

Laserschweißen mit höchster Qualität bei reduzierter Leistung

Forschungsergebnisse aus der Innovationsallianz Green Carbody Technologies

Der Wandel von energiehungrigen Arbeitsmaschinen hin zu leistungsoptimierten Fertigungsverfahren kann in allen industriellen Produktionsprozessen beobachtet werden.

Die Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ untersucht Möglichkeiten zur Energieeinsparung im Karosseriebau. Im Rahmen des Teilprojektes 4.3.3 werden die Potentiale zur Leistungseinsparung beim Laserschweißen untersucht.

Energie- und Ressourceneffizienz bedeutet auch die Vermeidung der Weiterverarbeitung von fehlerhaften Teilen innerhalb der Wertschöpfungskette. Je früher dabei Unregelmäßigkeiten erkannt werden, desto mehr Ressourcen können in den Folgeprozessen eingespart werden. Hier kommt der Entwicklung automatisierbarer Verfahren mit hoher Bewertungssicherheit für die Qualitätskontrolle eine immense Bedeutung zu.

Das Fügen mit reduzierter Strahlleistung unterscheidet sich von konventionellen Fertigungsverfahren durch einen deutlich höheren Anspruch an die Qualitätssicherung. Wo einst eine stichprobenartige, teils visuelle Überprüfung der Durchschweißung möglich war, müssen jetzt bereits zur Bearbeitungszeit Prozessmerkmale vorliegen, die eine zuverlässige Qualitätsaussage zulassen. Insbesondere die Einschweißtiefe

DIE AUTOREN

THIBAUT BAUTZE

Dipl.-Ing. Thibault Bautze, Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität Karlsruhe (TH) und TU München. Seit 2008 im Gebiet der Datenverarbeitung für die Lasermaterialbearbeitung tätig. Aktuell ist er für die Leitung von FuE-Projekten bei der Precitec Group mit Schwerpunkt Prozessregelung verantwortlich und promoviert im Gebiet verteilter Datenverarbeitung.



ANTJE ZÖSCH

Dr. rer. nat. Antje Zösch, Studium der Physik an der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt (heute TU Chemnitz), Promotion 1993, danach wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH). Seit 2003 ist sie bei imq Ingenieurbetrieb GmbH auf dem Gebiet der Werkstoffprüfung tätig und für die Leitung von FuE-Projekten mit Schwerpunkt Applikation und Weiterentwicklung von Prüfverfahren verantwortlich.



Precitec KG
Thibault Bautze
D-76571 Gaggenau
Tel. +49 (0)7225-684-567
E-mail: t.bautze@precitec.de
Website: www.precitec.com

imq – Ingenieurbetrieb GmbH
Dr. Antje Zösch
D-08451 Crimmitschau
Tel. +49 (0)3762-9537-19
E-mail: a.zoesch@imq-gmbh.com
Website: www.imq-gmbh.com

bei Stumpfstoßen und die Bindefläche bei Überlappverbindungen sind ausschlaggebend für die Festigkeit der Verbindung und müssen mit geeigneten Sensoriken durch Überwachung von Prozessmerkmalen während des Prozesses oder kurz danach erfasst werden.

Teamwork: Verknüpfen der Qualitätssicherung

Die Projektpartner Precitec KG, imq – Ingenieurbetrieb GmbH und das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU untersuchen den kombinierten Einsatz von fotodioden-, kamera-, wirbelstrom- und thermografie-basierten Sensoriken zur Evaluierung des Prozessergebnisses. Dabei lässt sich in In-Prozess- und Post-Prozess-Systeme unterscheiden. Bei In-Prozess-Verfahren liegt der Schwerpunkt auf einer schnellen Datenverarbeitung und Klassifizierung mehrerer Eingangssignale während des Prozesses. In-Prozess-Verfahren sind in der Lage, Prozessstörungen zu erkennen, können jedoch wegen der hohen Dynamik des Laserschweißprozesses nur eine Voraussage zu vorhandenen Nahtunregelmäßigkeiten treffen. Deshalb ist in kritischen Fällen eine anschließende zerstörungsfreie Prüfung sinnvoll.

