

Adaption eines maschinenintegrierten Monitoringsystems zur Erfassung von Prozessemissionen

Schweißrauchüberwachung in der additiven Fertigung

E. Uhlmann, J. Polte, M. Bösing

ZUSAMMENFASSUNG Die Prozessüberwachung spielt in der additiven Fertigung eine wesentliche Rolle, um eine robustere Bauteilproduktion zu gewährleisten. Die Erfassung von Nebenprodukten wie Schweißrauch kann dabei Rückschlüsse auf die Prozessqualität liefern. In diesem Beitrag wird die Möglichkeit untersucht, ein in eine industrielle Fertigungsanlage integriertes Monitoringsystem, das derzeit zur Erfassung von Prozessemissionen dient, zu adaptieren. Der neue Fokus soll auf der Überwachung von Schweißrauch liegen.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Digitalisierung, Sensoren

Welding fume monitoring in additive manufacturing – Adapting a machine-integrated monitoring system for recording process emissions

ABSTRACT Process monitoring plays a key role in additive manufacturing to ensure more robust component production. The detection of by-products such as welding fumes can provide information on process quality. This paper examines the possibility of adapting a monitoring system integrated into an industrial machine tool currently used to record process emissions. The new focus will be on monitoring welding fumes.

1 Einleitung

Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem Pulver mittels Laser schichtweise zu dreidimensionalen Strukturen aufgeschmolzen wird [1]. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren sind weniger Fertigungsschritte notwendig und es können komplexe, leichte Bauteile mit hoher Funktionalität hergestellt werden [2]. Die Qualität der aus PBF-LB/M gefertigten Bauteile kann aber erhebliche Unterschiede aufweisen. Zu den wichtigsten Qualitätsfaktoren gehören Oberflächenrauheit, Porosität, Bauteilspannungen und mechanische Eigenschaften [3, 4].

In der Schmelzzone, dem Bereich, in dem der Laserstrahl auf das Pulver trifft, laufen komplexe thermodynamische Prozesse ab. Beim PBF-LB/M können zwei Modi unterschieden werden, von denen der erste der Leitungsmodus ist [5]. Die Energie wird durch Wärmeleitung im Material übertragen und das Pulver wird bis zur darunter liegenden festen Schicht aufgeschmolzen. Dabei verschmilzt die neue Schicht mit der vorherigen. Wenn aber die Energiedichte, die vom Material absorbiert wird, sehr hoch ist, kann der Prozess in den Keyhole-Modus umschalten [6]. Metallgas wird aus dem Schmelzbad herausgeschleudert, wodurch ein Hohlraum entsteht. Dadurch kann der Laserstrahl viel tiefer in die Pulverschicht und die darunter liegende feste Schicht eindringen als im Leitungsmodus.

Der Keyhole-Modus erzeugt eine Reihe von Nebenprodukten, die zur Beurteilung der Prozessqualität genutzt werden können, welche den Prozess allerdings auch negativ beeinflussen. Beim Keyhole-Verfahren wird Metaldampf erzeugt und beim Kollaps des Hohlraums können gasgefüllte Poren zurückbleiben, die sich

negativ auf die Bauteilqualität auswirken [6, 7]. Zudem können Partikel aus dem kondensierten Schweißrauch bei Auftreffen auf dem Pulverbett zu Fehlstellen führen. Eine instabile Bildung des Keyholes führt zu vermehrten Spritzern und damit einhergehenden möglichen Defekten [8]. Die Dämpfung der Laserenergie durch den Schweißrauch kann zu einem unzureichenden Aufschmelzen des Pulvers führen, was Porosität im Bauteil zur Folge hat [9].

Es wird deutlich, dass die Überwachung von Schweißnebenprodukten ein wichtiges Thema in der additiven Fertigung ist und wesentlich zur Qualitätssicherung beiträgt. Die Herstellung von Bauteilen mit PBF-LB/M ist zeitaufwendig und kostenintensiv. Die Produktionskosten können erheblich gesenkt werden, wenn der Prozess frühzeitig gestoppt wird, sobald kritische Fehler auftreten [2].

Optische, thermische, akustische und elektromagnetische Informationen aus dem Schmelzbad charakterisieren bestimmte Schmelzzustände sowie das Verdampfungsverhalten [10]. Ein stabiler Schmelzzustand ist mit einer stabilen Dampffahne verbunden. Starke Schwankungen im Verhalten der Dampffahne deuten auf Fehler bei der Auslegung der Prozess- oder Designparameter hin [11]. Für die Überwachung des Laserschweißprozesses gibt es zahlreiche Vorschläge, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen [12]. So sind zum Beispiel Photodioden eine kostengünstige Lösung zur Erfassung der Plasmastrahlung, der Laserreflexion oder der thermischen Emission [13, 14]. Die Wärmestrahlung, die von Photodioden detektiert werden kann, stammt sowohl vom Metaldampf als auch von der Oberfläche des Schmelzbades [15, 16].

