

Michael Piott

Numerische Simulation des
Widerstandspunktschweiß- und
Widerstandspunktschweißklebeprozesses
von Aluminiumlegierungen

BEIRICHT

Numerische Simulation des Widerstandspunktschweiß- und Widerstandspunktschweißklebprozesses von Aluminiumlegierungen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

M.Sc.

Michael Piott

geboren am 14.01.1991 in Ellwangen (Jagst)

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl Roll
Tag der mündlichen Prüfung: 30.06.2021

Berichte des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik
der BTU Cottbus-Senftenberg

Band 15

Michael Piott

**Numerische Simulation des Widerstandspunkt-
schweiß- und Widerstandspunktschweißklebe-
prozesses von Aluminiumlegierungen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8320-0

ISSN 1867-4887

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Mercedes-Benz AG im Bereich der digitalen Fabrik im Werk Sindelfingen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov, Inhaber des Lehrstuhls für Füge und Schweißtechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und die wertvollen fachlichen Diskussionen, welche wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Roll danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz als Vorsitzender der Promotionskommission.

Meinen Kolleginnen und Kollegen bei Daimler möchte ich für die zahlreichen fachlichen, aber auch persönlichen Diskussionen und die Unterstützung bei Experimenten und Simulationen danken. Mein herzlicher Dank gebührt dabei insbesondere Frau Dr.-Ing. Alexandra Werber und Herrn Felix Bauer.

Zudem bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Ralf Ossenbrink, Herrn Dr.-Ing. Leander Schleuß und Herrn Dr.-Ing. Nikolay Doynov vom Lehrstuhl für Füge- und Schweißtechnik für die fachliche Unterstützung und die stets produktiven Diskussionen.

Für ihre unermüdliche Unterstützung, ihr Verständnis während der Erstellung dieser Arbeit und ihre Förderung meines bisherigen Lebensweges danke ich meinen Eltern und meiner Freundin Susanne.

Zusammenfassung

Der zunehmende Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im automobilen Karosseriebau, insbesondere von Aluminiumlegierungen, erfordert eine Weiterentwicklung und Anpassung der bestehenden Fügechnik auf die neuen Werkstoffe. Als wichtiges Fügeverfahren im Karosseriebau hat sich hierbei das Widerstandspunktschweißen bzw. Widerstandspunktschweißkleben für Stahlwerkstoffe bewährt. Die numerische Simulation kann dazu beitragen, den Schweißprozess für neue Werkstoffe zu analysieren und optimieren bei einer Reduzierung von aufwändigen Experimenten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der numerischen Simulation des Widerstandspunktschweiß- und Widerstandspunktschweißklebeprozesses von Aluminiumlegierungen. Dabei wird eine Methode zur Modellierung der Schweißprozesse mit dem Ziel einer digitalen Abbildung der Schweißliniengestaltung aufgebaut und validiert.

Hierzu werden im ersten Schritt die eingesetzten Aluminiumlegierungen AA5182 und AA6014 sowie der eingesetzte Strukturklebstoff experimentell charakterisiert. Anschließend werden die Randbedingungen des Temperaturfeldes untersucht und kalibriert.

Im folgenden Schritt wird der Widerstandspunktschweißprozess mit instrumentierten Schweißversuchen analysiert sowie ein FE-Modell aufgebaut und umfassend validiert. Wesentliches Element des Modells stellt ein neues Kontaktwiderstandsmodell dar, welches das Verhalten des elektrischen Kontaktes unter schweißtypischer Beanspruchung für Aluminiumoberflächen abbilden kann. Zudem wird der Einfluss unterschiedlicher Schweißparameter, Werkstoffe, Oberflächenzustände, Spalte und Elektrodenkühlung auf die Schweißliniengröße experimentell und numerisch analysiert.

Abschließend werden die Auswirkungen einer Klebstoffzwischenlage auf den Schweißprozess (Widerstandspunktschweißkleben) untersucht und das FE-Modell dahingehend erweitert. Hierzu gehört sowohl die Integration eines Klebstoffspaltes als auch die Erweiterung des Kontaktwiderstandsmodells.

