

Optimierung und Überwachung des MSG-Schweißprozesses mit Hilfe klassischer Modelle und KI-Methoden

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Jens Jochen Heidrich
aus Köln

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dilthey
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. (BR) Prof.h.c. (TJ) Tilo Pfeiffer

Tag der mündlichen Prüfung: 18.06.2001

„D 82 (Diss. RWTH Aachen)“

Jens Jochen Heidrich

**Optimierung und Überwachung des
MSG-Schweißprozesses mit Hilfe
klassischer Modelle und KI-Methoden**

Jens Jochen Heidrich

**Optimierung und Überwachung
des MSG-Schweißprozesses mit Hilfe
klassischer Modelle und KI-Methoden**

Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Dilthey

Band 3/2001

Shaker Verlag
D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Heidrich, Jens Jochen:

Optimierung und Überwachung des MSG-Schweißprozesses
mit Hilfe klassischer Modelle und KI-Methoden / Jens Jochen Heidrich.

Aachen : Shaker, 2001

(Aachener Berichte Fügetechnik ; Bd. 2001,3)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9116-X

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9116-X

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Dem Institutsdirektor, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Diltthey, gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung bei der Durchführung meiner Dissertation und den mir gewährten Freiraum. Auch für die kritische Durchsicht und die Übernahme des Berichts möchte ich ihm recht herzlich danken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. (BR) Prof.h.c. (TJ) Tilo Pfeiffer danke ich für die sorgfältige Durchsicht der vorliegenden Arbeit und für seine Bereitschaft zur Übernahme des Berichts. Mein Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Günther Reimerdes für die Übernahme des Vorsitzes bei meinem Promotionsverfahren.

Wesentlichen Anteil an der Entstehung dieser Arbeit haben auch meine Kollegen Herr Jörg Gollnick und Herr Konrad Willms, die mir in fruchtbaren Diskussionen manche Anregung gegeben haben. Darüber hinaus danke ich Herrn Willms und meinen Eltern Angela und Karl Georg Heidrich für die sorgfältige Durchsicht der entstehenden Dissertation.

Auch die Damen Meike Sander, Gertrud Baumann, Susanne Oertker und Martina Fischer sowie die Herren Karsten Konter, Guido Buchholz, Jens de Vries, Vitaliy Pavlyk, Michael Kretschmer, Charly Holzinger, Sebastian Haas, Jan-Dirk Reimers, Thomas Kluge, Markus Möller, Sung-Won Choi, Martin Florian, Isa Bodur, Stephan Huttenhuis, Alexander Karnath, Sascha Kyeck, Torsten Polte und Romuald Laqua haben mit ihren Studien- und Diplomarbeiten sowie als Kollegen oder wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Eltern möchte ich hiermit noch einmal danken, dass sie mir die Ausbildung ermöglicht und mir dabei jederzeit beratend zur Seite gestanden haben. Dankbar bin ich meiner Lebensgefährtin Anne Döring für ihre Geduld und ihr Verständnis, wenn es mal wieder ‚länger‘ gedauert hat.

Die Dissertation erfolgte mit finanzieller Unterstützung der ‚Deutschen Forschungsgemeinschaft‘ und der ‚Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung‘.

Aachen, im Juni 2001

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Schliffbilderverzeichnis	X
Abkürzungen und Formelzeichen	XII
Abstract.....	XVII
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Zielsetzung.....	2
3 Stand der Technik	4
3.1 Qualitätssicherung in der MSG-Schweißtechnik	4
3.1.1 MSG-Schweißprozesse	4
3.1.1.1 Kurzlichtbogen-Prozess	5
3.1.1.2 Hochleistungsschweißprozesse	6
3.1.1.3 Impulslichtbogen-Prozess	9
3.1.2 Schweißzusätze	10
3.1.2.1 Einfluss der Schutzgase.....	10
3.1.2.2 Einfluss der Drahtelektroden	13
3.1.3 Qualitätsüberwachung	14
3.1.3.1 Normen.....	14
3.1.3.2 Sensorik beim MSG-Schweißen	16
3.1.3.3 Optische Stereo-Nahtverfolgungssensoren	19
3.1.3.4 Verarbeitung der Lichtbogensignale.....	21
3.2 Data mining - Grundlagen	23
3.3 Methoden der künstlichen Intelligenz in der Schweißtechnik	28
3.3.1 Neuronale Backpropagation-Netzwerke	28
3.3.2 Evolutionsstrategien und genetische Algorithmen	32
3.3.3 Fuzzy-Logik	35
3.3.4 Expertensysteme	37
3.4 Ähnlichkeitsprinzip und Modellversuchswesen	40
3.4.1 Grundlagen und Begriffserläuterung.....	40
3.4.2 Beispiel einer Dimensionsanalyse	42

