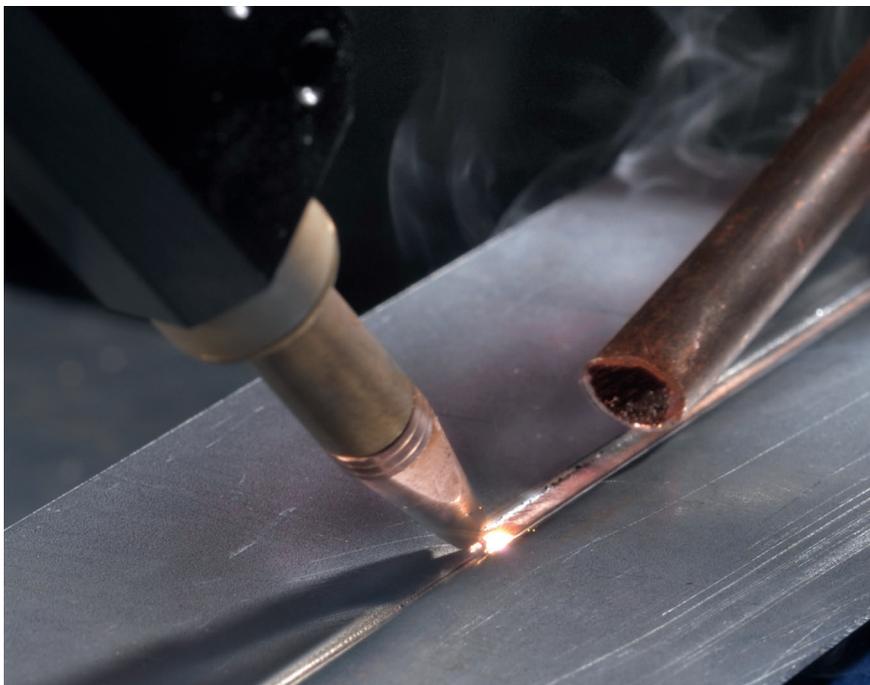


Identifikation von Prozessfehlern

KI-basierte Prozessüberwachung von Laserstrahl-Schweißnähten

Die in-situ Überwachung des Laserschweißens und die Echtzeitdatenverarbeitung stellen eine besondere Herausforderung dar. Nun ermöglicht eine KI-basierte Prozessüberwachung in Echtzeit z.B. die automatisierte Bewertung von Schweißnähten an Automobilbauteilen. Das Verfahren und die Auswertestrategie lassen sich auf Bearbeitungsprozesse innerhalb und außerhalb der Lasertechnik übertragen.

Christian Knaak und Peter Abels



© Fraunhofer ILT

In der Materialbearbeitung lassen sich mit einem Laser die Fertigungsabläufe automatisieren. Aufgrund seiner Präzision, Flexibilität und Geschwindigkeit wird der Laser insbesondere in der Automobilfertigung eingesetzt. Die Nutzung von Synergieeffekten im optischen Aufbau des Lasers erlaubt die einfache Integration komplexer Sensoren wie Kameras oder Spektrometer in den Bearbeitungskopf.

Das ermöglicht während des Laserschweißens die in-situ Überwachung des Fertigungsprozesses zur Detektion bauteil-

kritischer Qualitätsabweichungen, wie zum Beispiel Bindefehler, Poren oder kosmetische Nahtunregelmäßigkeiten [1].

Neben der Echtzeitdatenverarbeitung stellt die Generierung eines aussagekräftigen Fingerabdruckes des aktuellen Prozesszustandes eine besondere Herausforderung dar. Wird die Prozesszone beispielsweise mit einer Kamera beobachtet, stellt sich die Frage, welche Informationen im erfassten Datenstrom relevant sind und somit den aktuellen Prozesszustand möglichst präzise beschreiben. Dabei sind in der

Praxis häufig mehrere unterschiedliche Sensordatenströme während des Prozesses zu analysieren, um unter Verwendung von Künstliche-Intelligenz(KI)-Systemen die Einteilung des aktuellen Prozesszustandes in eine definierte Qualitätskategorie zu ermöglichen.

Im vorliegenden Anwendungsfall des Laserstrahlschweißens verzinkter Bleche werden mit Hilfe unterschiedlicher Sensoren und Methoden des maschinellen Lernens unterschiedliche Schweißnahtfehler während der Bearbeitung identifiziert.

Erkennung der Schweißfehler während der Bearbeitung

Zur Erkennung der Schweißfehler während der Bearbeitung ist ein Infrarot – Kamerasystem in eine Bearbeitungsoptik zur in-situ Inspektion integriert. Aufgrund der kurzen Interaktionszeiten zwischen Laser und Material sind Kameras mit niedriger Bildwiederholfrequenz häufig ungeeignet, um Laserschweißprozesse zu überwachen, da sie kurzfristige Prozessschwankungen nur unzureichend abbilden können [2].