Abstract

The increasing use of lightweight materials in automotive body in white shop, especially aluminum alloys, requires further development and adaptation of existing joining technology to the new materials. Resistance spot welding or spot weld bonding for steel materials has proven to be an important joining process in car body constructions. Numerical simulation can help to analyze and optimize the welding process for new materials while reducing the need for extensive experiments.

The present work deals with the numerical simulation of the resistance spot welding process and spot weld bonding process of aluminium alloys. A method for modeling the welding processes with the aim of a digital depiction of the nugget formation is built up and validated.

In a first step, the aluminum alloys AA5182 and AA6014 as well as the used structural adhesive are characterized experimentally. Subsequently, thermal boundary conditions are investigated and calibrated.

In the next step, the resistance spot welding process is analyzed with instrumented experiments and a FE-model is built and validated comprehensively. An essential element of the model is a new contact resistance model, which is able to describe the behavior of the electrical contact under typical welding conditions for aluminum surfaces. Additionally, the influence of different welding parameters, materials, surface conditions, gaps and electrode cooling on the nugget size is analyzed experimentally and numerically.

Finally, the effects of an adhesive on the welding process (spot weld bonding) are investigated and the FE-model is extended. This includes the integration of an adhesive gap as well as the extension of the contact resistance model.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Widerstandspunktschweißen	3
2.2 Widerstandspunktschweißkleben	6
2.3 Werkstofftechnische Grundlagen	7
2.4 Grundlagen der Modellierung	11
2.5 Schlussfolgerungen, Zielsetzung und Vorgehensweise	28
3 Verwendete Werkstoffe, Anlagen und Prüfmethode	31
3.1 Werkstoffcharakterisierung	31
3.2 Schweißanlagen	38
3.3 Prüfmethode	39
3.4 Statistische Versuchsplanung	39
3.5 Simulationssoftware	40
4 Charakterisierung des Wärmeübergangs	41
4.1 Aufbau der Wärmeübergangsversuche	41
4.2 FE-Simulationsmodell	43
4.3 Ergebnisse der Wärmeübergangsuntersuchungen	45
4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	54

5	Widerstandspunktschweißen	55
5.1	Aufbau der Versuche	55
5.2	FE-Simulationsmodell	59
5.3	Kontaktwiderstandsmodell	60
5.4	Validierung des FE-Simulationsmodells	78
5.5	Einfluss der Elektrodenkühlung	87
5.6	Einfluss der Schweißparameter und Werkstoffe	95
5.7	Einfluss des Oberflächenzustandes	102
5.8	Einfluss eines Spaltes	104
5.9	Sensitivitätsanalyse	109
5.10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	116
6	Widerstandspunktschweißkleben	121
6.1	Aufbau der Versuche	121
6.2	Einfluss der Klebstoffzwischen- schicht	122
6.3	Erweiterung des FE-Simulationsmodells für Klebstoffzwischen- schichten	126
6.4	Einfluss der Schweißparameter und Werkstoffe	130
6.5	Einfluss des Oberflächenzustandes	135
6.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	137
7	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	145
	Eigene Veröffentlichungen	161
A	Anhang	A-1
A.1	Untersuchungen zum Wärmeübergang	A-1
A.2	Untersuchungen zum Widerstandspunktschweißen	A-19
A.2.1	Einpuls-Schweißungen	A-19
A.2.2	Zweipuls-Schweißungen	A-23
A.2.3	Vergleich der 2D- und 3D-Simulation	A-35
A.2.4	Sensitivitätsanalyse	A-36
A.3	Untersuchungen zum Widerstandspunktschweißkleben	A-41
A.3.1	Einpuls-Schweißungen	A-41
A.3.2	Zweipuls-Schweißungen	A-45