4	Generierung der Datenbasis.....	44
4.1	Schweißversuche und statistische Auswertung	44
4.1.1	Kurzlichtbogen (KLB).....	45
4.1.1.1	Versuchsreihe I-Stoß-Prozess (KLB-A)	45
4.1.1.2	Versuchsreihe v_D -Regelung (KLB-B)	46
4.1.1.3	Versuchsreihe v_S -Regelung (KLB-C).....	46
4.1.2	Sprühlichtbogen (SLB).....	47
4.1.3	Rotierender Lichtbogen (RLB)	47
4.1.4	Impulslichtbogen (ILB)	48
4.1.4.1	Versuchsreihe Überlappstoß-Prozess (ILB-A)	48
4.1.4.2	Versuchsreihe I-Stoß-Prozess Schliff (ILB-B)	48
4.1.4.3	Versuchsreihe I-Stoß-Prozess Lichtschnittsensor (ILB-C).....	49
4.1.4.4	Versuchsreihe Fehleranalyse Werkstück (ILB-D)	49
4.1.4.5	Versuchsreihe Fehleranalyse Anlage (ILB-E)	50
4.2	Software	51
4.2.1	Auswertung der transienten Daten	51
4.2.2	Vorbereitung des Trainings neuronaler Netze	53
4.3	Auswahl der optimalen Trainingsvektoren über Data mining	55
4.3.1	Nonpuls-Prozesse	55
4.3.1.1	Korrelationen – Einfluss einzelner Attribute	56
4.3.1.2	Regressionsformeln	58
4.3.1.3	Clusteranalysen	59
4.3.2	Pulsprozess	63
4.4	Bestimmung der besten Parameter neuronaler Netze	68
4.4.1	Lernregel und Transferfunktion	68
4.4.2	Anzahl Lernschritte	69
4.4.3	Anzahl Initialisierungen.....	69
4.4.4	Bipolare Inputs.....	70
4.4.5	Skalare Units	70
5	Vorausbestimmung der Quellenparameter	72
5.1	Einsatz der KI-Methoden.....	72
5.1.1	Modellbildung durch neuronale Netze	72
5.1.2	Optimierung über genetische Programmierung	77
5.1.3	Erweiterung des Gültigkeitsbereichs durch Fuzzy Logik.....	83
5.2	Einsatz des Ähnlichkeitsprinzips	87
5.2.1	Aufstellung der Einflussgrößenansätze	87
5.2.2	Ansätze für den Kurzlichtbogenprozess	90
5.2.3	Ansätze für den Impulslichtbogenprozess	94
5.2.4	Ansätze für den Werkstoff Aluminium.....	98
5.2.5	Diskussion der Ergebnisse	99

6	Prozessüberwachung	100
6.1	Einsatz neuronaler Netze	100
6.1.1	Überwachung der Qualität	100
6.1.2	Überwachung der Nahtgeometrie	102
6.2	Einsatz von KI-Methoden bei der optischen Fugenverfolgung	102
6.2.1	Konstruktion eines Stereosensors	103
6.2.2	Auswertung der Sensor-Signale über neuronale Netze	106
7	Online - Prozessregelung und Fehleranalyse	110
7.1	Prozessregelung	110
7.1.1	Regelung des Zusatzgeschwindigkeit	110
7.1.2	Regelung der Schweißgeschwindigkeit	111
7.2	Fehleranalyse	112
7.2.1	Abbildung der Fehlerursache auf die Nahtqualität	112
7.2.2	Abbildung der Prozessdaten auf die Fehlerwahrscheinlichkeit	113
8	Beispiel eines Online-Überwachungssystems	115
9	Zusammenfassung und Ausblick	118
10	Literaturverzeichnis	121
11	Anhang	132
A	- Screenshot ‚Scanlyser‘	132
B	- Screenshot ‚NWAssist‘	133
C	- Screenshot ‚NeuroGen‘ (Neuronales Netz)	134
D	- Screenshot ‚NeuroGen‘ (Genetischer Algorithmus)	135
E	- Screenshot ‚NeuroGen‘ (Evolutionsstrategie)	136
F	- Screenshot ‚StereoEye‘	137