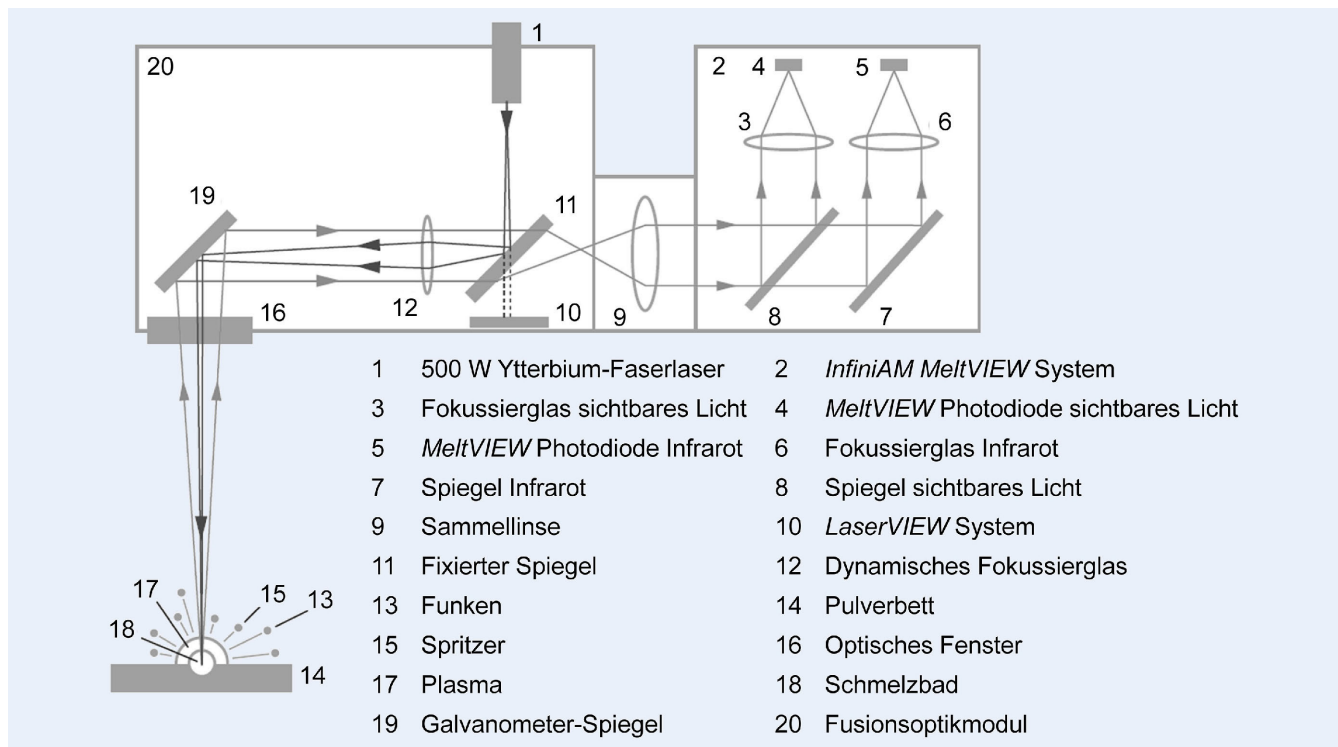


Bild 1. Aufbau des maschinenintegrierten Überwachungssystems. Grafik: Renishaw PLC [21]

Viele kommerziell erhältliche PBF-LB/M-Maschinen sind bereits mit einem Prozessüberwachungssystem ausgestattet, oft mit einem On-Axis-Aufbau, bei dem eine Photodiode die elektromagnetische Strahlung misst [17]. Mehrere Photodioden werden verwendet, um die räumliche Position der Dampffahne zu bestimmen [18]. Die Überwachung des Verhaltens der Schweißrauchfahne ist nützlich, um Prozessinstabilitäten zu erkennen. Die Richtung der Rauchfahne gibt dabei Aufschluss über verschiedene Prozesseigenschaften in der Nähe der Schmelzzone [19]. Aktuelle Untersuchungen im Bereich des Laserschweißens konzentrieren sich bei der Rauchdetektion hauptsächlich auf die Dampffahne in unmittelbarer Nähe des Schmelzbades und weniger auf den weiter entfernten Schweißrauch. Dieser kann allerdings ebenfalls Rückschlüsse auf das Prozessverhalten zulassen [20].

