als Messgerät und c) für das neuartige Messprinzip.

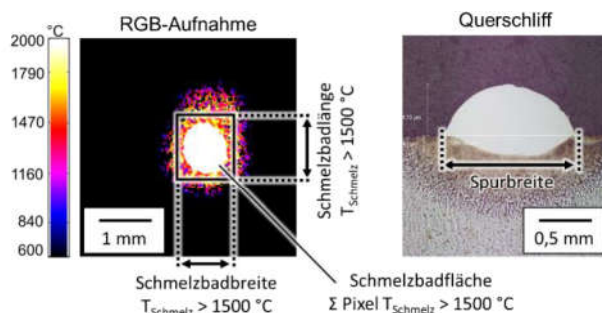
## 2 Versuchsaufbau

Ein neuartiges Messprinzip wurde für die Versuche entwickelt, welches auf beliebigen, kostengünstigen RGB-Farbkameras basiert. Es werden zusätzliche Kantenfilter genutzt, um das Messspektrum auf einen gemeinsamen, überlappenden Bereich einzuschränken. Die Bänder überlagern sich also vollständig, wie Abbildung 1c) im Vergleich zu den anderen Methoden zeigt. Um dennoch Temperaturen anhand des Intensitätsquotienten zweier Kanäle unterscheiden zu können, muss die gemessene Intensität des einen Kanals eine andere Abhängigkeit von der Temperatur haben als die Intensität des zweiten Kanals. Diese Änderung entsteht bei der zum Patent angemeldeten Neuentwicklung durch den unterschiedlichen Transmissionsverlauf des RGB-Filters im überlappenden Spektralbereich [4].

Die Validierung des Prinzips erfolgt direkt am Laser-Pulver-Auftragschweißprozess. Als Sensor wird eine kommerzielle Industriekamera (DFK33GV024, ThelmaSource GmbH) genutzt, dessen Messbereich auf das Intervall von 650 nm bis 850 nm begrenzt wird. Das Messsystem wird in einen

konventionellen Laserbearbeitungskopf integriert, wie bereits für andere Temperaturfeldmessgeräte gezeigt [5].

Der Bearbeitungskopf nutzt eine zentrische Düse, durch die der Zusatzwerkstoff mittig zugeführt wird. Der Laserstrahl wird koaxial zum Pulver geleitet und schweißt den Werkstoff auf dem Baustahlsubstrat auf. Es werden Einzelschweißraupen unter Variation der Prozessgeschwindigkeit und des Pulvermassenstroms erzeugt und mit der Kamera beobachtet. Ein LabView-Programm extrahiert die Schmelzbadgeometrie aus den Kamerabildern anhand der gesetzten Schmelztemperatur von 1500 °C und gibt die Breite des Schmelzbads als Indikator für den Prozess aus. Der Abgleich der Ergebnisse erfolgt anhand der Spurbreite aus dem Querschliff, wie Abbildung 2 zeigt.



**Abb. 2** Prozessaufnahme mit Messgrößen und entsprechender Querschliff mit Referenzgröße.

### 3 Ergebnisse

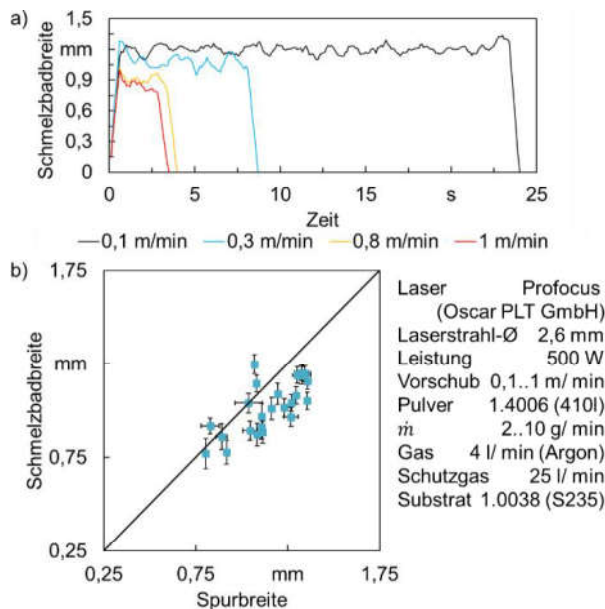
Die Auswertung der Messwerte erfolgt anhand der aufgezeichneten Werte der Kamera, wie sie in Abbildung 3a) beispielhaft für die Variation der Prozessgeschwindigkeit gezeigt ist. Aufgrund der geringen Standardabweichung der Messwerte können die Ergebnisse der Parameter deutlich unterschieden werden. Auf diese Weise kann mit Hilfe der neuen Messtechnik eine sinkende Schmelzbadbreite für eine steigende Prozessgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Dieses Phänomen ist bereits aus der Literatur bekannt und geht auf eine fallende Streckenenergie zurück.

Die Messwerte für jeden Parameter werden gemittelt und der entsprechenden Spurbreite aus der metallografischen Untersuchung gegenübergestellt, wie Abbildung 3b) zeigt. Hier zeigt die schwarze Linie die ideale Übereinstimmung der Ergebnisse an. Die Messwerte weichen im Mittel weniger als 15 % von der Referenzmessung ab. Es fällt auf, dass die Schmelzbadbreite im Schnitt zu niedrig gemessen wird, was auf einen systematischen Fehler bei der Wahl der Schmelztemperatur hinweisen könnte.

### 4 Zusammenfassung

Ein neuartiges Prinzip der Verhältnis-Strahlungsthermometrie wurde entwickelt und auf ein prototypisches Messgerät auf Basis einer kostengünstigen

RGB-Kamera übertragen. Die Validierung des Messsystems erfolgte am realen Laser-Pulver-Auftragschweißprozess, indem die Schmelzbadbreite aus den Temperaturbildern extrahiert und mit der Spurbreite der entsprechenden Schweißraupen verglichen wird. Der Vergleich zeigt eine Abweichung von unter 15 % zwischen Kameramesswert und metallografischer Referenzmessung.



**Abb. 3** a) Messwert für die Schmelzbadbreite der RGB-Kamera für die Variation der Prozessgeschwindigkeit. b) Gegenüberstellung der Messwerte und der korrespondierenden Referenzwerte.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des AIF ZIM Kooperationsprojektes (ZF4063002DF5).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



### Literatur

- [1] D. Tyralla, T. Seefeld.: „Advanced Process Monitoring in Additive Manufacturing“, PhotonicsViews 17 (2020), 60-63, doi.org/10.1002/phvs.202000028.
- [2] F. Bernhard: „Handbuch der Technischen Temperaturmessung“, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014).
- [3] T. Purtonen, et al.: „Monitoring and adaptive control of laser processes“, Physics Procedia 56, (2014), 1218 – 1231.
- [4] D. Tyralla, et al.: „Kamera zum Bestimmen eines 2D-Wärmebilds sowie System und Prozessregleinrichtung“, Patent DE 10 2018 133 518 A1 (2020).
- [5] D. Tyralla, et al.: „In-situ Temperaturüberwachung beim Laser-Pulver-Auftragschweißen“, Proceedings Thermographie-Kolloquium 2019, BB173 (2019).