

# Diagnostik zur Absicherung laserbasierter Fertigung

Die Diagnostik laserbasierter Fertigungsverfahren erlaubt es, über verschiedene online - Diagnoseverfahren, wie beispielsweise der Spektroskopie oder der Hochgeschwindigkeits-Videographie im visuellen oder im infraroten Spektralbereich, tiefgründiges Wissen über grundlegende Prozessmechanismen oder über die Entstehungsmechanismen von qualitätsbeeinflussenden Prozessinstabilitäten zu gewinnen. Dieses Wissen über die stationären, wie auch die instationären Verhältnisse während laserbasierter Fertigungsprozesse ist der Schlüssel zur Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses, welches wiederum zur Absicherung und Beherrschung von Serienprozessen und zur Etablierung von signifikanten Qualitätssicherungsmaßnahmen dient.

Laser werden in der Materialbearbeitung bereits seit vielen Jahren als zukunftsweisendes Werkzeug für verschiedenste Fertigungsverfahren propagiert. Um Laser für den Serieneinsatz in der industriellen Fertigung noch weiter zu etablieren, müssen die Prozesse zunächst prozesssicher beherrscht werden. Dies hängt nicht alleine vom Laser als verwendetem Werkzeug ab, sondern auch von sonstigen Randbedingungen, wie beispielsweise dem Werkstoff oder dem Reinigungszustand des Werkstücks.

Sind Prozess- und Maschinenfähigkeit nachgewiesen, ist es darüber hinaus erforderlich, geeignete Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu treffen, um die Bauteilqualität in der Serie auch bei lückenloser Überprüfung bestimmter Qualitätsmerkmale sicher zu stellen. Um hierbei die hohe Produktivität der Laserprozesse zu erhalten, und um nicht zusätzliche Prüfarbeitsgänge einführen zu müssen, wird üblicherweise eine online - Prozessüberwachung angestrebt. Hieraus ergeben sich nun drei konkrete Motivationsansätze für die diagnostische Untersuchung laserbasierter Fertigungsverfahren (Abb. 1): die Beherrschung, die Überwachung und die Simulation des Prozesses.

Durch die Diagnose erhält man zum einen klare Aussagen über geometrische oder physikalische Verhältnisse während eines Laserprozesses, beispielsweise Nahtgeometrien oder Wärmeflüsse beim Schweißen. Solche Informationen sind die notwendige Voraussetzung für belastbare Simulationen. Des Weiteren können die Auswirkung von Veränderungen der Prozessparameter auf stationäre und instationäre Zustände während der Materialbearbeitung visualisiert werden. Dies ermöglicht im Falle der stationären Prozesse eine Optimierung des Prozessfensters zugunsten reproduzierbarer stabiler Prozesse. Beim Auftreten instationärer Zustände im Prozess können Fehlerentstehungsmechanismen dargestellt und davon optimale Prozessüberwachungsstrategien abgeleitet werden.

## Multimodaler Ansatz zur Prozessdiagnose

Um während der Prozessdiagnose möglichst viele Informationen gleichzeitig aus einem Prozess zu gewinnen wird grundsätzlich ein multimodaler Diagnoseansatz angestrebt (s. Abb. 2). Hierbei kann beispielsweise im Falle des Laserstrahlschweißens eine Hochgeschwindigkeitskamera für den visuellen Bereich (1)

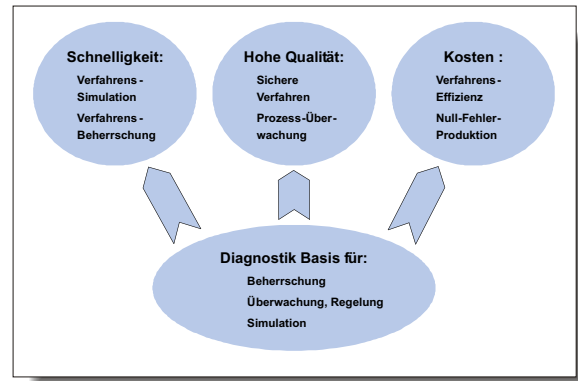


Abb. 1: Diagnostik als Basis für beherrschte und überwachte Prozesse sowie Simulation.

zur Darstellung der Dynamik der Schweißbadoberfläche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera für den infraroten Bereich (2) zur Visualisierung der Wärmeflüsse im Bauteil, einem zeitlich hoch auflösenden Spektrometer (3) zur Darstellung werkstoffbedingter Schwankung der spektralen Emission und einer Einheit zur Prozessüberwachung auf Einzeldetektor- und Kamerabasis (4) kombiniert werden.