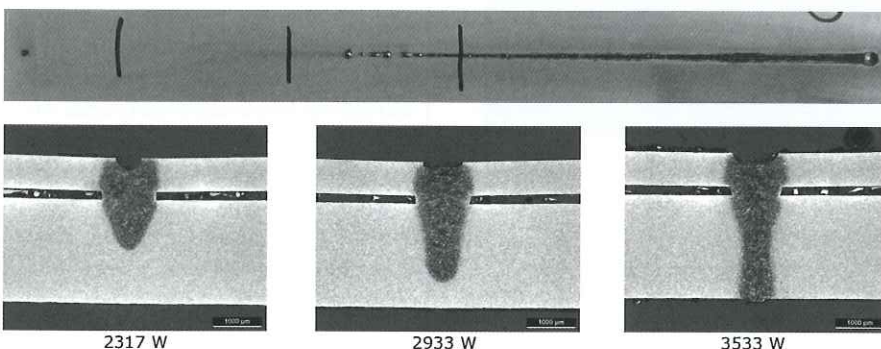


ABBILDUNG 1: Variation der Einschweißtiefe bei Überlappverbindung verzinkter Stähle.

Mittendrinn: In-Prozess-Qualitätssicherung

Die In-Prozess-Überwachung mit fotodioden-basierten Systemen ist industrieprob und wird weitläufig angewandt. In Kombination mit einer bildgebenden Kameraüberwachung werden Mehrdeutigkeiten im Signalverlauf reduziert. Dies zieht eine höhere Zuverlässigkeit bei der Prozessklassifizierung und eine Erweiterung der erkennbaren Prozesszustände mit sich.

Bei nicht erfolgter Durchschweißung kann bei einer rein visuellen Post-Prozess-Überwachung nur erschwert festgestellt werden, ob eine ausreichende Anbindung besteht. Mögliche Indizien wie Anlauffarben auf der Nahtunterseite werden durch die Beschichtung verdeckt. Es besteht demnach Bedarf an einer robusten In-Prozess-Qualitätssicherung.

Für die Versuchsdurchführung in der Innovationsallianz Green Carbody Technologies wurde hierfür eine Bearbeitungsoptik konstruiert, die auf der modularen Bauweise des YW52 Schweißkopfes aufbaut und mit einer zusätzlichen Prozessbeleuchtung und koaxialen Kameraüberwachung ausgestattet wurde. Kamerabilder und Fotodiodensignale werden von einem PC ausgewertet und für die spätere Verwendung gespeichert.

Die Möglichkeiten mit reduzierter Strahlleistung zu schweißen wurden bei Überlappverbindungen verzinkter Stähle mit 0,7 mm auf 2,0 mm mit Spaltmaßen zwischen 100 µm und 200 µm erprobt. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die Bestimmung der notwendigen Laserleistung für verschiedene Einschweißstiefen gelegt. Abbildung 1 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Einschweißstiefe, der Nahtunterseite und der eingebrachten Laserleistung (Laserleistung = 2 kW – 5 kW, Vorschub = 5,5 m/min). Zur Parametrierung der Prozessüberwachung

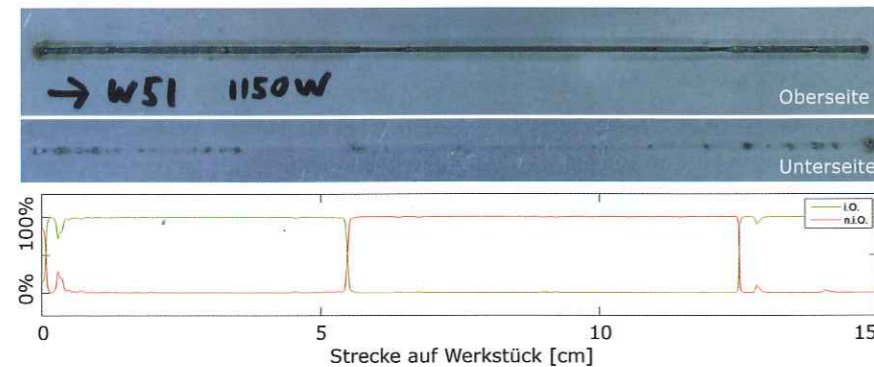


ABBILDUNG 2: iO/nIO-Klassifizierung einer Überlappverbindung mit Spaltmaßvariation bei reduzierter Laserleistung.