Abbildungsverzeichnis

List of figures

Abb. 1:	Einteilung der Schutzgas-Schweißverfahren	4
	<i>Classification of gas-shielded-arc welding processes</i>	
Abb. 2:	Schweißparameter in Abhängigkeit vom Lichtbogentyp, Nonpuls	5
	<i>Weld parameters in dependence on the arc type, non-pulsed</i>	
Abb. 3:	Phasen des Kurzlichtbogen-Prozesses	6
	<i>Phases of the short-arc welding process</i>	
Abb. 4:	Konventioneller Sprühlichtbogen-Prozess	7
	<i>Conventional spray-arc process</i>	
Abb. 5:	Rotierender Lichtbogen-Prozess.....	8
	<i>Rotating-arc welding process</i>	
Abb. 6:	Phasen des Impulslichtbogen-Prozesses	9
	<i>Phases of the pulsed arc welding process</i>	
Abb. 7:	Einfluss des Schutzgases auf die Nahtgeometrie	11
	<i>Influence of the shielding gas onto the weld geometry</i>	
Abb. 8:	Einfluss des Schutzgases beim Hochleistungsschweißen	12
	<i>Influence of the shielding gas in high-performance welding</i>	
Abb. 9:	Auszüge aus der DIN EN 25817 - Unregelmäßigkeiten	15
	<i>Excerpts from the DIN EN 25817 - Irregularities</i>	
Abb. 10:	Auszüge aus der ANSI/AWS 8.8-89	15
	<i>Excerpts from the ANSI/AWS 8.8-89</i>	
Abb. 11:	Tauglichkeit von Sensoren beim Lichtbogenschweißen.....	16
	<i>Applicability of sensors for arc welding</i>	
Abb. 12:	Triangulationsprinzip; Laserscanner; Lichtschnittverfahren	18
	<i>Principle of triangulation; laser scanner; light-section method</i>	
Abb. 13:	Nahtgeometrie Stumpfstoß, Fugenverfolgung eines Überlappstoßes.....	19
	<i>Weld geometry of butt joints; joint tracking of lap joint</i>	
Abb. 14:	Stereosensorsysteme mit zwei oder einer CCD-Zeile.....	20
	<i>Stereo sensor systems with two or one CCD image sensors</i>	
Abb. 15:	Versuchsaufbau und Messung transienter Größen.....	21
	<i>Experimental set-up and measurement of transient values</i>	
Abb. 16:	Elektrische Vorgänge beim Überschweißen einer Stufe	22
	<i>Electrical processes during welding over steps</i>	
Abb. 17:	Bestandteile des Data minings.....	24
	<i>Components of data mining</i>	
Abb. 18:	Begriffsdefinition in Datendateien	26
	<i>Definition of terms in data files</i>	
Abb. 19:	Vorwärtsgerichtetes neuronales Netz zur Parameteroptimierung	28
	<i>Feed-forward neural network for parameter optimisation</i>	
Abb. 20:	Trainingsentwicklung neuronaler Netze und auftretende Probleme	29
	<i>Training development of neural networks and occuring problems</i>	

Abb. 21:	Gegenüberstellung klassische und genetische Lösungsoptimierung.....	33
	<i>Comparison of classical and genetic solution optimisation</i>	
Abb. 22:	Beispiel einer Fuzzy-Anwendung.....	36
	<i>Example of a fuzzy application</i>	
Abb. 23:	Ähnliche Dreiecke	41
	<i>Similar triangles</i>	
Abb. 24:	Untersuchter Parameterraum beim KLB-Schweißen	45
	<i>Tested parameter range for short-arc welding</i>	
Abb. 25:	Untersuchter Parameterraum beim SLB-Schweißen	47
	<i>Tested parameter range for spray-arc welding</i>	
Abb. 26:	Untersuchter Parameterraum beim RLB-Schweißen	47
	<i>Tested parameter range for rotating arc welding</i>	
Abb. 27:	Untersuchter Parameterraum beim ILB-Schweißen für alle U_p	49
	<i>Tested parameter range for pulsed arc welding for all pulse voltages</i>	
Abb. 28:	Screenshot des Startfensters von Scanalyser	52
	<i>Screenshot of the start window Scanalyser</i>	
Abb. 29:	Screenshot DasyLab - Hauptschaltbild mit mehreren Blackboxen.....	53
	<i>Screenshot DasyLab - Main wiring diagram with several blackboxes</i>	
Abb. 30:	Screenshot des Startfensters von NWAssist.....	54
	<i>Screenshot of the start window NWAssist</i>	
Abb. 31:	Skalare Units am Beispiel der Impulsfrequenz 80 Hz.....	55
	<i>Scalar units at the example of the impulse frequency 80 Hz</i>	
Abb. 32:	Korrelationskoeffizient der primären Nonpuls-Quellenparameter.....	56
	<i>Correlation coefficient of the primary non-pulse-source parameters</i>	
Abb. 33:	Korrelationskoeffizient der statistischen Kennzahlen beim KLB.....	57
	<i>Correlation coefficient of the statistical characteristic numbers of KLB</i>	
Abb. 34:	Korrelationskoeffizient der statistischen Kennzahlen beim SLB.....	57
	<i>Correlation coefficient of the statistical characteristic numbers of SLB</i>	
Abb. 35:	Korrelationskoeffizient der statistischen Kennzahlen beim RLB	58
	<i>Correlation coefficient of the statistical characteristic numbers of RLB</i>	
Abb. 36:	SLB Cluster- Oberraupe / Kerben / Spritzer.....	62
	<i>SAP cluster - upper bead / notches / spatters</i>	
Abb. 37:	RLB Cluster - Oberraupe / Kerben / Rotation.....	62
	<i>RAW cluster - upper bead / notches / spatters</i>	
Abb. 38:	Cluster des a-Maßes für SLB und RLB.....	63
	<i>Cluster of effective throat thickness for SAP and RAW</i>	
Abb. 39:	Korrelationskoeffizient der primären Impuls-Quellenparameter	63
	<i>Correlation coefficient of the primary impulse-source parameters</i>	
Abb. 40:	Korrelationskoeffizient der statistischen Kennzahlen beim ILB	64
	<i>Correlation coefficient of the statistical characteristic numbers for PAW</i>	
Abb. 41:	Mittlerer Fehler von Lern- und Testfile - Lernregel/Transferfunktion	68
	<i>Error mean of learning- and test file - learning rule/transfer function</i>	
Abb. 42:	Maximaler Fehler von Lern- und Testfile - Lernregel/Transferfunktion.....	68
	<i>Error maximum of learning- and test file - learning funct./transfer function</i>	