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prozessschritte	3
2.2	Widerstandsverhältnisse nach [6]	4
2.3	Linsengeometrie nach [3, 11]	5
2.4	Schematischer Ablauf des Widerstandspunktschweißlebens nach [18]	7
2.5	Schematischer Aufbau der Oxidschicht nach [28, 36]	9
2.6	Schematische Kontaktfläche zwischen zwei rauen Aluminium- Blechoberflächen	13
2.7	Schematischer elektrischer Kontakt zwischen einer rauen und einer ebenen Oberfläche nach [70, 71]	14
2.8	Verlustwärme an einer Schweißstelle nach [114]	23
3.1	E-Modul und Poissonzahl von: (a) AA5182; (b) AA6014	32
3.2	Warmzugproben: (a) Abmessungen; (b) zerstörte Probe nach Zugversuch	32
3.3	Gemessene Wärmedehnungen und ermittelte Wärmeausdehn- ungskoeffizienten	33
3.4	Warmfließkurven von: (a) AA5182; (b) AA6014	34
3.5	Thermo-physikalische Werkstoffeigenschaften von: (a) AA5182; (b) AA6014	36
3.6	Thermogravimetrische Messung des Klebstoffs	37
3.7	X-Zange der Schweißanlage 1	38
4.1	Schematischer Aufbau der Wärmeübergangsversuche	42
4.2	Schematische Darstellung der mechanischen (grün) und thermi- schen (blau) Randbedingungen in der Wärmeübergangssimula- tion	44
4.3	Elektrodenkappenabmessungen und Position der Thermoele- mente (Maße in <i>mm</i>)	46

4.4	Vergleich der aufgezeichneten und berechneten Temperaturfelder: (a) AA5182; (b) AA6014	47
4.5	Vergleich der gemessenen und berechneten Blechtemperaturen: (a) AA5182; (b) AA6014	48
4.6	Vergleich der gemessenen und berechneten Elektroden-temperaturen: (a) AA5182; (b) AA6014	49
4.7	Vergleich der gemessenen und berechneten Kühlleistung an einer Elektrode: (a) AA5182; (b) AA6014	50
4.8	Berechnete Wärmeverteilung: (a) AA5182; (b) AA6014 . . .	50
4.9	Vergleich der aufgezeichneten und berechneten Temperaturfelder des Zweiblechversuches	51
4.10	Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen des Zweiblechversuches: (a) Blechtemperaturen; (b) Elektroden-temperaturen	52
4.11	Vergleich der dissipierten Wärme des Zweiblechversuches: (a) gemessene und berechnete Kühlleistung an der unteren Elektrode; (b) berechnete Verlustwärme durch erzwungene und natürliche Konvektion	53
4.12	Berechnete Wärmeverteilung des Zweiblechversuches: (a) absolute Wärmemengen; (b) anteilige Wärmemengen	54
5.1	Aufbau der Widerstandspunktschweißversuche (Maße in <i>mm</i>)	55
5.2	Verwendete Schweißprogramme: (a) Einpuls-Programm; (b) Zweipuls-Programm	56
5.3	Schematische Darstellung der Schweißanlage 1 mit Instrumentierung	57
5.4	Schweißanlage 2 mit Instrumentierung	57
5.5	Schematische Darstellung der Spannungsdifferenz-Messung . .	58
5.6	Schematische Darstellung der mechanischen (grün), thermischen (blau) und elektrischen (orange) Randbedingungen	60
5.7	Berechnung von Kontaktwiderständen und der Joule'schen Stromwärmeleistung	63
5.8	Gemessene Schweißparameter der Einpuls-Versuche bei Elektrodenkraft 5 <i>kN</i> : (a),(c) Schweißstrom und Elektrodenkraft AA5182; (b),(d) Schweißstrom und Elektrodenkraft AA6014	65