werden Referenzfahrten durchgeführt. Anhand von Prozessvariationen können die Prozesszustände im Merkmalsraum präzise definiert werden. Ein Bildverarbeitungsalgorithmus erkennt die eindeutigen Prozessmerkmale wie Schweißnahtbreite, Dampfkapillare oder Schmelzbadoberfläche. Durch eine kombinatorische Logik können mehrere Prozesssignale zu einem Signal zusammengefasst werden. Dieses Signal stellt anschließend die Auftrittswahrscheinlichkeit für die zuvor eingelernten Bereiche dar.

Der Verlauf der Wahrscheinlichkeit, dass keine oder nur eine unzureichende Anbindung vorliegt, wird in Abbildung 2 gezeigt. Zur Prozessvorbereitung wurde das Spaltmaß von 100 µm auf 200 µm erhöht, was den gewünschten Effekt des „Falschen Freundes“ bewirkt. Dabei wurde bereits mit reduzierter Strahlleistung gearbeitet. Die Leistung wurde so gewählt, dass ein vollständiges Durchschweißen nicht bzw. nur zeitlich begrenzt auftritt.

Versuche mit reduzierter Laserleistung wurden bei verschiedenen Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführt, um den Einfluss der variablen Streckenenergie auf das Prozessergebnis messen zu können. Möchte man ohne Einbußen an Bindefläche die verwendete Laserleistung reduzieren, gilt es, den Prozess so zu parametrieren, dass ein vollständiges Durchschweißen nicht oder selten erreicht werden kann. Die hierfür benötigte Laserleistung wird vom System automatisch erfasst und der übergeordneten Steuereinheit über einen analogen Wert mitgeteilt. Der Anwender kann dann entscheiden, ob die Laserleistung reduziert wird, um unnötiges Durchschweißen zu vermeiden, oder gegebenenfalls erhöht wird.

Die mögliche Energieersparnis beim Laserfügen lässt sich an einem Zahlenbeispiel demonstrieren. Im Zuge der Versuchsdurchführung konnte festgestellt werden,

dass ein Bauteil, welches derzeit mit 4 kW Strahlleistung geschweißt wird, auch bei 2,5 kW ausreichend Anbindung vorweist. Durch eine kontinuierliche Auswertung und Klassifikation der Prozessdaten wird eine Aussage darüber getroffen, ob das erhaltene Schweißergebnis den Qualitätskriterien des Experten entspricht. Durch Reduktion von 1,5 kW Strahlleistung und unter Annahme eines Wirkungsgrades von 25% der Laserstrahlquelle, könnten 6 kW zugeführter Leistung eingespart werden.

Sicher ist sicher: Inline Post-Prozess-Überwachung

Wirbelstromverfahren als Inline - Post-Prozess-Verfahren sind gut automatisierbar und geeignet, die Eigenschaften der Nahtoberfläche und oberflächennaher Bereiche zu bestimmen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Prüfsignale darüber hinaus Aussagen zur erzielten Anbindung liefern und somit konventionelle Methoden wie Oberflächenscans oder Graubildauswertung gewinnbringend ergänzen. Die Wirbelstromprüfung kann unmittelbar nach dem Schweißen oder in Taktzeit in einer separaten Prüfstation durchgeführt werden und erlaubt eine sofortige Identifikation von Fehlern.

Thermografieverfahren sind im Bereich von Offline-Prüfungen etabliert und erschließen sich durch neue Anregungs- und Auswertemethoden auch den Bereich der Inline-Prüfung von Baugruppen. Im Bereich der Laserschweißnahtprüfung sind jedoch immer noch Systeme dominant, bei denen die Thermografie-Daten für die bildhafte

DIE FIRMA

Precitec KG
Gaggenau, Deutschland

Die Precitec KG gilt weltweit als Spezialist für komplexe Systemlösungen auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung. Neben vieltausendfach bewährten Schneidköpfen mit integrierter Abstandssensorik verfügt Precitec über ein umfassendes Angebot an Bearbeitungsköpfen mit integrierten Sensorsystemen zur Online-Prozessüberwachung sowie zur berührungssensiblen Nahtverfolgung und Nahtgeometrieermessung.

www.precitec.com



ABBILDUNG 3: Wirbelstromprüfung an Laserschweißnähten.