## Absicherung laserbasierter Fertigungsverfahren

Eine zeitlich hoch auflösende, berührungsfreie online - Prozessüberwachung kann mit verschiedenen Ansätzen realisiert werden. Die Ansätze richten sich an den Indikatoren aus, welche durch den Bear-

beitungsprozess induziert werden. In der industriellen Praxis haben sich hierbei besonders optische Ansätze durchgesetzt. Zum einen entstehen sie in verschiedenen Wellenlängenbereichen, so können beispielsweise die Emissionen des Plasmas/Metaldampfes über dem Werkstück häufig im visuellen Bereich des Spektrums, Wärmestrahlungsanteile aus den Bereichen der Wechselwirkungszone im infraroten Spektralbereich gemessen werden. Eine Besonderheit stellt die zurückgestrahlte Laserleistung dar, die bei der jeweiligen Wellenlänge des benutzten Lasers Informationen über die Absorption der Laserstrahlung im Werkstück liefert. Zum anderen wird der Laserstrahl über

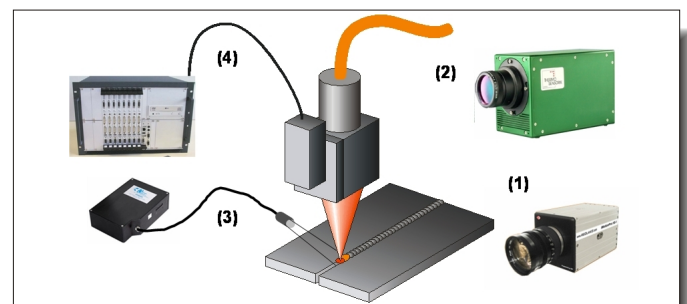


Abb. 2: Prozessdiagnose mit Hochgeschwindigkeitskameras im visuellen (1) und im infraroten (2) Wellenlängenbereich, Spektrometer (3) und Prozessüberwachungssystem (4).

optische Komponenten zur Wechselwirkungszone transportiert. Diese Komponenten können bereits häufig teilweise für den Aufbau eines optischen Messsystems genutzt werden.

Prinzipiell lassen sich die optischen Ansätze zur Prozessüberwachung in integrierende und orts aufgelöste System unterscheiden. Integrierende Systeme basieren auf einer geeigneten Photodiode, kombiniert mit einer optischen Filterung. Kamerabasierte Systeme liefern zusätzlich eine Ortsauflösung der entsprechenden Information, welche nicht mehr einfach als direktes analoges Signal über der Zeit aufgetragen werden kann. Zunächst müssen durch geeignete Algorithmen Formparameter aus dem Kamerabild extrahiert werden, hier dargestellt an einem Lasertiefschweißprozess (Abb. 3), die dann in ihrem zeitlichen Verlauf wiederum zur Identifikation von Qualitätsmängeln genutzt werden können.

Bislang konnte noch kein Durchbruch bei der online - Prozessüberwachung erzielt werden. Weder die Zuverlässigkeit der Fehlererkennung bei komplexen Aufgaben, noch die Vermeidung von so genannten „Pseudo-Fehlern“, d.h. fälschlich als Ausschuss deklarierte Bauteile, sind für die Anwender bislang befriedigend.

Komplexe Überwachungsaufgaben sind durch eine Vielzahl unterschiedlicher, gleichzeitig zu überwachender Qualitätsmerkmale gekennzeichnet. Oftmals lässt sich ein bestimmter Fehler mit einem Sensor sehr gut überwachen. Muß während der Bearbeitung aber ein weiterer Fehler detektiert werden, so ist dies mit demselben Sensortyp in den wenigsten Fällen möglich. Darüber hinaus gehen geringe Änderungen der Ausgangssituation sehr stark in die Zuverlässigkeit der Qualitätsaussage ein, wodurch ein eingelerntes Prozessüberwachungssystem sehr schnell Messwerte außerhalb der Toleranzgrenzen anzeigt, obwohl die eigentliche Schweißaufgabe durchaus zufrieden stellend ausgeführt wurde.

**Verständnis der Fehlerentstehungsmechanismen als Grundlage für zuverlässige Prozessüberwachung**

Die Herangehensweise bei der Qualifizierung von Prozessüberwachungssystemen für die Lasermaterialbearbeitung ist bislang oftmals sehr phänomenologisch geprägt. Eine Prozessemission, beispielsweise das Metaldampfleuchten über der Schweißkapillare wird als Indikator für ein bestimmtes Qualitätsmerkmal identifiziert. Ein entsprechendes Messsystem wird auf diesen Indikator zugeschnitten

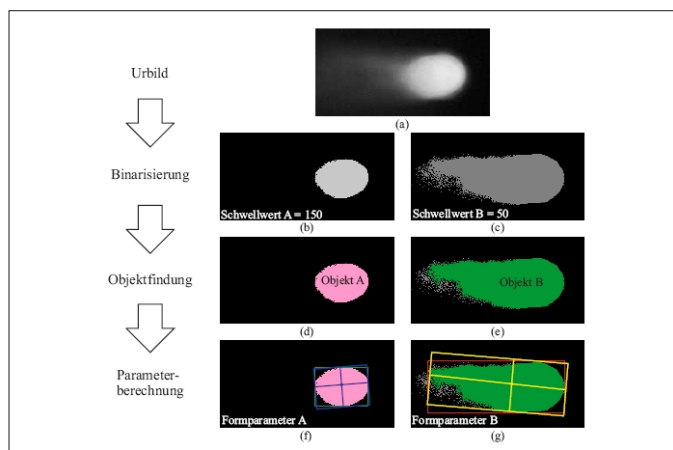


Abb. 3: Urbild (a) und daraus ermittelte Binärbilder (b), (d) des kapillarnahen Bereichs und (c), (e) des Schmelzbad aus denen Formparameter zur Prozesssteuerung ermittelt werden (f), (g).

