



## Was zählt, sind die inneren Werte Hochgeschwindigkeits-Röntgendiagnostik beim Laserschweißen

Seit Herbst 2010 steht im Diagnostikzentrum des IFSW in Stuttgart eine Röntgenanlage zur Verfügung, mit der es erstmals in Europa möglich ist, hochauflösende Röntgenvideos im Multikilohertzbereich zu erstellen. Mit dieser Technologie ist es den Stuttgarter Wissenschaftlern nun möglich, die inneren Abläufe von Laserbearbeitungsprozessen direkt zu analysieren, was unschätzbare Vorteile gegenüber der konventionellen optischen Prozessdiagnostik bietet.

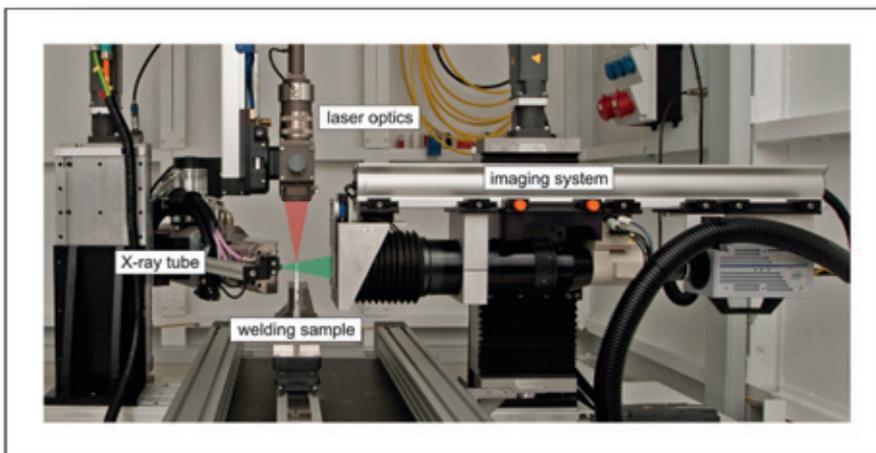


Abbildung 1: Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideo-System mit Röntgenröhre, Laseroptik, Werkstück und Bildwandler.

Prozessdiagnostik von Laserschweißprozessen, stellt, vor allem in Bezug auf die Röntgentechnik, sehr hohe Anforderungen an die Bildqualität und Bildwiederholrate. Da heutige Festkörperlaser hoher Brillanz sehr schlanke Schweißkapillaren in der Größenordnung von 100  $\mu\text{m}$  erzeugen und gleichzeitig hohe Vorschubgeschwindigkeiten von teilweise deutlich mehr als 10 m/min erlauben, muss das Röntgenvideosystem dazu in der Lage sein, diese kleinen Strukturen mit Bildraten von bis zu 10.000 Bildern pro Sekunde aufzuzeichnen. Diese Aufgabe ist insbesondere bei dicken Schweißproben oft nur schwer zu erfüllen.

Zwar stellt die Röntgentechnik bei der zerstörungsfreien Materialprüfung ein etabliertes Verfahren dar, das vor allem in Bezug auf die Bildqualität enorm leistungsfähig ist, doch sind am Markt keine Systeme verfügbar, die die Anforderungen an die benötigte Bildwiederholrate auch nur annähernd erfüllen würden. Diese Tatsache machte eine aufwändige Sonderentwicklung unabdingbar.

In einer mehrjährigen Zusammenarbeit von IFSW und dem Fraunhofer Ernst-Mach-Institut für Hochgeschwindigkeitsdynamik und mehreren Herstellern von

Komponenten für die Röntgentechnik konnte schließlich ein System entwickelt werden, das die ambitionierten Anforderungen an die benötigte örtliche und zeitliche Auflösung erfüllt.

Die Röntgenanlage besteht im Wesentlichen aus einer Mikrofokus Röntgenröhre, einem modularen Röntgendetektor und der Laseroptik zur Materialbearbeitung. Der Aufbau des Systems und die Lage der wesentlichen Komponenten ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Röntgenröhre kann im Mikrofokusbetrieb Röntgenstrahlung mit Beschleunigungsspannungen zwischen 10 kV und 225 kV bei einer elektrischen Leistung von bis zu 90 W erzeugen. In diesem Modus kann ein minimaler Emissionsfleck von etwa 6  $\mu\text{m}$  Durchmesser erreicht werden. Der große Einstellbereich der Beschleunigungsspannung ermöglicht hierbei die optimale Durchstrahlung von Werkstoffen sehr unterschiedlicher Dichte und Kernladungszahl, wie beispielsweise Aluminium oder Kupfer.