Abb. 43:	Mittlerer Fehler von Lern- und Testfile – Lernschritte.....	69
	<i>Error mean of learning- and test file - learning steps</i>	
Abb. 44:	Maximaler Fehler von Lern- und Testfile – Lernschritte	69
	<i>Error maximum of learning- and test file - learning steps function</i>	
Abb. 45:	Mittlerer Fehler von Lern- und Testfile - Bipolare Inputs	70
	<i>Error mean of learning- and test file - bipolar inputs</i>	
Abb. 46:	Mittlerer Fehler von Lern- und Testfile - Skalare Units	70
	<i>Error mean of learning- and test file - scalar units</i>	
Abb. 47:	Gegenüberstellung Schweißraum / Simulation, Wurzel, KLB-A.....	73
	<i>Comparison weld area / simulation, root, SAW-A</i>	
Abb. 48:	Gegenüberstellung Schweißraum / Simulation, Kerben, SLB.....	74
	<i>Comparison weld area / simulation, notches, SAP</i>	
Abb. 49:	Gegenüberstellung Schweißraum / Simulation, Kerben, RLB.....	74
	<i>Comparison weld area / simulation, notches, RAW</i>	
Abb. 50:	Versuch / Simulation 32 V	75
	<i>Test / Simulation 32 V</i>	
Abb. 51:	Versuch / Simulation 34 V	75
	<i>Test / Simulation 34 V</i>	
Abb. 52:	Versuch / Simulation 36 V	75
	<i>Test / Simulation 36 V</i>	
Abb. 53:	Gesamtraum ILB-A, Ansicht 1.....	76
	<i>Overall area PAW-A, view 1</i>	
Abb. 54:	Gesamtraum ILB-A, Ansicht 2.....	76
	<i>Overall area PAW-A, view 2</i>	
Abb. 55:	Gegenüberstellung Schweißraum / Simulation, Raupe, ILB-B.....	76
	<i>Comparison weld area / simulation, bead, PAW-B</i>	
Abb. 56:	Gegenüberstellung Schweißraum / Simulation, Wurzel, ILB-B	77
	<i>Comparison weld area / simulation, root, PAW-B</i>	
Abb. 57:	Rahmeninformationen des neuronalen Netzes	78
	<i>Covering information about the neural network</i>	
Abb. 58:	Dialogbox ‚Genetische Optimierung‘	78
	<i>Dialog box ‚Genetic Optimisation‘</i>	
Abb. 59:	Dialogbox ‚Evolutionsstrategie‘	79
	<i>Dialog box ‚Evolution Strategy‘</i>	
Abb. 60:	Formel 1.....	81
	<i>Formula 1</i>	
Abb. 61:	Formel 2.....	81
	<i>Formula 2</i>	
Abb. 62:	Formel 3.....	81
	<i>Formula 3</i>	
Abb. 63:	Formel 4.....	81
	<i>Formula 4</i>	
Abb. 64:	Fuzzy-Sets für die Regelgrößen Blechdicke und Vorschub	84
	<i>Fuzzy sets for the regulation variable plate thickness and weld speed</i>	

Abb. 65:	Einfluss von Spaltbreite und Blechdicke auf den Vorschub 85
	<i>Influence of gap width and plate thickness on welding speed</i>
Abb. 66:	Schweißnähte über Parameterstudien oder Fuzzy-Logik generiert 86
	<i>Welds generated over parameter interpretation of fuzzy-logic</i>
Abb. 67:	Einflussgrößen beim MSG-Schweißprozess..... 87
	<i>Influencing variables in GMA weld processes</i>
Abb. 68:	Bilanzhülle um Schmelzbad 89
	<i>Energy summarization about the molten weld pool</i>
Abb. 69:	Erkennungsraten von Oberrauten-Qualität sowie Fehlerarten, Nonpuls100
	<i>Recognition rate of upper bead quality as well es error types, non-pulse</i>
Abb. 70:	Gegenüberstellung der Versuchsreihen ILB-B und ILB-C..... 101
	<i>Comparison of test series PAW-B and PAW-C</i>
Abb. 71:	Durchschnittliche Erkennungsraten bei der Geometrieüberwachung 102
	<i>Average recognition rates in geometry monitoring</i>
Abb. 72:	Prinzipskizze und Strahlengänge von Abbildung und Beleuchtung 103
	<i>Schematic diagram and beam paths of image and illumination</i>
Abb. 73:	Kameragehäuse Stereosensor 104
	<i>Camera body stereo sensor</i>
Abb. 74:	Screenshot ‚StereoEye‘ 105
	<i>Screenshot ‚StereoEye‘</i>
Abb. 75:	CCD-Signal bei $s = 100 \mu\text{m}$ 107
	<i>CCD signal at $s = 100 \mu\text{m}$</i>
Abb. 76:	CCD-Signal bei $s = 200 \mu\text{m}$ 107
	<i>CCD signal at $s = 200 \mu\text{m}$</i>
Abb. 77:	CCD-Signal bei technischem Nullspalt..... 109
	<i>CCD signal at technical zero-gap</i>
Abb. 78:	Skalare Units bei der Fehleranalyse mit binären und exakten Fehlern .. 113
	<i>Scalar units at error analysis of binary and exact errors</i>
Abb. 79:	Gegenüberstellung exakte / binäre Codierung bei der Fehleranalyse ... 114
	<i>Comparison exact/binary codification at error analysis</i>
Abb. 80:	Dasylab-Layout für gute RLB-Schweißung, Schliff 32 116
	<i>Dasylab-layout for good RLB weld, section 32</i>
Abb. 81:	Dasylab-Layout für fehlerhafte RLB-Schweißung, Schliff 33..... 117
	<i>Dasylab-layout for faulty RLB weld, section 33</i>