Darstellung der Nahteigenschaften herangezogen werden. Eine automatische Bewertung der Qualität erfolgt jedoch nicht. Die eigentliche Prüfung und Beurteilung wird in der Regel dem Menschen überlassen.

Erkannt: Wirbelstromverfahren findet Bereiche mit zu geringer Nahtbreite

Für die Wirbelstromprüfung wurde ein kommerzielles Prüfgerät mit einem angepassten Sensor verwendet (Abbildung 3). Die Lasernähte wurden nach dem Schweißen taktlich abgefahren, die Prüfsignale erfasst und mit einer vom Fraunhofer IWU entwickelten Software ausgewertet. Zum Vergleich wurden die Schweißproben durch Sicht- und Röntgenprüfung nach DIN EN ISO 13919-1 bewertet.

Für die Auswertung der Wirbelstromsignale wurde ein Klassifikationsverfahren nach dem Prinzip der Fuzzy-Pattern-Recognition verwendet. Damit ist man in der Lage, nicht-lineare Beziehungen von zu messenden Größen mit Klassenzugehörigkeiten zu verknüpfen [1]. Das Konzept der Datenauswertung (Abbildung 4) besteht darin, Informationen von mehreren Sensoren mit ganz unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien zu bündeln und diese dann nicht unabhängig voneinander, sondern im Zusammenhang zu bewerten [2]. Dadurch entsteht ein wesentlich höherer Informationsgehalt und die Bewertungssicherheit steigt. Für die Beurteilung von Laserschweißnähten können die Sensorsignale der fotodioden-basierten Systeme der In-Prozess-Überwachung mit den Wirbelstromsignalen und Informationen aus Thermografiedaten kombiniert werden.

Nach entsprechender Vorkonditionierung werden aus den Sensorsignalen signifi-

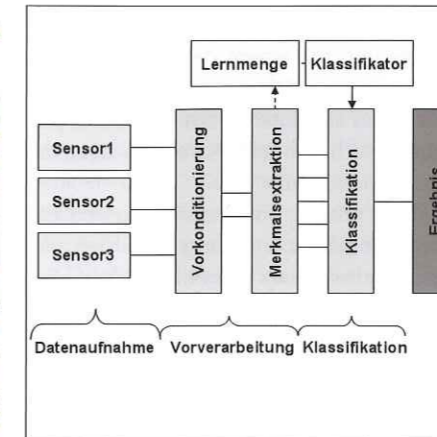


ABBILDUNG 4: Konzept der Datenauswertung.

fikante Merkmale, wie Mittelwert, Varianz, Signalanstieg etc. extrahiert. Miteinander aggregiert bilden sie einen Merkmalsvektor in einem n-dimensionalen euklidischen Merkmalsraum. Die Dimension des Raumes entspricht der Anzahl der genutzten Merkmale. Vorausgesetzt, die Merkmale korrelieren signifikant mit den gesuchten Eigenschaften, kann aus ihnen durch geeignete Auswertelgorithmen ein Klassifikator abgeleitet werden, der alle notwendigen Informationen für die Bestimmung der gesuchten Eigenschaften enthält. In der Folge wird für jedes zu bewertende Intervall der Prüfgrößen der Merkmalsvektor und anschließend über Abstandsfunktionen ein Zugehörigkeitswert zu den vorher definierten Eigenschaftsklassen ermittelt. Damit kann für jedes Intervall aus den gemessenen Sensorsignalen auf die vorliegenden Eigenschaften geschlossen werden.