Daher widmet sich dieser Beitrag der Überwachung des Schweißrauchs. Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die Anpassung eines bereits maschinenintegrierten Monitoringsystems mit dem Ziel einer möglichen Überwachung des im PBF-LB/M-Prozess auftretenden Schweißrauchs. Ein solches System könnte zukünftig nicht nur bei der Verbesserung der Prozessqualität unterstützen, darüber hinaus birgt die Prozessüberwachung die Basis für weitere Geschäftsmodelle. Beispielsweise könnte das Modul der Schweißrauchüberwachung als separater Service bei einem Anlagenkauf zusätzlich angeboten werden. Nur bei Kauf dieses Pakets wird die entsprechende Software-Schnittstelle aktiv.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt zunächst auf dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit des Systems. Dazu soll zuerst der Einfluss der Positionierung der Empfängereinheit auf die erfassten Prozessemissionen analysiert werden. Dabei ist vor allem der Abstand der Empfängereinheit zum Schmelzbad von Interesse. Weiterhin werden die Empfängersignale auf eine mögliche Abschwächung, hervorgerufen durch den Schweißrauch, untersucht.

2 Einrichten des Versuchsaufbaus

2.1 Maschinenintegriertes Monitoringsystem

In der geplanten Versuchsreihe wird die PBF-LB/M-Maschine RenAM 500Q des Herstellers Renishaw PLC eingesetzt. Die Maschine ist mit vier Ytterbium-Faserlasern ausgestattet, die einzeln angesteuert werden können. Während des Produktionsprozesses wird der Gasfluss in der Beschichtungskammer per Software dynamisch gesteuert. Schweißnebenprodukte werden durch das Gassystem aus dem Strahlengang des Lasers entfernt. Die Fertigungsmaschine zeichnet sich durch ein fortschrittliches Monitoringsystem aus, das speziell für die Erfassung und Analyse von Prozessemissionen während des Fertigungsprozesses entwickelt wurde. Es wird als „InfiniAM Spectral“ bezeichnet.

Das System verwendet ein Array aus mehreren Photodioden, um Prozessemissionen, die während des Schmelzvorgangs des Metallpulvers entstehen, zu erfassen. Durch die Erfassung und Auswertung der Emissionsintensität I kann das System Rückschlüsse auf die Stabilität des Schmelzbades, die Materialkonsistenz und mögliche Defekte wie Poren oder Risse ziehen. Durch die kontinuierliche Erfassung und Analyse von Prozessdaten können langfristige Muster und Optimierungspotenziale erkannt werden, die zu einer weiteren Effizienzsteigerung und Kostensenkung beitragen. Bild 1 stellt die Anordnung der Photodioden für einen einzelnen Laser dar [21].

Unterschieden wird zwischen zwei Teilsystemen: eines verantwortlich für die Aufnahme der Emissionen aus dem Schmelzbad („MeltVIEW“), das andere zuständig für die Erfassung der Laserstrahlung („LaserVIEW“). Der Laser (1) sendet einen Laserstrahl aus, welcher von einem festen Spiegel (11) reflektiert und durch ein dynamisches Fokussiersystem (12) geleitet wird. Ein kleiner Teil des Laserlichts passiert den festen Spiegel (11) und wird von der Photodiode (10) des LaserVIEW-Systems erfasst. Diese

Diode ist speziell auf die Wellenlänge des verwendeten Lasers $\lambda_L = 1070 \text{ nm}$ abgestimmt. Dies ist entscheidend für die Beurteilung der Energieverteilung und der Effizienz des Laserstrahls. Der vom Galvanometerspiegel (19) reflektierte Laserstrahl durchläuft ein optisches Fenster (16) und wird auf das Pulverbett (14) fokussiert. Durch die Erhitzung des Metallpulvers entstehen Schmelzbad (18), Plasma (17), Funken (13) und kleine Tröpfchen geschmolzenen Metalls (15).

Das Plasma emittiert hauptsächlich im sichtbaren Spektrum von $300 \text{ nm} \leq \lambda_{\text{Plasma}} \leq 700 \text{ nm}$, während das Schmelzbad hauptsächlich thermische Strahlung im nahen Infrarotbereich von $700 \text{ nm} \leq \lambda_{\text{Therm}} \leq 1700 \text{ nm}$ emittiert. Die sichtbaren Emissionen des Plasmas (17) werden mit Hilfe von Spiegeln (7, 8) von den infraroten Emissionen des Schmelzbades (18) getrennt. Die Plasmaemissionen werden von einer Photodiode für sichtbares Licht (4) erfasst, während die Emissionen des Schmelzbades von einer infrarotempfindlichen Photodiode (5) aufgenommen werden [21].