Der Röntgendetektor wandelt in einem mehrstufigen Aufbau die ankommende Röntgenstrahlung in sichtbares Licht, welches über zwei Optiken und einen Bildverstärker auf die Hochgeschwindig-

keitskamera übertragen wird. Der Röntgendetektor erlaubt Bildwiederholraten von bis zu 10.000 Hz und Auflösungen zwischen 384 x 352 und 768 x 768 Pixeln, abhängig von der gewählten Bildwiederholrate.

Das zu beobachtende Werkstück wird von einer Linearachse zwischen der Röntgenröhre und dem Detektor hindurchbewegt, während es von der sich über dem Werkstück befindlichen, Laseroptik bearbeitet wird.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes WELDone – betreut von Dr. Jan Weberpals – wurden einige der ersten Versuche mit der Röntgenanlage durchgeführt. Ziel dieser Versuchsreihe war die Qualifizierung einer In-Prozess Sensorik zur Vermessung der Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen von Edelstahl. Als Strahlquelle wurde

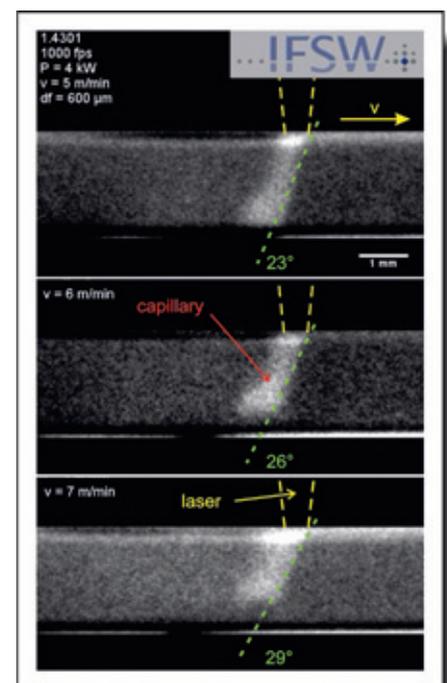


Abbildung 2: Vermessung der Keyholefront beim Laserstrahlschweißen von Edelstahl in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit.

ein lampengepumpter Nd:YAG Laser mit einer Leistung von 4 kW und einem Fokussdurchmesser von 600  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Röntgenaufnahmen in Abbildung 2 wurden mit einer Bildwiederholrate von 1.000 Hz und einer zu durchstrahlenden Probendicke von 5 mm aufgezeichnet. Durch die Röntgenuntersuchungen konnten die Messdaten der zu testenden Polarisationsensorik mit hoher Präzision bestätigt werden.

Im Elektro- und Automotivbereich, vor allem aber in der Disziplin der Elektromobilität, ist das Fügen von Kupfer und kupferbasierten Legierungen von großem Interesse. Jedoch besteht auf dem Gebiet des Laserschweißens noch vergleichsweise wenig Erfahrung mit dieser Werkstoffgruppe. Insbesondere die hohe Wärmeleitfähigkeit und die hohe Reflektivität bereiten hier teils gravierende Schwierigkeiten. Um die entsprechenden Prozessgrundlagen für prozesssicheres Laserschweißen von Kupferlegierungen zu schaffen läuft derzeit am Institut für Strahlwerkzeuge das vom BMBF geförderte Projekt CuBriLas. Unter der Leitung von Dipl.-Ing. Axel Hess wird in diesem Projekt, neben neuartigen Strahlkombinations- und Modulationsverfahren, auch die Kapillarausbildung mittels der Röntgenanlage untersucht.

In Abbildung 3 ist der Einfluss einer Variation des Vorschubs auf die Form des

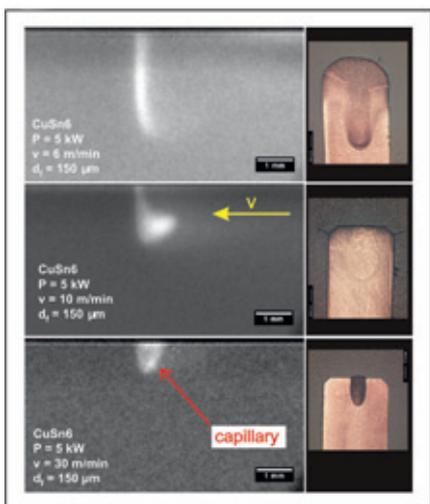


Abbildung 3: Laserschweißungen in Bronze. Der Vorschub nimmt von oben nach unten zu (6 m/min, 10 m/min, 30 m/min). Rechts sind die jeweiligen Querschliffe der entstehenden Nähte dargestellt.