Abbildung 5 zeigt Beispiele für die Bewertung der Wirbelstromsignale an verschiedenen Proben. Das Ergebnis der Klassifizierung (c) ist im Vergleich zum Röntgenbild (a) und zu den Ergebnissen aus Sicht- und Röntgenprüfung (b) dargestellt. Die schräge Röntgendurchstrahlung erlaubt eine geometrische Entflechtung von Decklage und Wurzel. Bei Probe 010 wird dadurch im ersten Nahtbereich die fehlende Anbindung an das untere Blech und anschließend die bis zur Mitte fehlende Wurzel deutlich. Oberflächenfehler stellen sich als dunkler Kontrast dar. Anhand der Prüfsignale wurde jedem Intervall der Länge 1 mm eine Klasse zugeordnet, die die Nahtqualität beschreibt. Die Wirbelstromsignale korrelieren mit den Nahteigenschaften. Das Verhältnis Nutzsinal/Störsignal ist ausreichend. Durch die Klassifikation wurden unverschweißte Bereiche, iO-Bereiche, solche mit zu geringer Nahtbreite, nicht durchgeschweißte Bereiche, Oberflächen-



- Kalte Materialbearbeitung
- Minimalster Nachbearbeitungsaufwand
- Komplett neue Produkte und Materialien realisierbar
- Exzellente Prozessqualität
- Höchste Präzision
- Zuverlässige Faserlaserarchitektur für den industriellen Einsatz (24/7)

Besuchen Sie uns auf der
Compamed, Düsseldorf
Halle BA, Stand G19
vom 15. bis 18. November



ROFIN-BAASEL Lasertech
Petersbrunner Straße 1b
82319 Starnberg/Germany
Tel: +49(0)8151-776-0
E-Mail: sales@rofin.de



www.rofin.de/starfemto

WE THINK LASER

fehler und Spritzer erkannt. Das Klassifikationsergebnis wurde für jedes Intervall mit dem Ergebnis der Referenzverfahren (Sicht- und Röntgenprüfung) verglichen.

Gelernt: Thermografie als automatisierte zerstörungsfreie Prüfung

Der Schwerpunkt des Fraunhofer IWU liegt in der Untersuchung der Möglichkeiten zur Bewertung durch Thermografie. Im Projekt wird dabei eine vollautomatische objektive Bewertung der Daten angestrebt.

Thermografische Verfahren bieten eine sehr gute Möglichkeit, innere Defekte im Material sichtbar zu machen. Nachteilig stellen sich für Inline-Applikationen Einflüsse auf die thermischen Anregung dar. In der Regel wird Wärme von der Rückseite („Durchlicht“) oder der Frontseite („Auflicht“) aufgebracht, welche absorbiert und im Materialinneren entsprechend transportiert wird. Speziell in der Lock-in Thermografie erfolgt die Anregung zusätzlich

periodisch bzw. für Verfahren der Phasenauswertung mit einem definierten Impuls. Für Auswerteverfahren, die auf einen Vergleich von absoluten Werten aufbauen, ist dabei eine homogene Anregung über der Fläche unabdingbar.

Einen Ansatz, um unabhängig von der Homogenität der Anregung zu werden, bietet die Auswertung von Phaseninformationen. Dabei wird aus dem zeitlichen Verlauf der Erwärmung und Abkühlung eines lokalen Bereiches über eine Fouriertransformation eine Aussage über die beteiligten Frequenzen und deren Phasenlage gewonnen. Auch hier sind störende Fremdeinflüsse enthalten, die sich in einem verrauschten Signal insbesondere in den unverschweißten Bereichen bemerkbar machen. Defekte in der Schweißnaht können jedoch bereits visuell wesentlich einfacher differenziert werden.

Die notwendigen hohen Taktraten sind hingegen durch eine Kombination von Optimierungen im Bereich der Anregung und der daraus ableitbaren Merkmale erzielbar.

Die Arbeiten in diesem Bereich beruhen auf gemeinsamen Technologieprojekten mit der InfraTec GmbH Dresden.