Dieser Aufbau ist an jedem der vier Laser der Fertigungsanlage angebracht, sodass eine Überwachung jedes einzelnen Lasers und der von ihm erzeugten Prozessemissionen möglich ist. Die Laser können individuell konfiguriert werden, sowohl in Bezug auf die Laserparameter als auch auf den Verfahrenweg. Diese flexible Konfigurationsmöglichkeit wird genutzt, um eine Fertigungsstrategie zu entwickeln, die eine Rückführung auf das Schweißrauchverhalten ermöglichen soll.

2.2 Fertigungsstrategie

Durch die Integration mehrerer Laser soll normalerweise die Produktivität der Anlage erhöht werden, da an vier Stellen des Bauraums gleichzeitig Bauteile gefertigt werden können. Im Regelfall erzeugt somit jeder Laser sein eigenes Schmelzbad, dessen Emissionen von dem InfiniAM Spectral System erfasst werden. Für den vorliegenden Versuch wird jedoch von dieser Fertigungsstrategie abgewichen. Nur ein Laser wird für die Erzeugung des Bauteils verantwortlich sein, während die restlichen Laser keine Leistung abgeben, sondern rein zur Erfassung der Prozessemissionen in der Nähe des Schmelzbades zuständig sind. **Bild 2** stellt den Versuchsaufbau mit Fokus auf der Positionierung der einzelnen Laser dar.

Für die Versuche werden einzelne Bahnen der Länge $L = 150 \text{ mm}$ schichtweise in der Mitte der Bauplatzform gedruckt. Die Fertigung der Bahnen erfolgt durch den ersten Laser mit einer Laserleistung $P_{L1} = 500 \text{ W}$ sowie einer Verweilzeit von $t_d = 60 \mu\text{s}$. Die Pulverschichtdicke beträgt $s_p = 30 \mu\text{m}$ und die Schutzgasrate $Q_{AR} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei dem Pulverwerkstoff handelt es sich um die Titanlegierung Ti6Al4V ELI-0406. Die restlichen Laser verfahren parallel zum ersten Laser, allerdings rechts und links versetzt sowie mit einer Laserleistung $P_{L2} = P_{L3} = P_{L4} = 0 \text{ W}$. Die Ausrichtung des zweiten und dritten Lasers wird mit $d_{12} = d_{13} = 2 \text{ mm}$ so gewählt, dass diese nahe genug am Schmelzbad sind, um dessen Emissionen zu erfassen.

Es wird von einer weitestgehend radialen Ausbreitung der Prozessemissionen ausgegangen, sodass die Photodioden beider Laser ein weitestgehend ähnliches Intensitätslevel aufzeigen sollten, solange der Schweißrauch nicht berücksichtigt wird und die Distanz zum Schmelzbad identisch ist. Der Gasfluss führt aber zu einer Ableitung des Schweißrauchs in Richtung der Absaugung, sodass nur die links positionierten Laser eine Beeinträchtigung

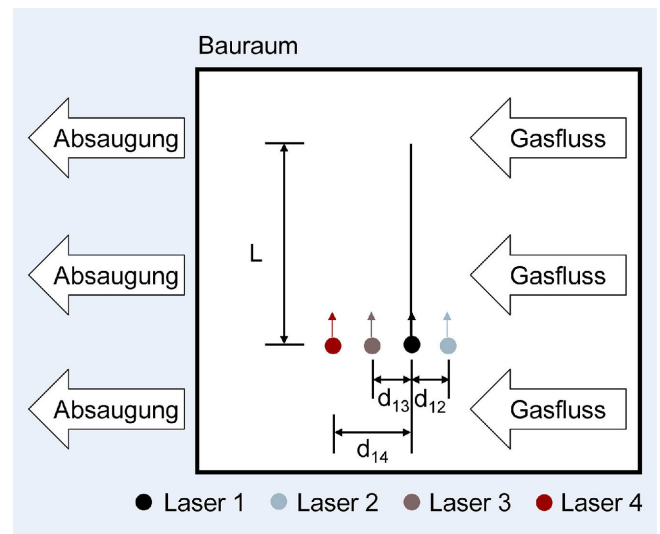


Bild 2. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.
Grafik: Eigene Darstellung

durch den Schweißrauch zu erwarten haben. Somit sollten die Photodioden des zweiten sowie dritten Lasers unterschiedliche Intensitätslevel aufweisen. Konkret werden sowohl für die Plasmaemissionen im sichtbaren Bereich als auch für die thermische Infrarotstrahlung mit einer Abschwächung der Intensität I durch den Schweißrauch gerechnet. Der Rauch blockiert nicht nur einen Teil des sichtbaren Lichts, sondern weist auch eine geringere Temperatur und Wärmestrahlung als das Schmelzbad auf [20]. Der vierte Laser wird mit $d_{14} = 3 \text{ mm}$ weiter entfernt als der dritte Laser, aber ebenfalls links vom Schmelzbad positioniert. Damit soll der Einfluss der Distanz auf das Messergebnis näher beleuchtet werden.