5.9	Simulationsergebnisse an der Elektrodenkappe mit AA5182 ohne Kontaktwiderstand nach 100 ms bei Elektrodenkraft 5 kN und Schweißstrom 8 kA: (a) Potentialfeld; (b) Stromdichteverteilung	66
5.10	Abmessungen der Elektrodenkappen und Spannungsabnahmestellen von: (a) AA5182; (b) AA6014	67
5.11	Messung der Elektrode-Blech-Widerstände bei Elektrodenkraft 5 kN und Schweißstrom 8 kA: (a) AA5182; (b) AA6014 . . .	67
5.12	Messung der Blech-Blech-Widerstände bei Elektrodenkraft 5 kN und Schweißstrom 8 kA: (a) AA5182; (b) AA6014	68
5.13	Berechnete Kontaktdruck- und Kontakttemperaturverteilung ohne Kontaktwiderstand bei Elektrodenkraft 5 kN nach 100 ms: (a),(c) Elektrode-Blech- und Blech-Blech-Kontakt AA5182; (b),(d) Elektrode-Blech- und Blech-Blech-Kontakt AA6014 .	69
5.14	Kalibrierte Druck- und Temperaturfunktionen $\Psi(p, T)$ von: (a) AA5182; (b) AA6014	70
5.15	Berechnete Druck-, Temperatur- und Kontaktwiderstandsverteilung bei Elektrodenkraft 5 kN nach 100 ms: (a),(c) Elektrode-Blech- und Blech-Blech-Kontakt AA5182; (b),(d) Elektrode-Blech- und Blech-Blech-Kontakt AA6014	71
5.16	Berechnete elektrische Kontaktflächen bei Elektrodenkraft 5 kN: (a) AA5182; (b) AA6014	72
5.17	Berechnete Kontaktdruck- und Kontakttemperaturverteilung bei Elektrodenkraft 5 kN und Schweißstrom 8 kA: (a),(c) Elektrode-Blech- und Blech-Blech-Kontakt AA5182; (b),(d) Elektrode-Blech- und Blech-Blech-Kontakt AA6014 .	73
5.18	Gemessene und berechnete Widerstände bei Elektrodenkraft 5 kN: (a),(c) Anode-Blech und Kathode-Blech; (b),(d) Anode-Blech und Kathode-Blech AA6014	74
5.19	Gemessene und berechnete Widerstände zwischen den Blechen bei Elektrodenkraft 5 kN: (a) AA5182; (b) AA6014	75
5.20	Gemessene und berechnete Widerstände bei unterschiedlicher Elektrodenkraft und Schweißstrom 8 kA: (a),(c) Anode-Blech und Kathode-Blech AA5182; (b),(d) Anode-Blech und Kathode-Blech AA6014	76

5.21 Aufteilung der berechneten Gesamtwiderstände zwischen Anode und Blech bei Elektrodenkraft 5 kN und Schweißstrom 8 kA : (a) AA5182; (b) AA6014	77
5.22 Aufteilung der berechneten Gesamtwiderstände zwischen den Blechen bei Elektrodenkraft 5 kN und Schweißstrom 8 kA : (a) AA5182; (b) AA6014	78
5.23 Gemessene Elektrodenkraft und Strom eines exemplarischen Zweipulsversuches	79
5.24 Position der Spannungsabnehmer und Thermoelemente . . .	79
5.25 Gemessene und berechnete Widerstände: (a) Anode-Blech; (b) Blech-Blech	81
5.26 Berechnete elektrische Kontaktflächen	81
5.27 Joule'sche Stromwärme: (a) Anode-Blech; (b) Blech-Blech .	82
5.28 Berechnete plastische Verformungsenergie	83
5.29 Gemessene und berechnete Temperaturen: (a) Elektrode; (b) Blech	84
5.30 Gemessene und berechnete Schweißlinse	84
5.31 Gemessene und berechnete Verlustwärme durch erzwungenen Konvektion	85
5.32 Gemessene und berechnete Elektrodenbewegung	86
5.33 Gemessene Widerstände bei unterschiedlicher Kühlwasserdurchflussmenge: (a) Anode-Blech; (b) Blech-Blech	87
5.34 Gemessene Elektrodentemperaturen bei unterschiedlicher Kühlwasserdurchflussmenge	88
5.35 Gemessene Verlustwärme durch erzwungene Konvektion bei unterschiedlicher Kühlwasserdurchflussmenge	88
5.36 Gemessene Elektrodenbewegungen bei unterschiedlicher Kühlwasserdurchflussmenge	89
5.37 Berechnete Elektrodenzustände bei unterschiedlicher Kühlrandbedingung: (a) Temperatur; (b) Energiezunahme beide Elektroden	91
5.38 Berechnete Blechzustände bei unterschiedlicher Kühlrandbedingung: (a) Temperatur; (b) Energiezunahme beide Bleche	91
5.39 Berechnete Verlustwärme durch erzwungene Konvektion am Kühlwasser bei unterschiedlichen Kühlrandbedingungen . . .	92

