

# Nutzung der Polarisation der Wärmestrahlung zur Detektion von 3D-Strukturen

Vor allem thermische Bearbeitungsverfahren finden in der Materialverarbeitung in vielerlei Varianten Anwendung. Neben klassischen Schweißverfahren finden heutzutage vor allem Lasersysteme immer mehr Eingang in eine schnelle, präzise und automatisierte Materialbearbeitung. Aktuelle Lasersysteme mit hoher Brillanz bieten in vielen Anwendungsfeldern ein hohes Innovationspotenzial, beispielsweise hinsichtlich erzielbarer Prozessgeschwindigkeit oder der Möglichkeit, auch bei geringen Werkstoffdicken die Einschweißtiefe genau einzustellen. Die Nutzung dieser Vorteile ist jedoch eingeschränkt, da sich die Prozessfenster bei steigender Prozessgeschwindigkeit deutlich verkleinern. Folglich können sie bereits durch kleine Schwankungen der Prozessparameter, durch geringfügige Änderungen in der Systemtechnik sowie durch Bauteiltoleranzen verlassen werden. Gerade die Automatisierung solcher thermischer Bearbeitungsverfahren stellt hohe Anforderungen an eine Überwachung und Kontrolle der Bearbeitungsqualität.



Abb. 1.: Wärmebild eines Schmelzbades (CMOS-Kamera)

Die Kenntnis über den wesentlichen Einfluss der Laserstrahlparameter auf die Kapillargeometrie und damit einhergehend auf die erzielbare Einschweißtiefe trägt zu einem fundierten Prozessverständnis bei. Allerdings bestimmt die Geometrie der Schweißnaht gleichermaßen die Qualität und damit die Festigkeit einer Schweißverbindung. Insbesondere Vertiefungen, Randkerben und durchgehende Löcher können die Festigkeit wesentlich vermindern und nicht mit hinreichender Zuverlässigkeit detektiert werden. Zur 3D-Erfassung der Naht hat sich die Triangulation bei bisherigen Untersuchungen zwar als genau, aber nicht immer als aussagefähig erwiesen. Insbesondere Vertiefungen können oft nur schwer entdeckt oder bewertet werden, da Strahlung durch Fremdbeleuchtung in Vertiefungen sehr gut absorbiert wird und deshalb das Signal im Bereich von Vertiefungen kaum zu detektieren ist. Umgekehrt kann die Tatsache genutzt werden, dass die Emission heißer (strahlender) Oberflächen gerade in solchen Bereichen sehr groß ist, siehe deutlich sichtbare Randkerben in Abb. 1. Eine zuverlässige Überprüfung der thermischen Bearbeitungsverfahren ist daher von entscheidender Bedeutung für die Qualitätssicherung.

## Grundlagen zur Wärmestrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt emittiert thermische Strahlung, welche polarisiert ist. Neben der wachsenden Intensität der Strahlung mit steigender Temperatur verschiebt sich auch die spektrale Verteilung zu kürzeren Wellenlängen. Die spektrale Strahlungsdichte eines Schwarzkörperstrahlers bei einer Temperatur  $T$  und einer Wellenlänge  $\lambda$  kann durch das Planck'sche Gesetz beschrieben werden. Ein so genannter Schwarzer Körper bezeichnet eine ideale Oberfläche, die das gesamte eintreffende Licht unabhängig von der Wellenlänge und der Strahlungsrichtung absorbiert. In gleicher Weise ist in einem Schwarzkörperstrahler die ausgesandte Strahlung unabhängig von der Strahlungsrichtung und beschreibt ein Maximum, welches von einer realen Oberfläche nicht erreicht werden kann. Das Verhältnis zwischen der Strahlungsdichte einer realen Oberfläche und der eines Schwarzkörperstrahlers wird durch den spektralen Emissionsgrad  $\epsilon$  zum Ausdruck gebracht. Dieser hängt von der Wellenlänge  $\lambda$  und der Oberflächentemperatur  $T$ , den Oberflächenbedingungen wie Rauigkeit oder Oxidation sowie dem verwendeten Material ab. Ferner wird das Emissionsvermögen einer realen Oberfläche durch den Abstrahlwinkel  $\beta$  und den Polarisationszustand (p- und s-polarisiert) bestimmt.