Tabellenverzeichnis

List of tables

Tab. 1:	Codierung der Lösungsvektoren	34
	<i>Codification of solution vectors</i>	
Tab. 2:	Prinzip der Mutation und Rekombination evolutionärer Methoden.....	34
	<i>Principle of mutation and recombination of evolutionary methods</i>	
Tab. 3:	Relevanzliste der Einflussgrößen – Beispiel	42
	<i>Relevance list of influencing variables - an example</i>	
Tab. 4:	Einflussgrad von Randbedingungen	50
	<i>Influence quantity of boundary conditions</i>	
Tab. 5:	SLB - Fehler der Regressionsformeln und neuronalen Netzen.....	58
	<i>SAP - Errors of regression forms and neural networks</i>	
Tab. 6:	KLB Ergebnisse - Cluster zur Unterscheidung der Qualitätsmerkmale	60
	<i>SAW results - Cluster for the distinction between quality attributes</i>	
Tab. 7:	KLB Cluster - Online-Qualitätsunterscheidung Oberraupe.....	60
	<i>SAW cluster - Online-quality discrimination upper bead</i>	
Tab. 8:	KLB Cluster - Offline-Vorhersage Nahtbreite	60
	<i>SAW cluster - Offline-prediction seam width</i>	
Tab. 9:	KLB Ergebnisse - Offline-Vorhersage Nahtbreite.....	61
	<i>SAW results - Offline-prediction seam width</i>	
Tab. 10:	KLB Cluster - Online-Überwachung Nahthöhe.....	61
	<i>SAW cluster - Online-monitoring seam height</i>	
Tab. 11:	KLB Ergebnisse - Online-Überwachung Nahthöhe	61
	<i>SAW results - Online-monitoring seam height</i>	
Tab. 12:	ILB - Fehler der Regressionsformeln und neuronalen Netzen	65
	<i>PAW - Errors of regression forms and neural networks</i>	
Tab. 13:	ILB - Cluster und Ergebnisse der Online-Qualitätsmerkmale	66
	<i>PAW - Cluster and results of online-quality attributes</i>	
Tab. 14:	ILB - Cluster und Ergebnisse der Offline-Qualitätsmerkmale	66
	<i>PAW - Cluster and results of offline-quality attributes</i>	
Tab. 15:	ILB Cluster - Online-Überwachung Nahthöhe	67
	<i>PAW cluster - Online-monitoring seam height</i>	
Tab. 16:	ILB Cluster - Offline-Überwachung Nahtbreite	67
	<i>PAW cluster - Offline-monitoring seam width</i>	
Tab. 17:	Optimum der Netzparameter für die Qualitätsanalyse	71
	<i>Optimum of network parameters for quality analysis</i>	
Tab. 18:	Topologie und Simulationsergebnisse [%] für KLB-A.....	73
	<i>Topology and simulation results [%] for SAW-A</i>	
Tab. 19:	Topologie und Simulationsergebnisse [%] für SLB	73
	<i>Topology and simulation results [%] for SAP</i>	
Tab. 20:	Topologie und Simulationsergebnisse [%] für RLB	73
	<i>Topology and simulation results [%] for RAW</i>	