3 Analyse des Schweißraucheinflusses

3.1 Plasmaemissionen im sichtbaren Wellenlängenbereich

Die durch InfiniAM Spectral aufgenommenen Messdaten werden schichtweise analysiert. Die nachfolgende Auswertung eines potenziellen Einflusses des Schweißrauchs wird anhand der Prozessemissionen des MeltVIEW-Systems relevant. Es werden zunächst die Emissionsspektren im sichtbaren Wellenlängenbereich untersucht. Die Intensitätsverläufe der einzelnen Photodioden während des Laserschweißprozesses einer einzelnen Schicht sind in **Bild 3** dargestellt. Die Intensität I_{Plasma} wird unmittelbar durch die Plasmastrahlung hervorgerufen. Um das Rauschen des Messsignals zu verringern, werden die Verläufe geglättet dargestellt. Die geschieht mittels Mittelwertfilter.

Zunächst weisen alle Verläufe eine niedrige Startintensität $I_{\text{Plasma},0}$ auf, da der Laserschweißprozess noch nicht begonnen hat. Diese liegt ungefähr bei $I_{\text{Plasma},0} \approx 50$. Sobald der Prozess startet, steigt die Intensität I_{Plasma} der Signale aller Photodioden an. Dabei gibt es eine klare Abstufung der Intensitätslevel der einzelnen Photodioden. Das Signal der Photodiode des ersten Lasers verzeichnet die höchste Intensität $I_{\text{Plasma},1}$, wie es zu erwarten war, da die Emissionen direkt aus dem Schmelzbad aufgenommen werden. Die Intensität $I_{\text{Plasma},1}$ beschreibt demnach direkt die Ausgangsintensität der Quelle. Der Mittelwert des Signals während

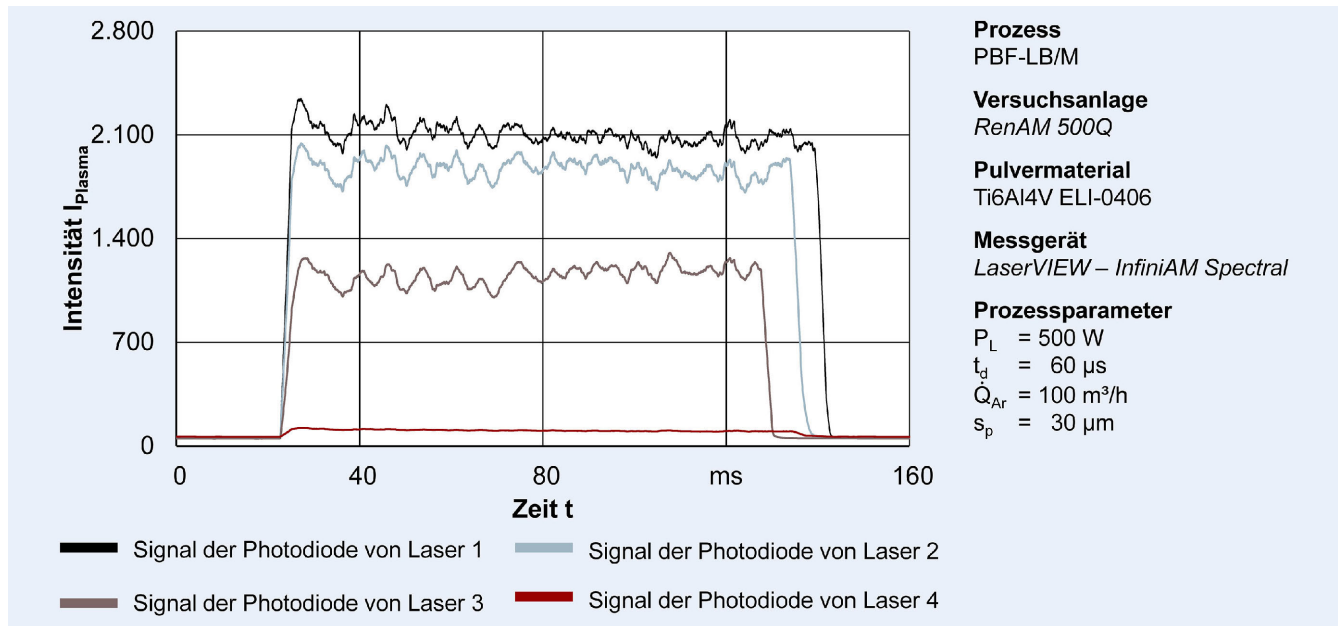


Bild 3. Intensitätsverläufe der Prozessemissionen im Bereich des sichtbaren Lichts. *Grafik: Eigene Darstellung*

