

Qualitätsbewertung von Laserschweißnähten auf Grundlage von Pre-, In- und Postprozessmessverfahren

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Michael Kuhl
geboren am 29.12.1968
eingereicht am 10.12.2009

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Reimund Neugebauer
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Matthes

Chemnitz, den 17. Dezember 2010

Impressum

Qualitätsbewertung von Laserschweißnähten auf Grundlage von Pre-, In- und Postprozessmessverfahren

Autor:

Michael Kuhl

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Reimund Neugebauer

Wichtiger Hinweis:

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere fürervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Einer digitalen Veröffentlichung über MONARCH, das Archiv der Hochschulbibliothek der Technische Universität Chemnitz, wird in diesem Zusammenhang ausdrücklich zugestimmt.

© 2011 Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz

Verlag Wissenschaftliche Scripten
www.verlag-wiss-scripten.de

ISBN: 978-3-942267-19-9

Bibliographische Angaben und Referat

Kuhl, Michael

Thema:

Qualitätsbewertung von Laserschweißnähten auf Grundlage von Pre-, In- und Postprozessmessverfahren

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Chemnitz, 2010

211 Seiten
97 Abbildungen
26 Tabellen

Referat

Das Laserschweißen ist als Fügeverfahren in vielen Bereichen der industriellen Fertigung, in welchen es auf Fertigungsgeschwindigkeit und Präzision ankommt, fest etabliert. Der geringe Wärmeeintrag und die hohe Schweißgeschwindigkeit sind zwei von vielen Vorteilen, welche das Verfahren bietet.

In der Praxis treten jedoch während des Prozesses bei kritischen Randbedingungen Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht auf. Diese Imperfektionen sind aufgrund der vorherrschenden Schmelzodynamik während des Schweißprozesses in ihrer späteren Ausprägung nach dem Auskühlen der Schmelze nicht vollständig darstellbar. Konkret heißt das, dass potentielle, im Prozess detektierte Imperfektionen nachträglich ausheilen können.

Heutige Prozessmess- und Prüfverfahren sind damit für eine aussagekräftige Qualitätsbeurteilung nur selten anwendbar.

Einen Ausweg bietet die vorteilhafte Kombination verschiedener Verfahren aus den einzelnen Prozessstufen, wie sie in der vorliegenden Arbeit dargestellt wird. Ein Multisensorsystem aus In- und Postprozesssensoren kann die physikalischen Vorteile der Einzelsysteme bezüglich der Detektion von Imperfektionen vereinen und zugleich, im Falle einer gemeinsamen multivariaten Auswertung der Signale, eine wesentlich sicherere Bewertung der Proben bezüglich einer Fehlerklassenzuordnung erwirken.

Schlagworte

Laserschweißen, Defekentstehung, Schweißnahtüberwachung, Prozessüberwachung, Qualitätskontrolle, Multisensorielle Datenanalyse

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Automatisierung am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz.

Die zugrunde liegenden Versuchsdaten wurden innerhalb des durch die Sächsische AufbauBank geförderten Verbundforschungsprojektes „Multisensorsystem“ in Beteiligung der Unternehmen AMC GmbH, ibs Automation GmbH, imq Ingenieurbetrieb für Schweißtechnik und Qualitätssicherung GmbH sowie der Volkswagen Sachsen GmbH aufgenommen.

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz besonders herzlich bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Reimund Neugebauer für seine großzügige wissenschaftliche und umfassende fachliche Betreuung der Arbeit bedanken.

Für die Beurteilung der Ergebnisse und die Übernahme des Gutachtens gilt mein besonderer Dank Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Matthes.

Den am Verbundprojekt beteiligten Unternehmen, deren Mitarbeitern sowie meinen Kollegen am Institut danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit, die wertvolle technische Begleitung sowie die großzügige Bereitstellung von Maschinen und Anlagen.

Fr. Dr. Antje Zösch (imq GmbH), wie auch Hr. Paul-Michael Mickel (VW Sachsen GmbH), danke ich darüber hinaus ganz besonders für die vielen konstruktiven Diskussionen und ihre umfangreiche fachliche Unterstützung während der Arbeit.

Herrn Thomas Wiener und Herrn Stefan Bauer danke ich für ihren Fleiß, ihre Akribie und die vielen guten Ideen bei Programmierung der Software, welche über die Dissertation hinaus Grundstein für viele folgende Arbeiten am Institut im Bereich Prozessinformatik sein wird.

Schließlich möchte ich mich ganz, ganz herzlich bei meiner Frau Jana und meinen beiden Kindern Ann-Kathrin und Marius für ihre fast unendliche Geduld und das Verständnis bedanken, ohne welche die Arbeit nicht möglich gewesen wäre, sowie bei meinen Eltern, welche mir Neugier und Vertrauen von Anfang an mit auf den Lebensweg gegeben haben.