## Funktionsweise des Sensorkonzepts

Bei einer Wellenlänge im Bereich zwischen  $0,5 \mu\text{m}$  und  $2 \mu\text{m}$  zeigt die Emission eine starke Abhängigkeit vom Ab-

strahlwinkel  $\beta$  (Winkel zwischen Abstrahlrichtung und Flächennormalen) und dem Polarisationszustand des Beobachtungsstrahls, siehe Abb. 2. Diese Eigenschaft kann zur Winkelbestimmung von Oberflächen herangezogen werden.

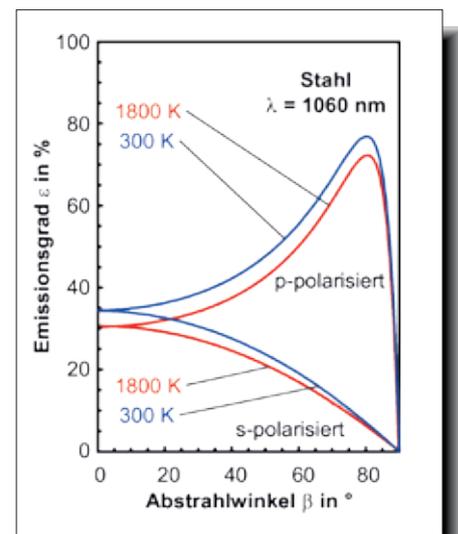


Abb. 2: Einfluss von Abstrahlwinkel  $\beta$ , Polarisationszustand und Temperatur  $T$  auf den Emissionsgrad  $\epsilon$

Bei einem Vergleich der erfassten thermischen Strahlung für die beiden unterschiedlichen Polarisierungen kann die Eigenschaft, dass nur die zur Oberfläche parallel polarisierte Strahlung eine starke Winkelabhängigkeit aufweist, ferner auch zur Bestimmung der Orientierungskomponente senkrecht zur Beobachtungsrichtung genutzt werden. Für eine eindeutige Erkennung geneigter Oberflächen scheint es sinnvoll, nicht die Emissionen direkt, sondern den Quotienten zwischen den Emissionen

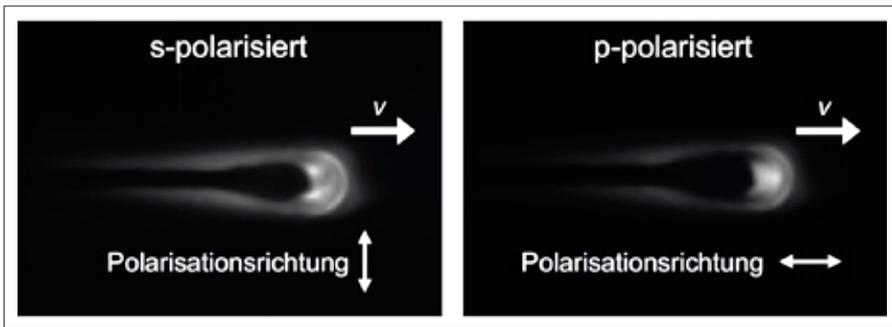


Abb. 3: Ortsaufgelöste Bilddatensätze für zwei Polarisationszustände

mit paralleler und senkrechter Polarisation zu nutzen, da durch ein Quotientenbild der Kontrast zur Umgebung verstärkt und der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen im Beobachtungsfeld minimiert wird. Vor allem Oberflächen-

strukturen mit großen Abstrahlwinkeln, wie sie bei Strukturfehlern in Form von Löchern, Poren, Kerben, Rissen und dergleichen regelmäßig auftreten, können damit sehr zuverlässig aus den erfassten Abstrahlungen mit den beiden Polarisierungen abgeleitet und damit detektiert werden. In Kombination mit einer für die Beobachtungswellenlänge geeigneten Kamera und einer Auswertesoftware für die Datenverarbeitung ist schlussendlich eine dreidimensionale Orts- und Zeitauflösung der Schmelzoberfläche inklusive der Kapillargeometrie möglich (angemeldetes Patent).

#### Detektion von 3D-Strukturen

In Abb. 3 sind ortsaufgelöste Bilddatensätze für zwei Beobachtungsstrahlen unterschiedlicher Polarisation (senkrecht und parallel) dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Visualisierung eines Dampfdruckschmelzschneidprozesses ( $t=1,5$  mm;  $v=3,5$  m/min;  $P_L=4$  kW), bei dem der Laserstrahl relativ zum Werkstück bewegt wird. Dabei ist in beiden Bilddatensätzen deutlich die durch den Laserbearbeitungsprozess entstehende, sich in das Werkstück hinein erstrecken-

de, Schnittfront zu erkennen, welche sich aufgrund der Vorwärtsbewegung des Laserstrahls neigt. Die Schnittflanken weisen daher einen kontinuierlichen Übergang verschiedener Neigungswinkel relativ zur Einstrahlrichtung auf.