5.40	Berechnete Verlustwärme an den Blechen und Elektroden durch natürliche Konvektion und Strahlung zur Umgebungsluft bei unterschiedlichen Kühlrandbedingungen	93
5.41	Berechnete Anteile der in Blechen, Elektroden und Kühlwasser gespeicherten bzw. abgeführten Wärme/Energie von der Gesamtenergie bei unterschiedlichen Kühlrandbedingungen . . .	94
5.42	Berechnete Elektrodenbewegung bei unterschiedlichen Kühlrandbedingungen	94
5.43	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit AA5182 bei unterschiedlichen Schweißparametern	97
5.44	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit AA6014 bei unterschiedlichen Schweißparametern	98
5.45	Vergleich der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Blechkombinationen mit einer Elektrodenkraft von 5 kN : (a) Widerstand Blech-Blech; (b) Elektrodenkraft	99
5.46	Gemessene und berechnete Widerstände bei einer Elektrodenkraft von 5 kN und Hauptschweißstrom 40 kA : (a) Anode-Blech; (b) Kathode-Blech; (c) Blech-Blech	100
5.47	Gemessene und berechnete Schweißlinse bei einer Elektrodenkraft von 5 kN und Hauptschweißstrom 40 kA	101
5.48	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit der Blechkombination AA6014+AA5182 bei unterschiedlichen Schweißparametern	101
5.49	Gemessene Schweißparameter bei unterschiedlicher Blechoberfläche: (a) AA5182; (b) AA6014	103
5.50	Gemessene und berechnete Widerstände bei unterschiedlicher Blechoberfläche: (a),(c) Anode-Blech und Blech-Blech AA5182; (b),(d) Anode-Blech und Blech-Blech AA6014	104
5.51	Aufbau der Spaltversuche: (a) Schematischer Versuchsaufbau; (b) Blech mit appliziertem Klebeband	105
5.52	Schematischer Aufbau der Simulation mit Spalt	106
5.53	Gemessene Schweißparameter bei unterschiedlichem Spalt . . .	106
5.54	Einfluss unterschiedlicher Spalte auf: (a),(b) gemessene und berechnete Widerstände zwischen Anode-Blech und Blech-Blech; (c),(d) berechnete Kontaktflächen und Kraftverluste zwischen Anode-Blech und Blech-Blech	108

5.55	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit AA5182 bei unterschiedlicher Spalthöhe	108
5.56	Maximaltemperaturfeld bei Elementkantenlänge 0,4 mm . . .	110
5.57	Einfluss der Elementkantenlänge (EKL) auf: (a) Maximaltemperaturen in der Fügeebene; (b) zeitlicher Temperaturverlauf am Mittelpunkt der Fügeebene	110
5.58	Einfluss der Zeitschrittweite auf: (a) Maximaltemperaturen in der Fügeebene; (b) zeitlicher Temperaturverlauf am Mittelpunkt der Fügeebene	111
5.59	Linsendurchmesser abhängig von den Haupteinflussfaktoren bei mittlerem Stufenwert der anderen Einflüsse: (a) Leitfähigkeit; (b) Fließkurven	114
5.60	Beeinflussung des Linsendurchmessers durch Wechselwirkungen: (a) Leitfähigkeit und Spalt; (b) Fließkurven und Spalt	116
6.1	(a) aufgetragene Klebstoffraupe; (b) ausgehärtete Klebstoffschicht nach dem Schweißprozess	122
6.2	Gemessene Elektrodenkraft mit und ohne Klebstoffzwischen-schicht: (a) AA5182; (b) AA6014	122
6.3	Gemessene Widerstände mit und ohne Klebstoffzwischen-schicht: (a),(c) Anode-Blech und Blech-Blech AA5182; (b),(d) Anode-Blech und Blech-Blech AA6014	123
6.4	Exemplarische Schliffbilder mit und ohne Klebstoffzwischen-schicht: (a) AA5182; (b) AA6014	124
6.5	Gemessene Elektrodenbewegung mit und ohne Klebstoffzwischen-schicht: (a) AA5182; (b) AA6014	124
6.6	Schematische Darstellung der Auswirkungen einer Klebstoff-schicht	125
6.7	Exemplarisches Schliffbild mit Klebstoffspalt	126
6.8	Schematischer Aufbau der Simulation des Widerstandspunkt-schweißklebens	127
6.9	Modellierung des Klebstofffaktors $K(T)$	128
6.10	Einpuls-Schweißversuche mit Klebstoffzwischen-schicht: (a),(b) gemessene Elektrodenkraft; (c)-(f) gemessene und be-rechnete Widerstände	129