“The most exciting phrase to hear in science,
the one that heralds new discoveries, is not 'Eureka!' (I found it!)
but 'That's funny ...' “

Isaac Asimov

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	21
2	Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik	23
2.1	Laserschweißprozess.....	23
2.2	Arten von Unregelmäßigkeiten.....	27
2.2.1	Oberflächendefekte.....	29
2.2.2	Löcher.....	30
2.2.3	Bindefehler und Einschweißtiefe.....	30
2.2.4	Mangelnde Nahtbreite.....	30
2.2.5	Anschmelzungen.....	31
2.2.6	Weitere Unregelmäßigkeiten.....	31
2.3	Sensorsysteme.....	32
2.3.1	Preprozessverfahren.....	32
2.3.2	Inprozessverfahren.....	35
2.3.3	Postprozessverfahren.....	40
2.4	Verfahren zur Signalauswertung.....	46
2.4.1	Signalverarbeitung.....	46
2.4.2	Toleranzband- und Schwellwertverfahren.....	47
2.4.3	Künstliche Neuronale Netze.....	47
2.4.4	Multivariate Statistik.....	49
2.4.5	Fuzzy-Klassifikation.....	50
3	Zielstellung	53
4	Versuchsdurchführung und Einschränkungen	55
5	Methodik	61
5.1	Betrachtungen zur Fehlerentstehung.....	61
5.1.1	Oberflächenfehler, Poren, Spritzer.....	62
5.1.2	Löcher.....	64
5.1.3	Bindefehler und Einschweißtiefe.....	65
5.1.4	Mangelnde Nahtbreite.....	66

5.1.5	Kantenanschmelzungen	66
5.1.6	Risse	67
5.2	Untersuchungen zur Entstehung des Fehlerfalls „Falscher Freund“	68
5.3	Sensorauswahl und allgemeine Prozessparameterabbildung in den Signalen	76
5.3.1	Preprozesssensoren	79
5.3.2	Inprozesssensoren	80
5.3.3	Postprozesssensoren	89
5.4	Ermittlung spezifischer Merkmale	94
5.4.1	Konzept der Merkmalermittlung	94
5.4.2	Merkmale im Preprozess	95
5.4.3	Merkmale im Inprozess	97
5.4.4	Merkmale im Postprozess	99
5.5	Problemstellungen der multisensoriellen Datenverarbeitung	104
5.5.1	Datenkonsistenz	105
5.5.2	Abstraktion	106
5.5.3	Merkmalsbasis und Informationsalterung (Information Aging)	106
5.5.4	Informationswichtung	109
5.5.5	Interpretation des Klassifikationsergebnisses	110
5.6	Fuzzy-Pattern-Recognition als Klassifikationsverfahren	111
6	System	115
6.1	Hardware	115
6.2	Datenverarbeitungsstruktur	115
6.3	Merkmalsgewinnung	121
6.4	Klassifizierung	130
6.4.1	Allgemeines und Vorbereitung	130
6.4.2	Intervallbildung	131
6.4.3	Anlernvorgang	132
6.4.4	Rückwirkendes Lernen	133
6.4.5	Trennleistungsanalyse	134
6.4.6	Einzelanalyse	137
6.4.7	Differenzierte Klassifikation	138

7	Ergebnisse und Diskussion	143
7.1	Demonstrator.....	143
7.1.1	Serielle Umsetzung Inprozess / Postprozess.....	143
7.1.2	Parallele Umsetzung Inprozess / Postprozess.....	143
7.2	Ausgewählte Klassifikationsergebnisse.....	145
7.2.1	Versuchsserie und Prozessparameter	145
7.2.2	Auswerteparameter.....	146
7.2.3	Lernmenge.....	148
7.2.4	Testmengen.....	150
7.2.5	Bewertungsprozedur.....	151
7.2.6	Auswertung und Ergebnis.....	153
7.3	Diskussion	162
8	Zusammenfassung.....	167
	Literaturverzeichnis	171
	Anhang 1: Übersicht über Filter-, Eingangs- und Ausgabemodule	183
	Anhang 2: Dateidefinitionen	185
	Anhang 3: Zuordnung der definierten Fehler zur PV6719.....	187
	Anhang 4: Übersicht wichtigste Versuchsreihen.....	188
	Anhang 5: Probenzuordnung der Versuchsreihe 1927 - 1970	190
	Anhang 6: Fehlertabellen der Reihen 1927 - 1970	191
	Anhang 7: Bewertungsergebnisse Probe 1927 - 1970.....	195
	Anhang 8: Fuzzy-Pattern-Recognition.....	206