Diese unterschiedlichen Neigungswinkel spiegeln sich in der unterschiedlichen Intensität der beiden Strahlungskomponenten wider. Während bei der senkrechten Polarisation die Schnittflanken besonders intensiv erscheinen, weist bei der parallelen Polarisation die vordere Flanke ein Emissionsmaximum auf.

Die anschließende Datenverarbeitung der ortsaufgelösten Bilddatensätze (Abb. 3) lässt zwei mögliche Quotientenbilder zu, siehe Abb. 4. Dabei kann in Abhängigkeit der Quotientenbildung ein „p- oder s-dominantes“ Quotientenbild erzeugt werden. Bei einem Abstrahlwinkel von  $\beta = 0^\circ$  beträgt der Emissionsquotient jeweils eins (vgl. Abb. 2) und entspricht in Abb. 4 dem Grauwert weiß. Je größer der Emissionsquotient, desto dunkler der Grauwert und damit einhergehend größer der Abstrahlwinkel  $\beta$ . Damit lässt sich die Oberflächenstruktur, insbesondere ein Neigungswinkel oder dessen unerwünschte Änderung während eines Bearbeitungsprozesses lokal sehr gut überwachen.

Für die Zuordnung des Abstrahlwinkels

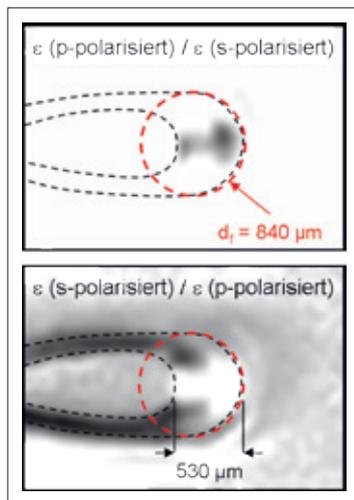


Abb. 4: Berechnete Quotientenbilder aus den Bilddatensätzen der beiden Polarisationszustände

$\beta$  zu einem berechneten Grauwert im Quotientenbild (vgl. Abb. 4) wurde eine Versuchsreihe mit einem variierenden seitlichen Einstrahlwinkel  $\gamma$  des Bearbeitungslaserstrahls durchgeführt. Bei einem Wärmeleitungsschweißprozess (ebene Schmelzoberfläche ist parallel zur Werkstückoberseite) und einer koxialen Prozessbeobachtung mit der vorgestellten Sensorik entspricht der Einstrahlwinkel  $\gamma$  dem Abstrahlwinkel  $\beta$ . Somit kann der materialabhängige Emissionsquotient eindeutig einem Abstrahlwinkel  $\beta$  zugeordnet werden, welcher in Abb. 5 für Edelstahl (1.4301) dargestellt ist.

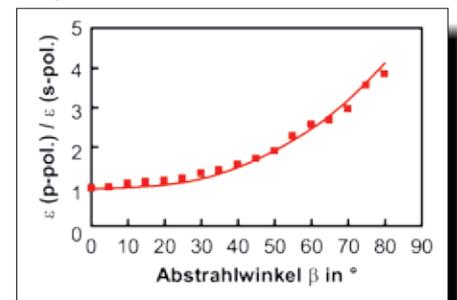


Abb. 5: Ermittelter Emissionsquotient aus p- und s-polarisierter Strahlung bei variierendem Abstrahlwinkel  $\beta$

Der maximale Emissionsquotient an der geneigten Schnittfront in Abb. 4 ist drei, was nach Abb. 5 einem Abstrahlwinkel  $\beta$  und somit einer Schnittfrontneigung von  $\alpha = 70^\circ$  entspricht. Dieser Neigungswinkel wird ebenfalls durch eine vereinfachte trigonometrische Abschätzung anhand der Materialdicke und der projizierten Schnittfrontlänge bestätigt. Neben der Möglichkeit, Neigungen von Kapillaren zu bestimmen, lassen sich mit dieser Prozesssensorik auch Schmelzbadstrukturen oder entstehende Nahtfehler während der Lasermaterialbearbeitung beobachten und durch eine Prozesskontrolle unterbinden.

#### Institutsadresse:

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

#### Autor:

Dr.-Ing. Jan-Philipp Weberpals  
E-Mail: [jan.weberpals@ifsw.uni-stuttgart.de](mailto:jan.weberpals@ifsw.uni-stuttgart.de)