des Laserschweißprozesses beträgt $I_{\text{Plasma},1} = 2098$. Das zweite Signal, mit einem Mittelwert von $I_{\text{Plasma},2} = 1873$, ist dem ersten sehr ähnlich, jedoch um etwa 10% abgeschwächt, was auf eine geringfügige Dämpfung der Ausgangsintensität $I_{\text{Plasma},1}$ hindeutet. Deutlicher ist der Unterschied beim dritten Signal, das mit einem Mittelwert von $I_{\text{Plasma},3} = 1154$ fast um die Hälfte schwächer ist als das erste Signal. Dies weist auf eine signifikante Dämpfung der Ausgangsintensität der Quelle $I_{\text{Plasma},1}$ hin. Das vierte Signal schließlich, mit einem Mittelwert von $I_{\text{Plasma},4} = 105$, ist extrem abgeschwächt und liegt bei nur etwa 5% der Intensität des stärksten Signals $I_{\text{Plasma},1}$, was auf eine sehr schwache oder stark gedämpfte Quelle schließen lässt.

Eine weitere Betrachtung der Verläufe zeigt, dass die Dauer Δt der vier Signale bis zum Abfall und Erreichen der Startintensität $I_{\text{Plasma},0}$ unterschiedlich ist. Das erste Signal, das direkt an der Quelle aufgenommen wird, hat die längste Dauer Δt , da es ohne Zeitverzögerung erfasst wird. Die anderen Signale haben kürzere Laufzeiten. Das zweite Signal endet früher als das erste, dauert aber länger als die beiden anderen. Das dritte Signal endet am frühesten von allen. Dieser zeitliche Verzug lässt auf eine mögliche Asynchronität der Startzeiten einzelner Laser und damit auf eine abweichende Positionierung entlang des Scanpfades schließen. Der dritte Laser verfährt einige Momente vor den anderen, sodass er den Zielpunkt früher erreicht und danach wieder in Ausgangsstellung verharrt. Dadurch liegt ebenfalls eine größere räumliche Distanz zwischen dem Schmelzbad und dem dritten Laser vor, als es vergleichsweise für den zweiten Laser der Fall ist. Wie die Intensitätsverläufe des vierten Signals, bei dem der Laser mit einem Abstand von $d_{1,4} = 3 \text{ mm}$ zum Schmelzbad verfährt, zeigen, führt eine räumliche Distanzierung zu einem exponentiellen Abfall der Signalintensität. Dieser Sachverhalt schließt nicht aus, dass ein gewisser Anteil der Intensitätsabschwächung durch den Schweißrauch hervorgerufen wird.

Im Rahmen zusätzlicher Analysen gilt es weitere, schichtbezogene Signalverläufe auf ähnliche Charakteristika zu untersuchen. Dadurch soll der Einfluss der räumlichen Distanz, resultierend aus der Asynchronität des Laserstarts, sowie der Einfluss des

Schweißrauchs besser quantifiziert werden. Für die gleiche Schicht sollen zunächst die Intensitätsverläufe resultierend aus der thermischen Strahlung I_{Therm} betrachtet werden.

3.2 Wärmestrahlung im Infrarotbereich

Die aufgenommenen Emissionen im Infrarotbereich resultieren im Wesentlichen aus der Wärmestrahlung durch Aufschmelzung des Pulvermaterials. Die Intensitätsverläufe der Signale der einzelnen Photodioden werden in **Bild 4** dargestellt.

Im Vergleich zu den zuvor diskutierten Plasmaemissionen im sichtbaren Bereich fällt die Abschwächung der Intensitätslevel deutlich stärker aus. Das Signal der Photodiode des ersten Lasers weist wiederum die höchste Intensität mit einem Mittelwert von $I_{\text{Therm},1} = 946$ auf. Die Intensität $I_{\text{Therm},1}$ steigt dabei kontinuierlich an und erreicht vor dem Abfall auf das Startlevel den höchsten Wert. Das zweite sowie dritte Signal weisen im Vergleich dazu stark abgeschwächte Intensitätslevel auf, mit Mittelwerten von $I_{\text{Therm},2} = 170$ und $I_{\text{Therm},3} = 121$. Die Intensität des dritten Signals ist weiterhin geringer als das der Photodiode des zweiten Lasers. Ein Signalanstieg der Photodiode, die sich am weitesten vom Schmelzbad entfernt befindet, ist kaum zu vermerken. Der Mittelwert liegt hier bei $I_{\text{Therm},4} = 68$. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass die Distanz des Empfängers zum Schmelzbad einen größeren Einfluss auf die ankommende Wärmestrahlung hat als es für den sichtbaren Bereich der Fall ist. Zwar fällt die Abschwächung der Signale stärker aus als für die vorangegangenen Plasma-Emissionen, trotzdem ist die Rangfolge analog zu den bisherigen Ergebnissen. Die Dauer der zeitlichen Verläufe zwischen Signalanstieg und Signalabfall weist ebenfalls keine Unterschiede in der Rangfolge auf. Wiederum dauert das zweite Signal länger als das dritte, sodass hieraus keine neuen Erkenntnisse entstehen.