Auf der Grundlage der Extraktion von signifikanten Merkmalen aus enthaltenden Frequenzen und deren Phasenlagen können mittels Klassifikationsverfahren, z.B. MLDA (Multiple Lineare Diskriminanzanalyse), defektbehaftete Zustände angelernt und im Nachgang in der Produktion automatisch von iO-Bereichen unterschieden werden (Abbildung 6). Die Abbildung zeigt das Röntgenbild (schräge Durchstrahlung), das Ergebnis der Sichtprüfung (Balken) und das Ergebnis der automatischen Klassifizierung (rote Flächen markieren Fehlergebiete). Dabei können – je nach Umfang des angelernten Klassifikators sowohl iO-niO-Zustände, als auch die Defektarten voneinander unterschieden werden (Probe 1990: Oberflächenfehler; Probe 2023: fehlende Anbindung an das untere Blech).

Das System übernimmt zum einen die Datenvorverarbeitung, aber auch die Funk-

tion der modellbasierten Auswertung der Daten. Der Mensch bringt seine Erfahrungen im Einrichtvorgang des Systems ein. Die Bewertung in der 100%-Inline-Kontrolle erfolgt dann objektiv durch die Software.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Versuche haben demonstriert, dass die hohen Anforderungen an die Qualitätssicherung bei reduzierter Strahlleistung durch eine Kombination von Fotodioden- und Bildmerkmalen erfüllt werden können. Bindefehler bei Spaltmaßvariation konnten mit hoher Sicherheit erkannt werden. Weiterhin wird die Prozessparameterisierung durch die autonome Bestimmung der notwendigen Laserleistung zur vollständigen Durchschweißung erleichtert.

Durch entsprechende Optimierung und Weiterentwicklung der Prüftechnik und besonders der Datenanalyse konnten mit dem Wirbelstromverfahren unverschweißte Bereiche, iO-Bereiche, Bereiche mit zu geringer Nahtbreite/nicht durchgeschweißte Bereiche, Oberflächenfehler und Spritzer mit hoher Bewertungssicherheit erkannt werden.

Die Auswertung der thermografischen Untersuchungen wurde automatisiert. Bereiche ohne Anbindung an das untere Blech und Oberflächenfehler (starker Nahteneinfall, Oberflächenporen) können sicher von Bereichen mit guter Nahtqualität unterschieden werden.

Danksagung

Die Untersuchungen und Ergebnisse mittels Thermografie wurden von Dr. Michael Kuhl vom Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz beigetragen, der als dritter Koautor an der Veröffentlichung mitgearbeitet hat.

Thomas Wiener vom Fraunhofer IWU Chemnitz war maßgeblich mit der Entwicklung und Umsetzung der Auswerteargorithmen für die Datenverarbeitung betraut.

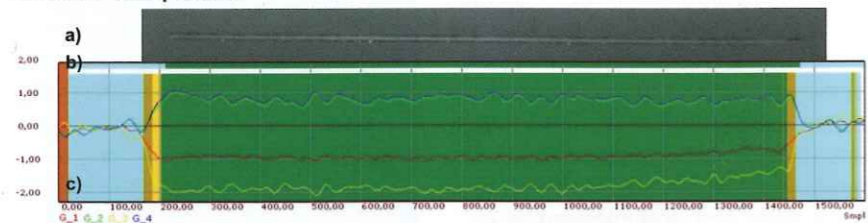
Versuche im Rahmen der Innovationsallianz Green Carbody Technologies wurden bei KUKA Augsburg und Volkswagen Wolfsburg durchgeführt.

Referenzen

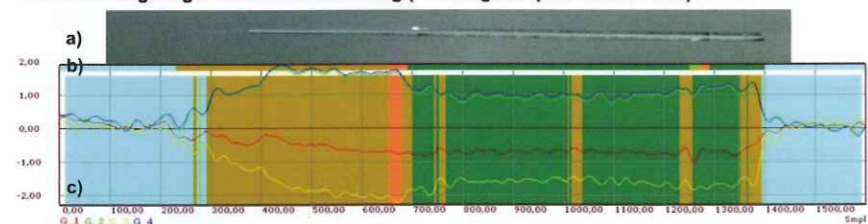
[1] U. Priber, W. Kretzschmar: „Diagnose und Überwachung mit substrukturierteren Fuzzy-Klassifikatoren“, Fraunhofer Institut für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen, Chemnitz 2006

[2] M. Kuhl: „Qualitätsbewertung von Laserschweißnähten auf Grundlage von Pre-, In- und Postprozessmessverfahren“ Verlag Wissenschaftliche Scripten, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (2011) ISBN: 978-3-942267-19-9