Die verwendete Kamera zeichnet sich durch ihre spektrale Empfindlichkeit im Bereich von 1 bis 5 μm und ihre hohe Aufnahmegeschwindigkeit von 1000 Hz aus. Mithilfe optischer Komponenten wird die aus der Laserwechselwirkungszone emittierte Wärmestrahlung, koaxial zum Laserstrahl auf den Sensor der Wärmebildkamera ab-

gebildet. Das auf diese Weise erfasste Wärmebild (Bild 1) liefert Informationen über das Keyhole, einer durch die Laserstrahlung induzierten Dampfkapillare im Material, das den Laserstrahl tiefschweißprozess charakterisiert. Zusätzlich sind das Schmelzbad sowie dessen Abkühlverhalten im Wärmebild erkennbar.

Für den Nutzer an einer Maschine im Produktionsbetrieb, aber auch für die zur Anwendung kommenden KI-Verfahren, ist es von Vorteil, wenn aus den erfassten Bild-daten zunächst charakteristische Merkmale abgeleitet und zu einem Prozessfingerabdruck zusammengefügt werden. Hier eignen sich beispielsweise Verfahren der Bildverarbeitung, um die Geometrie der Dampfkapillare und des Schmelzbades mit Hilfe einfacher geometrischer Formen wie einer Ellipse zu beschreiben.

Um zusätzliche Informationen über die Wärmeverteilung bezüglich der Schmelzbadoberfläche zu gewinnen, bietet es sich an, statistische Kennzahlen, wie Varianz, Wölbung, Schiefe und Mittelwert in den unterschiedlichen Bildbereichen zu bestimmen.

Eine weitere Quelle für geeignete Prozessmerkmale ist der zeitliche Verlauf bzw. die zeitliche Veränderung bestimmter Bildcharakteristika. So kann zum Beispiel die zeitliche Varianz der Dampfkapillargröße ein Maß für ihre Stabilität sein und Aufschluss über entstehende Porenester geben [3]. Schließlich setzt sich der Prozessfingerabdruck aus mehreren Merkmalen wie beispielsweise der Abkühlrate der flüssigen Schmelze, der Schmelzbadoberflächen-geometrie sowie der Form der Dampfkapillare und deren zeitlichen Änderung zusammen. Die Ermittlung der Merkmale ist rechen-

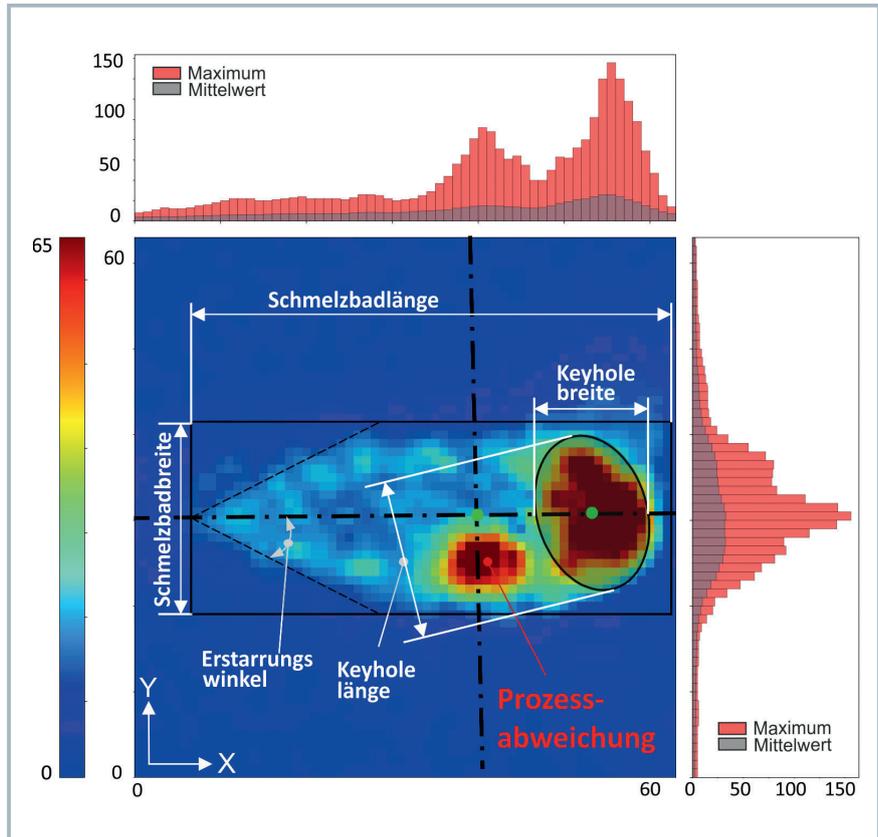


Bild 1. Wärmebild der Laserwechselwirkungszone und charakteristische Merkmale (© Fraunhofer ILT)

tensiv und für die Echtzeitanwendung mit einem Field Programmable Gate Array (FPGA) realisiert, in welchem Berechnungen parallelisiert ausgeführt werden können. Das FPGA berechnet unmittelbar nach der Bildakquisition den Prozessfinderabdruck für jedes aufgenommene Wärmebild.