Es gilt im Rahmen weiterer Untersuchungen die restlichen Schichtverläufe zu analysieren, um den quantitativen Einfluss einer Signalabschwächung durch den Schweißrauch zu ermitteln.

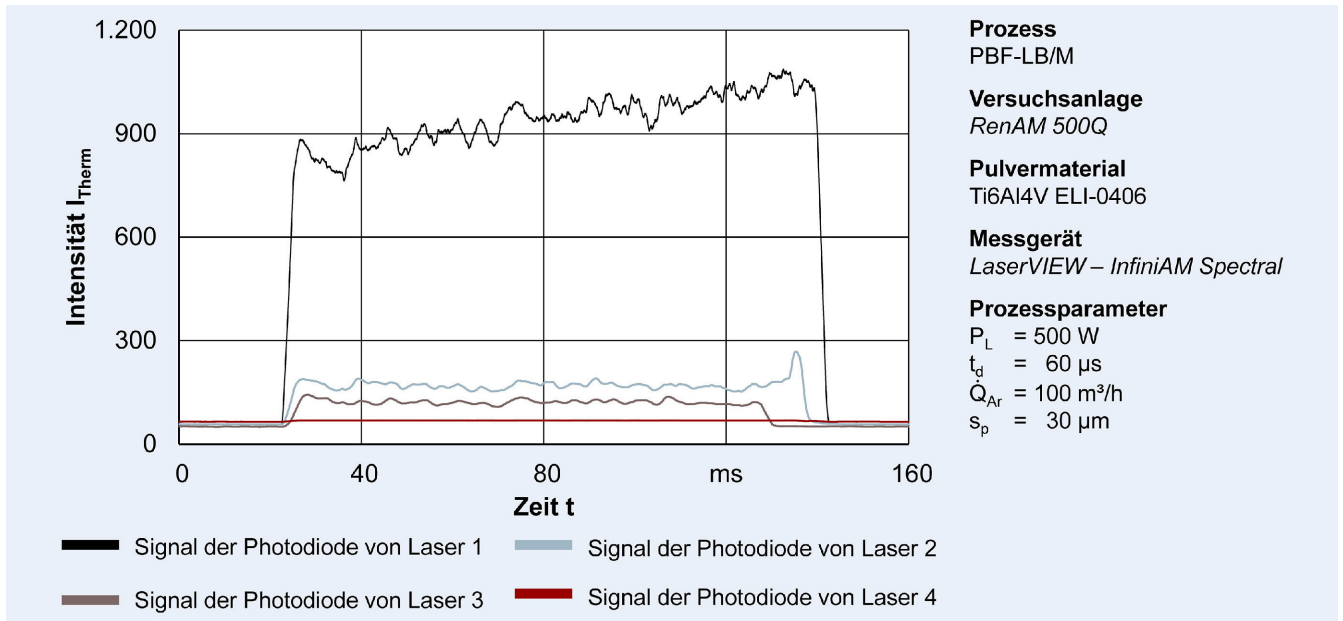


Bild 4. Intensitätsverläufe der Prozessemissionen im Infrarotbereich. Grafik: Eigene Darstellung

4 Zusammenfassung

Das InfiniAM-Spectral-Monitoringsystem der PBF-LB/M-Anlage „RenAM 500Q“ dient der Überwachung von Prozessemissionen im Schmelzbad. Durch eine geeignete Fertigungsstrategie konnten die Verfahrenswege der einzelnen Laser der Anlage so angepasst werden, dass auch Bereiche außerhalb des Schmelzbades erfasst werden. Es konnte gezeigt werden, dass bereits ein geringer Abstand zwischen Empfänger und Schmelzbad zu einer signifikanten Dämpfung der aufgenommenen Prozessemissionen führt. Dabei werden die Plasmaemissionen im sichtbaren Wellenlängenbereich noch weniger abgeschwächt als die Wärmestrahlung im Infrarotbereich.