Probe 025: Nahtqualität iO



Probe 010: ungenügende Durchschweißung (Leistungsrampe 1 kW bis 4 kW)



Probe 018: Oberflächenfehler

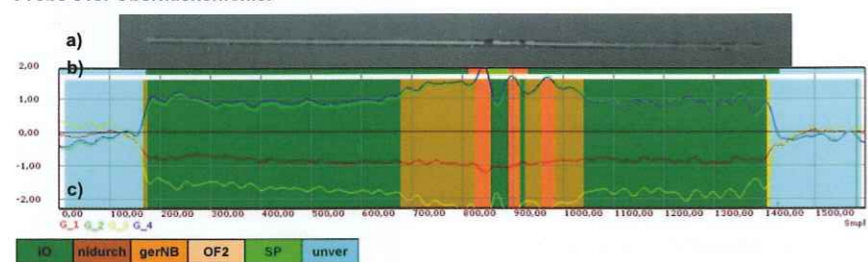


ABBILDUNG 5: Ergebnis Klassifizierung (c...Farbe im Diagramm) im Vergleich zum Ergebnis der Sicht- und Röntgenprüfung (b...Farbe des Balkens am oberen Rand des Diagramms) und Röntgenbild (a)

Probe	Laserleistung	Schweißgeschwindigkeit	Spaltabstand
025	konst. 3 kW	80 mm/s	0,1 mm
010	Rampe 1...4 kW	60 mm/s	0,1 mm
018	konst. 3 kW	60 mm/s	0,1 mm

Farbcode:

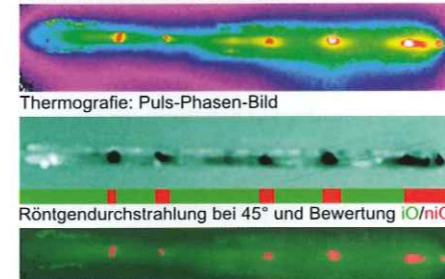
iO...Nahtqualität iO; nidurch...nicht durchgeschweißte; gerNB...zu geringe Nahtbreite; OF2...Oberflächenfehler; SP...Spritzer; unversch...unverschweißter Bereich

Probe 2006: Nahtqualität iO



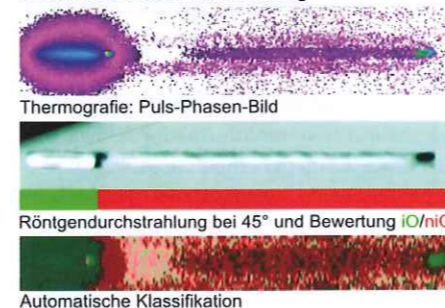
Automatische Klassifikation

Probe 1990: Oberflächenfehler



Automatische Klassifikation

Probe 2023: Fehlende Anbindung



Automatische Klassifikation

ABBILDUNG 6: Ergebnis der automatischen Bewertung thermografischer Untersuchungen an Laserschweißnähten.

DIE FIRMA

imq GmbH

Crimmitschau, Deutschland

imq-Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik GmbH wurde 1990 gegründet, Firmensitz in Crimmitschau mit Niederlassungen in Erfurt, Lippendorf und Boxberg. Die Kernkompetenzen von imq GmbH liegen in der Durchführung zerstörender und zerstörungsfreier Werkstoffprüfungen, der Schweißerausbildung sowie der Applikation und Weiterentwicklung von Prüftechnologien. Die Auftraggeber entstammen nahezu allen Industriezweigen mit Schwerpunkt Energieerzeugung und Automobilzuliefererindustrie.



The Laser Solution



NEU!

Vollquarz F - Theta Objektiv

- für Hochleistungslaser
- Wellenlängenbereich 1030 nm bis 1090 nm
- Brennweite 420 mm
- Scan Bereich 280 mm x 280 mm
- absorptionsarme Vergütung
- Made in Germany

Wir stellen aus!

VISION 2011 08.-10.11.2011 Stuttgart Halle 4 Stand B01

www.silloptics.de
info@silloptics.de