6.11	Gemessene Spalthöhen der Zweipuls-Schweißversuche mit Klebstoff	131
6.12	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit AA5182 bei unterschiedlichen Schweißparametern mit Klebstoffzwischen- schicht	131
6.13	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit AA6014 bei unterschiedlichen Schweißparametern mit Klebstoffzwischen- schicht	132
6.14	Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit Klebstoffzwischen- schicht: (a) gemessene Elektrodenkraft; (b)-(d) gemessene und berechnete Widerstände	133
6.15	Gemessene und berechnete Schweißlinse der Blechkombination AA6014+AA5182 mit Klebstoffzwischen- schicht	134
6.16	Gemessene und berechnete Linsen- und Punktdurchmesser mit der Blechkombination AA6014+AA5182 bei unterschiedlichen Schweißparametern mit Klebstoffzwischen- schicht	134
6.17	Einfluss des Oberflächenzustandes bei Schweißversuchen auf: (a) gemessene Elektrodenkraft; (b),(c) gemessene und berechnete Widerstände	136
6.18	Einfluss des Oberflächenzustandes auf die Linsengeometrie bei Schweißversuchen mit AA6014	137
A.1	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ02: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) berechnete Wärmeverteilung	A-3
A.2	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ03: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) berechnete Wärmeverteilung	A-4

A.3	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ04: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-5
A.4	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ05: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-6
A.5	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ06: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-7
A.6	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ08: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-8
A.7	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ09: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-9
A.8	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ10: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-10
A.9	Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ11: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-11

A.10 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ12: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-12
A.11 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ13: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-13
A.12 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ14: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-14
A.13 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ15: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-15
A.14 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ16: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-16
A.15 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ17: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-17
A.16 Ergebnisse Experiment und Simulation von Versuch WÜ18: (a) Temperaturfelder; (b) Temperaturen der Thermoelemente auf dem Blech; (c) Temperaturen der Thermoelemente auf den Elektroden; (d) Kühlleistung der unteren Elektrode; (e) be- rechnete Wärmeverteilung	A-18

A.17 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-19
A.18 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-20
A.19 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-21
A.20 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-22
A.21 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-23
A.22 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 4 kN	A-24
A.23 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 5 kN	A-25
A.24 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 6 kN	A-26
A.25 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-27
A.26 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 8 kN	A-28
A.27 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-29
A.28 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 4 kN	A-30

A.29 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 5 kN	A-30
A.30 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 6 kN	A-31
A.31 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-31
A.32 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit der statischen Elektrodenkraft 8 kN	A-31
A.33 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-32
A.34 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 5 kN	A-33
A.35 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-34
A.36 Vergleich der berechneten Kontaktdrücke und Kontakttemperaturen der 2D- und 3D-Simulation: (a),(c) Elektrode-Blech-Kontakt; (b),(d) Blech-Blech-Kontakt	A-35
A.37 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-41
A.38 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-42
A.39 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-43
A.40 Schweißparameter und Widerstände der Einpuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-44

A.41 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-45
A.42 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 4 kN	A-45
A.43 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 5 kN	A-46
A.44 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 6 kN	A-46
A.45 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-47
A.46 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA5182+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 8 kN	A-48
A.47 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-49
A.48 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 4 kN	A-50
A.49 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 5 kN	A-51
A.50 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 6 kN	A-52
A.51 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-53
A.52 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA6014 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 8 kN	A-53