Im nächsten Schritt werden im Laborbetrieb Schweißversuche durchgeführt, bei denen unterschiedliche Nahtimperfectionen während des Schweißens auftreten:

- Kategorie 1: Naht i.O. (keine Auffälligkeiten),
- Kategorie 2: Nahteinfall,
- Kategorie 3: Bindefehler („Falscher Freund“),
- Kategorie 4: Nahtbreite erhöht,
- Kategorie 5: Keine Naht.

Für den Fall des Laserstrahlschweißens wurden unter anderem Bindefehler, sogenannte „falsche Freunde“, erzeugt sowie Nahteinfälle provoziert. Die extrahierten Prozessfingerabdrücke werden entsprechend ihrer zugehörigen Schweißnahtqualität manuell durch Experten kategorisiert.

Unter Verwendung eines speziellen Verfahrens, der Sequential-Forward-Floating-Selection, kann zusätzlich die >>>

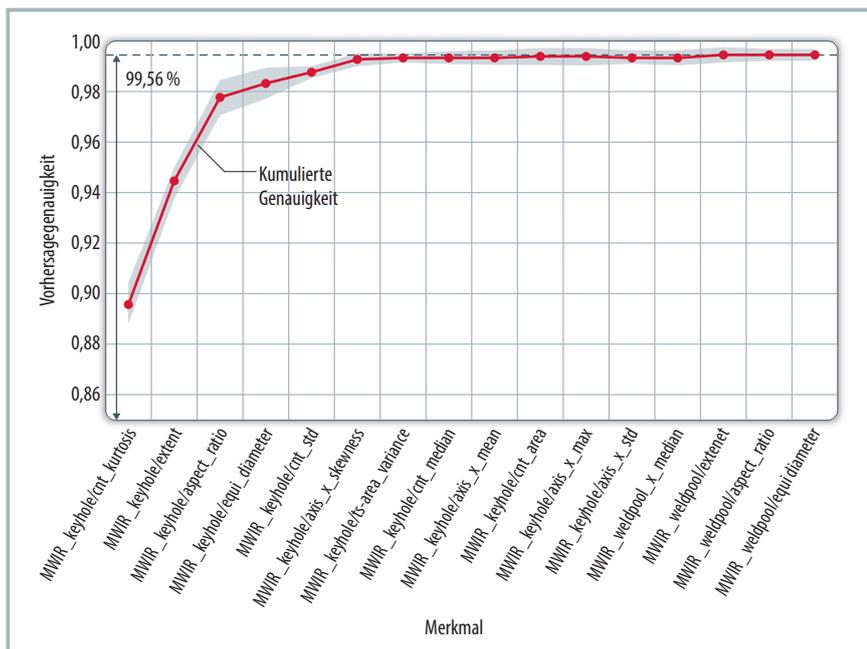


Bild 2. Evaluierung der Bildmerkmale basierend auf Sequential-Forward-Floating-Selection

Quelle: Fraunhofer ILT, Grafik: © Hanser

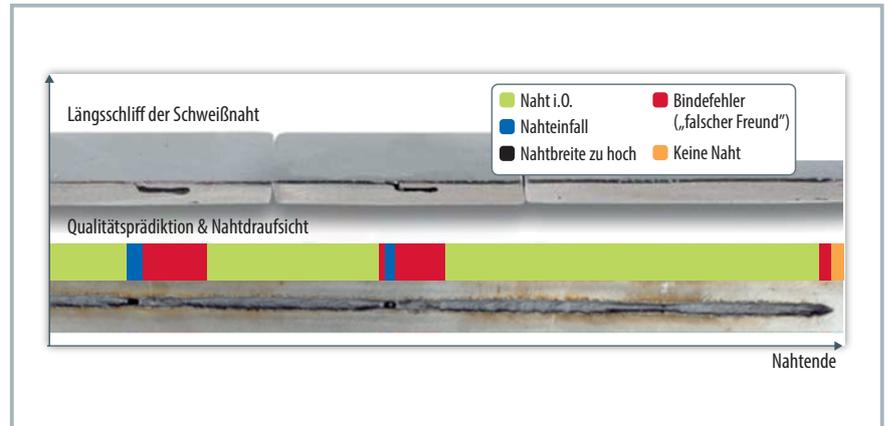


Bild 3. Qualitätsbewertung einer Schweißnaht mittels KI-Methode Quelle: Fraunhofer ILT, Grafik: © Hanser

Wichtigkeit der verwendeten Merkmale bestimmt werden. Dies erlaubt neben der Aussortierung von redundanten und unwichtigen Prozessmerkmalen, auch eine Abschätzung darüber, welche Informationen aus den verschiedenen Bereichen der Prozesszone für die Erkennung der Nahtimperfectionen von Bedeutung sind [4].