Darüber hinaus wurde die Herausforderung deutlich, die Startzeitpunkte aller Laser zu synchronisieren. Bereits geringe Abweichungen im Bereich von wenigen Millisekunden können die resultierenden Eingangssignale stark beeinflussen. Eine quantitative Differenzierung der einzelnen Ursachen, die zur Signalabschwächung führen, kann aus den in dieser Studie untersuchten Messdaten nicht abgeleitet werden. Somit konnte der signaldämpfende Einfluss von Schweißrauch nicht bestätigt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Literatur

[1] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3405. Additive manufacturing processes, rapid manufacturing – Basics, definitions, processes. Berlin: Beuth Verlag 2014

- [2] Yadav, P.; Rigo, O.; Arvieu, C. et al.: In Situ Monitoring Systems of The SLM Process: On the Need to Develop Machine Learning Models for Data Processing. *Crystals* 10 (2020) 6, #524
- [3] Zhang, Y.; Hong, G. S.; Ye, D. et al.: Extraction and evaluation of melt pool, plume and spatter information for powder-bed fusion AM process monitoring. *Materials & Design* 156 (2018), pp. 458–469
- [4] Mani, M.; Lane, B.; Donmez, A. Feng, S. et al.: Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes. Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, National Institute of Standards and Technology 2015
- [5] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5. Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. Heidelberg: Springer Vieweg 2015
- [6] King, W. E.; Barth, H. D.; Castillo, V. M. et al.: Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 12, pp. 2915–2925
- [7] Madison, J. D.; Agesen, L. K.: Quantitative characterization of porosity in laser welds of stainless steel. *Scripta Materialia* 67 (2012) 9, pp. 783–786
- [8] Ladewig, A.; Schlick, G.; Fisser, M. et al.: Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing* 10 (2016), pp. 1–9
- [9] Zou, J.; Han, X.; Zhao, Y. et al.: Investigation on plume formation during fiber laser keyhole welding based on in-situ measurement of particles in plume. *Journal of Manufacturing Processes* 65 (2021), pp. 153–160
- [10] Zenzinger, G.; Bamberg, J.; Ladewig, A. et al.: Process monitoring of additive manufacturing by using optical tomography. *AIP Conference Proceedings* 1650 (2015), pp. 164–170
- [11] Liu, J.; Wen, P.: Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process. *Materials & Design* 215 (2022), doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110505
- [12] You, D. Y.; Gao, X. D.; Katayama, S.: Review of laser welding monitoring. *Science and Technology of Welding and Joining* 19 (2014) 3, pp. 181–201
- [13] Olsson, R.; Eriksson, I.; Powell, J. et al.: Challenges to the interpretation of the electromagnetic feedback from laser welding. *Optics and Lasers in Engineering* 49 (2011) 2, pp. 188–194
- [14] Patzke, R.: Schnelle und rauscharme Photonenmessung mit pin-Fotodioden. Stand: 2022. Internet: serwiss.bib.hs-hannover.de/fi

les/2315/patzke2022-photonenmessung_pin-fotodioden.pdf.
Zugriff am 26.07.2024

- [15] Sibillano, T.; Ancona, A.; Berardi, V. et al.: Correlation analysis in laser welding plasma. *Optics Communications* 251 (2005) 1–3, pp. 139–148
- [16] Kawahito, Y.; Kinoshita, K.; Matsumoto, N. et al.: Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser. *Science and Technology of Welding and Joining* 13 (2008) 8, pp. 749–753
- [17] Everton, S. K.; Hirsch, M.; Stravroulakis, P. et al.: Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design* 95 (2016), pp. 431–445
- [18] Brock, C.; Hohenstein, R.; Schmidt, M.: Optical 3D position sensor for the fast tracking of light sources. *Physics Procedia* 5 (2010), pp. 437–445
- [19] Bidare, P.; Bitharas, I.; Ward, R. M. et al.: Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion. *Acta Materialia* 142 (2018), pp. 107–120
- [20] Qin, Y.; Liu, J.; Chen, Y. et al.: Influence of Laser Energy Input and Shielding Gas Flow on Evaporation Fume during Laser Powder Bed Fusion of Zn Metal. *Materials* 14 (2021) 10, #2677 Renishaw plc.: Infi-AM Spectral – Energy input and melt pool emissions monitoring for AM systems. Firmenbroschüre, 2017



Manuel Bösing, M. Eng.

Foto: Fraunhofer IPK

Tel. +49 030 / 39006186

manuel.boesing@ipk.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Prof. Dr.-Ing. Julian Polte

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK

Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin

www.ipk.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Prof. Dr.-Ing. Julian Polte

Technische Universität Berlin

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb

Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)