Keyholes und des resultierenden Nahtquerschnitts in Bronze dargestellt. Bei einem langsamen Vorschub von 6 m/min bildet sich eine schlanke und sehr tiefe Dampfkapillare aus, die zu einem tiefen U-förmigen Nahtquerschnitt führt. Wird der Vorschub auf 10 m/min gesteigert, bildet sich eine, im unteren Teil nach hinten ausbauchende, Kapillare aus, die im Nahtquerschnitt zu einer ausgeprägten Tropfenform führt. Bei einer Geschwindigkeit von 30 m/min bildet sich schließlich nur noch ein wenig tiefes, dreiecksförmiges Keyhole aus, das keine ausgeprägten Ausbauchungen mehr zeigt. Dies schlägt sich auch im resultierenden Nahtquerschnitt nieder, der kaum mehr eine Tropfenform erkennen lässt.

Beim Laserschweißen von Aluminium treten, abhängig von der geschweißten Legierung, häufig Poren in der Schweißnaht auf. Hierbei ist die Kapillar- und Schmelzbaddynamik von entscheidender Bedeutung, da sich Poren häufig durch ein Abschnüren der Dampfkapillare bilden. Zur Visualisierung von Strömungen im Schmelzbad bietet es sich an, sogenannte Feststofftracer in den Prozess einzubringen, da diese im Röntgenfilm als einzelne Partikel erkennbar sind und somit eine Analyse der vorherrschenden Strömungen ermöglichen.

Abbildung 4 zeigt eine Bildfolge einer Laserschweißung in Aluminium, in der der Laserstrahl gerade ein Reservoir mit Wolframcarbid-Partikeln überfährt. In den Einzelbildern, deren Abstand jeweils 25 ms beträgt, ist zu erkennen, wie sich die Partikel mit dem Schmelzbad bewegen. Das Röntgenvideo wurde mit einer Bildrate von 1.000 Hz aufgezeichnet. Geschweißt wurde mit einem TruDisk 5001, der mit einer 200  $\mu\text{m}$  Transportfaser einen Fokussdurchmesser von 560  $\mu\text{m}$ , bei einer Laserleistung von 5 kW und einem Vorschub von 5 m/min, erzeugt.

Die bisher erzielten Ergebnisse demonstrieren auf beeindruckende Weise das Potential dieser besonderen Technologie. Jedoch steht die Hochgeschwindigkeits-Röntgentechnik erst am Anfang eines Optimierungsprozesses, der ihre Stärken in vollem Umfang nutzbar machen soll. Dies beinhaltet einerseits die Verbesserung der bildgebenden Technik, sowie die optimale Verarbeitung der Rohdaten

und andererseits die Entwicklung automatisierter Auswertemethoden des entstehenden Bildmaterials.

Besonderen Dank möchten wir der YXLON International GmbH und der Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH für die technische Unterstützung und den hervorragenden Service aussprechen.

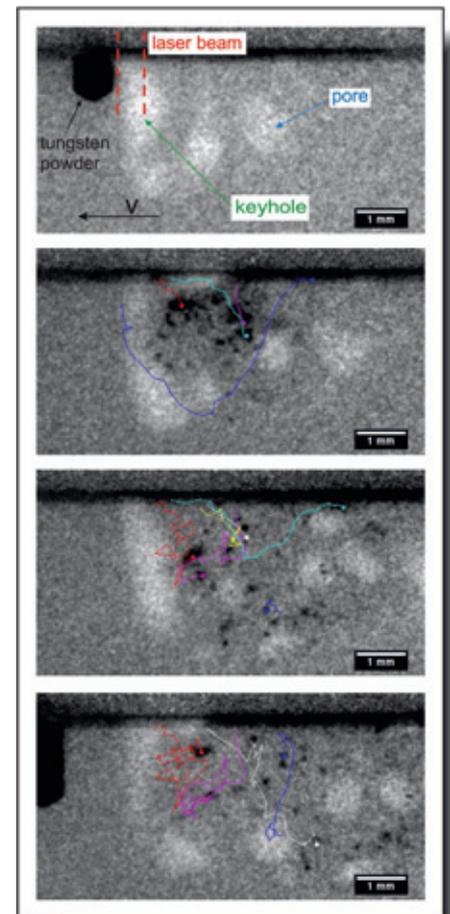


Abbildung 4: Schweißung in Aluminium. Als Tracer kommen Wolframpartikel zum Einsatz.

#### Autor:

Dipl.-Ing. Felix Abt  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 43  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 69760  
E-Mail: felix.abt@ifsw.uni-stuttgart.de

#### Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Phys. Jan-Philipp Negel  
Tel.: +49 (0)711 685 69721  
Fax: +49 (0)711 685 59721  
E-Mail: jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de