Tab. 21: Simulationsergebnisse ILB-A	75
<i>Simulation results PAW-A</i>	
Tab. 22: Topologie und Simulationsergebnisse [%] für ILB-B	77
<i>Topology and simulation results [%] for PAW -B</i>	
Tab. 23: Anzahl der Generationen und RMS bei mathematischen Testformeln.....	81
<i>Number of generations and RMS in mathematical test forms</i>	
Tab. 24: Parametervorschläge und Gegenüberstellung MAGWIN - KI-Methoden ...	82
<i>Parameter suggestions and comparison MAGWIN - AI-methods</i>	
Tab. 25: Parameterpunkte für extreme Randbedingungskonstellationen.....	84
<i>Parameter points for extreme constellations of boundary conditions</i>	
Tab. 26: Fuzzy Regelungssystem.....	85
<i>Fuzzy rule system</i>	
Tab. 27: Fuzzy-Logik generierte Parameterpunkte.....	86
<i>Fuzzy-Logic generated parameter points</i>	
Tab. 28: Relevanzliste der Einflussgrößen.....	88
<i>Relevance list of influencing variables</i>	
Tab. 29: Simulationen für die Wurzelerkennung des KLB und Rotation des RLB..	101
<i>Simulations for root recognition in SAW and rotation of RAW</i>	
Tab. 30: Einfluss von Spalt, Verschiebung und Abstand auf das CCD-Signal	108
<i>Influence of gap, transposition and distance on the CCD signal</i>	
Tab. 31: Fehler der neuronalen Netze bei der v_D -Regelung.....	111
<i>Neural networks error at v_D control</i>	
Tab. 32: Fehler der neuronalen Netze bei der v_s -Regelung	111
<i>Neural networks error at v_s control</i>	

Schliffbilderverzeichnis

List of metallographic sections

Schliff 1:	MAGWIN, $v_s = 30 \text{ cm}^3/\text{min}$, KLB-A	82
	MAGWIN, $v_s = 30 \text{ cm}^3/\text{min}$, SAW-A	
Schliff 2:	KI, $v_s = 95,9 \text{ cm}^3/\text{min}$, KLB-A	82
	AI, $v_s = 95,9 \text{ cm}^3/\text{min}$, SAW-A	
Schliff 3:	MAGWIN, $v_s = 32 \text{ cm}^3/\text{min}$, ILB-A	82
	MAGWIN, $v_s = 32 \text{ cm}^3/\text{min}$, SAP-A	
Schliff 4:	KI, $v_s = 71 \text{ cm}^3/\text{min}$, PAW-A	82
	AI, $v_s = 71 \text{ cm}^3/\text{min}$, PAW-A	
Schliff 5:	MAGWIN, $v_s = 41 \text{ cm}^3/\text{min}$, ILB-B	83
	MAGWIN, $v_s = 41 \text{ cm}^3/\text{min}$, PAW-B	
Schliff 6:	KI, $v_s = 57 \text{ cm}^3/\text{min}$, ILB-B	83
	AI, $v_s = 57 \text{ cm}^3/\text{min}$, PAW-B	
Schliff 7:	MAGWIN, $v_s = 48 \text{ cm}^3/\text{min}$, SLB	83
	MAGWIN, $v_s = 48 \text{ cm}^3/\text{min}$, SAP	
Schliff 8:	KI, $v_s = 125 \text{ cm}^3/\text{min}$, SLB	83
	AI, $v_s = 125 \text{ cm}^3/\text{min}$, SAP	
Schliff 9:	$v_s = 45,0 \text{ cm}^3/\text{min}$, RLB	83
	$v_s = 45,0 \text{ cm}^3/\text{min}$, RAW	
Schliff 10:	KI, $v_s = 51,7 \text{ cm}^3/\text{min}$, RLB	83
	AI, $v_s = 51,7 \text{ cm}^3/\text{min}$, RAW	
Schliff 11:	Ursprung 2mm	92
	Origin 2mm	
Schliff 12:	v_s -Optimierung, Ansatz A	93
	v_s -optimisation, approach A	
Schliff 13:	Ursprung 1,5 mm, Ansatz B	93
	Origin 1,5 mm, approach B	
Schliff 14:	v_s -Optimierung Ansatz B	93
	v_s -optimisation approach B	
Schliff 15:	v_s -Optimum 1,5 mm, Ansatz C	93
	v_s -Optimum 1,5 mm, approach C	
Schliff 16:	v_s -Optimum 2 mm, Ansatz C	93
	v_s -Optimum 2 mm, approach C	
Schliff 17:	Ursprung 3 mm, Ansatz C	94
	Origin 3 mm, approach C	
Schliff 18:	v_s -Optimum, Ansatz C	94
	v_s -Optimum, approach C	
Schliff 19:	Ursprung 2 mm	96
	Origin 2 mm	
Schliff 20:	v_s -Optimierung, Ansatz D	96
	v_s -optimisation, approach D	