In Bild 2 ist diese Bewertung für die aus den Wärmebilddaten extrahierten Merkmalen dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass mindestens sechs Merkmale erforderlich sind, um eine Erkennungsrate von über 99 Prozent zu erreichen. Das Verfahren stuft Merkmale aus dem Keyhole-Bereich im Vergleich als relevanteste Merkmale ein.

Im darauffolgenden Schritt nutzt ein Lernalgorithmus diese Daten, um Regeln zur Einteilung der Prozessfingerabdrücke in eine Qualitätskategorie abzuleiten. Anschließend können die Regeln, in Form eines trainierten Klassifizierers, zur Bewertung weiterer Schweißprozesse verwendet.

Bild 3 zeigt eine solche Bewertung einer Schweißnaht, bestehend aus zwei verzinkten Kaltumformstahlblechen (0,9 mm Dicke pro Blech). Der Klassifizierungsalgorithmus erkennt an spezifischen Stellen der Naht, basierend auf etwa 4.000 Prozessfingerabdrücken, welche aus den Wärmebilddaten extrahierten wurden, die jeweiligen Eigenschaften.

Beispielsweise wurden Bindefehler (Bild 3, rote Abschnitte) erkannt, welche in der Draufsicht nicht sichtbar sind, jedoch in einem entsprechenden Längsschliff dargestellt werden können. Weitere Imperfektionen wie „Nahtdefekt“ und das Fehlen der Naht können vom KI-System differenziert erkannt werden.

Verfahren auf andere Bearbeitungsprozesse übertragbar

Die in-situ Prozessbeobachtung mittels Hochgeschwindigkeits-Wärmebildgebung erlaubt die detaillierte Erfassung der Wechselwirkungszone des Laserschweißprozesses. In Kombination mit Methoden des maschinellen Lernens ergibt sich die Möglichkeit zur Identifizierung unterschiedlicher Prozessfehler beim Laserstrahlschweißen.

Das KI-System wurde darauf trainiert, Prozessimperfectionen anhand des jeweiligen spezifischen Fingerabdruckes zu voneinander unterscheiden. Die mittlere Genauigkeit des Klassifizierungsergebnisses erreicht für Laborproben bis zu 99,56 Prozent. Während der Entwicklung des Systems wurden 16 Merkmale basierend auf den Bildinformationen unterschiedlicher Prozessbereiche ermittelt. Hierbei hat sich gezeigt, dass unter Verwendung von mindestens sechs Merkmalen aus dem Bereich des Keyholes und des Schmelzbades, eine Erkennungsrate von über 99 Prozent unter Laborbedingungen möglich ist (Bild 2).

Das Einsatzgebiet der KI-basierten Prozessüberwachung im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels ist das industrielle Laserstrahlschweißen von Automobilbauteilen. Hierbei ermöglicht es die automatisierte, Bewertungen von Schweißnähten in Echtzeit. Das Verfahren der Messtechnik sowie der Auswertestrategie unter Berücksichtigung von Lernalgorithmen ist auf vieler Bearbeitungsprozesse innerhalb und außerhalb der Lasertechnik übertragbar. Zudem bietet es neben der Erkennung von Prozessimperfectionen, die Möglichkeit zur Dokumentation von Fertigungsschritten und zur Steigerung des Prozessverständnisses. ■

INFORMATION & SERVICE

LITERATUR

You, D., Gao, X., Katayama, S.: Multisensor Fusion System for Monitoring High-Power Disk Laser Welding Using Support Vector Machine. IEEE 10/2014, p. 1285.

Stavridis, J., Papacharalampopoulos, A., Stavropoulos, P.: Quality assessment in laser welding: A critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94/2018, p. 1825.

Volpp, J.: Dynamik und Stabilität der Dampfkapillare beim Laserstrahl-tief-schweißen. Dissertation Bremen 2017.

Knaak, C., Thombansen, U., Abels, P., Kröger, M.: Machine learning as a comparative tool to determine the relevance of signal features in laser welding. Procedia CIRP 74/2018, p. 623.

AUTOREN

M. Sc. Christian Knaak ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe Prozesssensorik und Systemtechnik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen.

Dipl.-Ing. Peter Abels leitet die Organisationseinheit Prozesssensorik und Systemtechnik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen.

KONTAKT

M. Sc. Christian Knaak
T 0241 8906-281
christian.knaak@ilt.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Peter Abels
T 0241 8906-428
peter.abels@ilt.fraunhofer.de