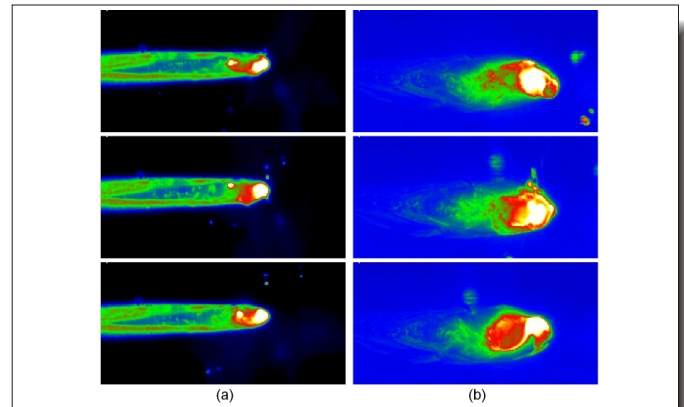


Abb. 4: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit einer Infrarotkamera zu verschiedenen Zeiten im Schweißprozess an Stahl (a) und Aluminium (b), bei einer Bildwiederholrate von 1700 Bildern pro Sekunde.

und für einen Bearbeitungsprozess parametrisiert und qualifiziert. Die grundlegende Mechanismen der Fehlerentstehung werden dabei häufig nicht eruiert oder berücksichtigt. Damit sind zwei grundlegende Probleme verbunden. Zum einen kann für ein bestimmtes Qualitätsmerkmal unter Umständen ein zu wenig aussagekräftiger Indikator gewählt werden, zum anderen wird das Prozessüberwachungssystem gegebenenfalls zu eng parametrisiert, so dass geringfügige, tolerierbare Abweichungen von den optimalen Prozessparametern bereits zu deutlich erhöhten Pseudo-fehlerraten führen können.

Die Gerätschaften des Diagnostikzentrums der FGSW werden gezielt eingesetzt, um ein grundlegendes Verständnis der Fehlerentstehung bei laserbasierten Fertigungsverfahren zu schaffen und die Auswirkung von Prozessschwankungen auf die Schwankung potenzieller Qualitätsindikatoren zu quantifizieren. Eine große Anzahl verschiedenartiger Diagnostikgeräte ermöglicht eine umfassende Generierung von grundlegendem Verständnis der stationären Prozesse und der stochastisch auftretenden Fehler bei verschiedensten Fertigungsverfahren. Bereits untersucht wurden verschiedene Fügeverfahren und das Bohren und Abtragen mit gepulsten Strahlquellen.

In Abbildung 4 sind diagnostische Untersuchungen an Schweißprozessen von Stahl (a) und Aluminium (b) mittels Hochgeschwindigkeitsuntersuchungen im infraroten Wellenlängenbereich dargestellt. Neben den Wärmeleitbedingungen können aus diesen Bildern auch Strömungsbelegungen der Schmelze abgelesen und Regionen unterschiedlicher Emission dargestellt werden.

Die Ausstattung des „Zentrums für Diagnostik laserbasierter Fertigungsverfahren“ kann auf der Homepage der FGSW unter [http://www.fgsw.de/diagnostikzentrum/de\\_ausstattung.php](http://www.fgsw.de/diagnostikzentrum/de_ausstattung.php) eingesehen werden (s.a. Laser Magazin 2/2005 und 4/2005).

**Institutsadresse:**  
 Institut für Strahlwerkzeuge  
 Pfaffenwaldring 43  
 70569 Stuttgart  
 Tel.: +49 (0)711 685 66840  
 Fax: +49 (0)711 685 66842  
<http://www.ifs.uni-stuttgart.de>

**Autor:**  
 Dipl.-Ing. Christoph Deininger  
[christoph.deininger@fgsw.de](mailto:christoph.deininger@fgsw.de)

**Kontakt / Redaktion:**  
 Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner  
 FGSW - Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH  
 Pfaffenwaldring 43  
 70569 Stuttgart  
 Tel.: +49 (0)711 351 451-28  
 Fax: +49 (0)711 351 451-29  
 E-Mail:  
[friedemann.lichtner@fgsw.de](mailto:friedemann.lichtner@fgsw.de)  
<http://www.fgsw.de>