Schliff 21:	Ursprung 1,5 mm, Ansatz E	97
	<i>Origin 1,5 mm, approach E</i>	
Schliff 22:	Ursprung 1,5 mm, Ansatz F	97
	<i>Origin 1,5 mm, approach F</i>	
Schliff 23:	v_s -Optimierung, Ansatz E.....	97
	<i>v_s-optimisation, approach E</i>	
Schliff 24:	v_s -Optimum, Ansatz F.....	97
	<i>v_s-Optimum, approach F</i>	
Schliff 25:	v_s -Optimum 2 mm, Ansatz F	97
	<i>v_s-Optimum 2 mm, approach F</i>	
Schliff 26:	Ursprung 3 mm, Ansatz F	98
	<i>Origin 3 mm, approach F</i>	
Schliff 27:	v_s -Optimum, Ansatz F.....	98
	<i>v_s-Optimum, approach F</i>	
Schliffe 28:	Schweißnähte bei $s = 0 / 0,5 / 1$ mm; $v_D = 3,5$ m/min.....	111
	<i>Welds at $s = 0 / 0,5 / 1$ mm; $v_D = 3,5$ mm</i>	
Schliffe 29:	Schweißnähte bei $s = 0 / 0,5 / 1$ mm; v_D geregelt	111
	<i>Welds at $s = 0 / 0,5 / 1$ mm; v_D controlled</i>	
Schliffe 30:	Schweißnähte bei $s = 1 / 0,5 / 0$ mm; $v_s = 30$ m/min	112
	<i>Welds at $s = 1 / 0,5 / 0$ mm; $v_s = 30$ m/min</i>	
Schliffe 31:	Schweißnähte bei $s = 1 / 0,5 / 0$ mm; v_s geregelt	112
	<i>Welds at $s = 1 / 0,5 / 0$ mm; v_s controlled</i>	
Schliff 32:	Gute RLB-Schweißung	115
	<i>Good RLB weld</i>	
Schliff 33:	Fehlerhafte RLB-Schweißung	115
	<i>Faulty RLB weld</i>	

Abkürzungen und Formelzeichen

Abbreviations and formulas

A/D	Analog/Digital <i>Analog/digital</i>	
AH	Analysator Hannover XVI <i>Analysator Hannover XVI</i>	
a	a-Maß..... mm <i>Effective throat thickness</i>	
a _l	Ausgangsvektor-Neuron <i>Output vector - neuron</i>	
b	Nahtbreite mm <i>Seam width</i>	
c	Kerbtiefe..... mm <i>Dimension to bottom of notch</i>	
d _D	Durchmesser Zusatzdraht..... mm <i>Diameter filler wire</i>	
d _k	Kugeldurchmesser m <i>Ball diameter</i>	
DBD	Delta-Bar-Delta - Regel <i>Delta-Bar-Delta - rule</i>	
E	Elastizitätsmodul Pa <i>Elastic module</i>	
EDBD	Extended Delta-Bar-Delta - Regelrule <i>Extended Delta-Bar-Delta - rule</i>	
E _p	Fehler eines Musters bei neuronalen Netzen <i>Error in pattern of neural network</i>	
ES	Evolutionsstrategie <i>Evolution strategy</i>	
e	Einbrandtiefe mm <i>Penetration depth</i>	
e _k	Eingangsvektor Neuron <i>Input vector - neuron</i>	
e _p	Erwartete Ausgabe an neuronalem Netz <i>Expected output at neural network</i>	
e _s	Solleinbrandtiefe mm <i>Planned penetration depth</i>	
FFT	Fast Fourier Transformation <i>Fast Fourier Transformation</i>	
FMH	Fuzzy Monitor Hannover II <i>Fuzzy Monitor Hannover II</i>	
F _w	Widerstandskraft N <i>Strength</i>	

f_P	Pulsfrequenz Hz <i>Pulse frequency</i>
GA_h	Hybrider genetischer Algorithmus <i>Hybrid genetic algorithm</i>
GA_k	Klassischer genetischer Algorithmus <i>Classic genetic algorithm</i>
h	Nahthöhe mm <i>Weld height</i>
HL	Hochleistung <i>High performance</i>
ILB	Impulslichtbogenprozess <i>PAW - Pulsed-arc process</i>
I	Elektrische Stromstärke A <i>Current intensity</i>
I_{An_Mw}	Mittelwert Anstiegsgeschwindigkeit Stromstärke A/ms <i>Mean value build-up rate of current intensity</i>
I_{An_Sa}	Standardabweichung Anstiegsgeschwindigkeit Stromstärke A/ms <i>Standard deviation build-up rate of current intensity</i>
I_G	Grundstrom A <i>Background current</i>
I_Mw	Mittelwert Stromstärke Grundphase A <i>Mean value of current intensity during basic phase</i>
I_Sa	Standardabweichung Stromstärke Grundphase A <i>Standard deviation of current intensity during basic phase</i>
I_{max_Mw}	Mittelwert maximale Stromstärke im Kurzschluss A <i>Mean value maximum current intensity during short-circuit</i>
I_{max_Sa}	Standardabweichung maximale Stromstärke im Kurzschluss A <i>Standard deviation maximum current intensity during short-circuit</i>
I_P_Mw	Mittelwert Stromstärke Pulsphase A <i>Mean value current intensity during pulse phase</i>
I_P_Sa	Standardabweichung Stromstärke Pulsphase A <i>Standard deviation current intensity during pulse phase</i>
I_Pos	Frequenz des maximalen FFT-Koeffizienten der Stromstärke Hz <i>Frequency of maximum FFT coefficient of current intensity</i>
I_Wert	Maximaler FFT-Koeffizient der Stromstärke <i>Maximum FFT coefficient of current intensity</i>
KI	Künstliche Intelligenz <i>AI - Artificial intelligence</i>
KLB	Kurzlichtbogenprozess <i>SAW - Short arc process</i>
$Kurz_Mw$	Mittelwert Kurzschlussdauer KLB/SLB ms <i>Mean value short-circuit time SAW/SAP</i>
$Kurz_Sa$	Standardabweichung Kurzschlussdauer KLB/SLB ms <i>Standard deviation short-circuit time SAW/SAP</i>

Kur _{zG}	Mittelwert Kurzschlussdauer Grundphase ILBms <i>Mean value short-circuit time during basic phase PAW</i>
Kur _{zP}	Mittelwert Kurzschlussdauer Pulsphase ILBms <i>Mean value short-circuit time during pulse phase PAW</i>
k	Kontaktrohrabstand..... mm <i>Contact tube-to-work distance</i>
M ₁ , M ₂	Abstände Spaltmittelpunkt zur SensormittePixel <i>Distances gap centre to sensor centre</i>
MAG	Metall-Aktivgas <i>Metal active gas</i>
MIG	Metall-Inertgas <i>Metal inert gas</i>
MSG	Metall-Schutzgas <i>GMA - Gas metal arc</i>
Mw	Mittelwert <i>Mean value</i>
m* _D	Massenstrom Zusatzdraht.....kg/s <i>Mass flow filler wire</i>
o _p	Reale Ausgabe an neuronalem Netz <i>Real output at neural network</i>
q*	WärmestromdichteK/m ² <i>Heat flux density</i>
RLB	Rotierender Lichtbogenprozess <i>RAW - Rotating arc welding process</i>
RMS	Mittleres Fehlerquadrat <i>Root Mean Square</i>
R	Elektrischer WiderstandΩ <i>Electric resistance</i>
r	Korrelationskoeffizient <i>Correlation coefficient</i>
Sa	Standardabweichung <i>Standard deviation</i>
SLB	Sprühlichtbogenprozess <i>SAP - Spray arc process</i>
Sp ₁ , Sp ₂	Spaltbreitenerkennung beim StereosensorPixel <i>Gap width recognition by stereo sensor</i>
s	Spaltbreite..... mm <i>Gap width</i>
T.I.M.E.	Transferred Ionized Molten Energy <i>Transferred Ionized Molten Energy</i>
T _s	Schmelztemperatur K <i>Melting temperature</i>
t	Werkstückdicke mm <i>Workpiece thickness</i>

t_P	Pulsdauer.....ms <i>Pulse duration</i>
U	Elektrische Spannung V <i>Voltage</i>
U_{An_Mw}	Mittelwert Anstiegsgeschwindigkeit Spannung V/ms <i>Mean value build-up rate of voltage</i>
U_{An_Sa}	Standardabweichung Anstiegsgeschwindigkeit Spannung V/ms <i>Standard deviation build-up rate of voltage</i>
U_Mw	Mittelwert Spannung Grundphase..... V <i>Mean value voltage during basic phase</i>
U_Sa	Standardabweichung Spannung Grundphase V <i>Standard deviation voltage during basic phase</i>
U_P	Pulsspannung V <i>Pulse voltage</i>
U_P_Mw	Mittelwert Spannung Pulsphase..... V <i>Mean value voltage during pulse phase</i>
U_P_Sa	Standardabweichung Spannung Pulsphase V <i>Standard deviation voltage during pulse phase</i>
U_Pos	Frequenz des maximalen FFT-Koeffizienten der Spannung..... Hz <i>Frequency of maximum FFT coefficient of voltage</i>
U_Wert	Maximaler FFT-Koeffizient der Spannung <i>Maximum FFT coefficient of voltage</i>
V	Qualitätsfaktor - Zuordnung von b und h über DIN EN 25817 <i>Quality Factor - Allocation of b and h over DIN EN 25817</i>
v_D	Geschwindigkeit Zusatzdraht m/min <i>Filler wire speed</i>
v_k	Geschwindigkeit Kugel..... m/s <i>Ball speed</i>
v_s	Schweißgeschwindigkeit cm/min <i>Weld speed</i>
WIG	Wolfram-Inertgas <i>TIG - Tungsten inert gas</i>
w_{kl}	Gewichtsmatrix eines neuronalen Netzes <i>Weight matrix of a neural network</i>
Z	Impedanz S <i>Impedance</i>

α	Momentum-Term neuronaler Netze <i>Momentum-term of neural networks</i>	
ϑ	TemperaturK <i>Temperature</i>	
η	Viskosität Pa·s <i>Viscosity</i>	
η_{KI}	Schrittweite neuronaler Netze <i>Step width of neural networks</i>	
λ	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient <i>Coefficient of thermal conduction</i>	
λ_{KI}	Anzahl Nachkommen (Evolutionsstrategie) <i>Number of descendants (evolution strategy)</i>	
μ	Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion <i>Fuzzy affiliation function</i>	
μ_{KI}	Anzahl Eltern (Evolutionsstrategie) <i>Number of parents (evolution strategy)</i>	
ρ	Dichte kg/m ³ <i>Density</i>	
τ	Mutationsschrittweite <i>Mutation step width</i>	