A.53 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 3 kN	A-54
A.54 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 5 kN	A-55
A.55 Schweißparameter und Widerstände der Zweipuls-Schweißversuche der Blechkombination AA6014+AA5182 mit Klebstoff bei der statischen Elektrodenkraft 7 kN	A-56

Tabellenverzeichnis

2.1	Ausgewählte Eigenschaften von Reinaluminium und Aluminium-oxid Al_2O_3 bei Raumtemperatur mit Daten aus [28, 37–40] . . .	9
3.1	Chemische Zusammensetzung der untersuchten Aluminiumwerkstoffe AA5182 und AA6014 (Angaben in Gewichts-%) . .	31
3.2	Eigenschaften von CuCr1Zr bei Raumtemperatur [142]	38
4.1	Anfangs- und Umgebungstemperaturen	46
4.2	Kalibrierte Wärmeübergangskoeffizienten	46
5.1	Übersicht der Schweißparameter zur Kalibrierung des Kontaktwiderstandsmodells	64
5.2	Kalibrierte Parameter des Kontaktwiderstandsmodells	70
5.3	Basiskontaktwiderstände AA5182 (Blechdicke 1,5 mm)	78
5.4	Untersuchte werkstoffspezifische und geometrische Faktoren .	112
5.5	Coefficients of Importance (<i>CoI</i>)	113
5.6	Coefficient of Importance (<i>CoI</i>) der wichtigsten Wechselwirkungen	115
A.1	Übersicht über die durchgeführten Wärmeübergangsversuche und -simulationen	A-2
A.2	Simulationsplan mit den berechneten Linsendurchmessern . .	A-36
A.3	Regressionskoeffizienten	A-40

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Al	Aluminium
bzw.	beziehungsweise
<i>CoI</i>	Coefficient of Importance
Cu	Kupfer
Cr	Chrom
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DoE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
EKL	Elementkantenlänge
EN	Europäische Norm
exp.	experimentell
Fe	Eisen
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente Methode
H	Wasserstoff
ISO	International Organization for Standardization
Mg	Magnesium
KTL	kathodische Tauchlackierung
Mn	Mangan
Na	Natrium
O	Sauerstoff
sim.	simuliert
Si	Silizium
Ti	Titan
u.a.	unter anderem
V	Vanadium

Abkürzung	Bedeutung
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
Zn	Zink
Zr	Zirkonium
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	mm^2
A_S	scheinbare Kontaktfläche	mm^2
A_t	tragende Kontaktfläche	mm^2
a	Temperaturleitzahl	$\frac{mm^2}{s}$
a_K	Kontaktradius	mm
c	Wärmekapazität	$\frac{J}{kg\ K}$
c_W	Wärmekapazität von Wasser	$\frac{J}{kg\ K}$
d_n	Linsendurchmesser	mm
d_{eo}, d_{eu}	Durchmesser Elektrodeneindruck oben / unten	mm
E	Elastizitätsmodul	MPa
e_o, e_u	Elektrodeneindrucktiefe oben / unten	mm
F	Kraft	kN
F_N	Normalkraft	kN
F_S	statische Elektrodenkraft	kN
$f(T)$	Temperaturfunktion	-
$g(p)$	Druckfunktion	-
H	Härte	HB
I	Stromstärke	kA
I_S	Schweißstromstärke	kA
I_V	Vorwärmstromstärke	kA

Symbol	Beschreibung	Einheit
K	Klebstofffaktor	-
k	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
L	Lorenz-Zahl	$\frac{W \Omega}{K^2}$
l	Länge	mm
n	Exponent	-
P	Leistung	W
p	Druck	MPa
p_o, p_u	Linseneindringtiefe oben / unten	mm
p_0	Referenzdruck	MPa
p_k	Korrekturdruck	MPa
Q	Wärme	J
Q_B	Verlustwärme durch Ableitung in die Bleche	J
Q_E	Verlustwärme durch Ableitung in die Elektroden	J
Q_j	Joule'sche Stromwärme	J
Q_K	Verlustwärme durch Ableitung zum Kühlwasser	J
Q_L	Verlustwärme durch Konvektion und Strahlung	J
Q_W	Wirkwärmemenge	J
$q_{j,kontakt}$	Joule'sche Stromwärmeleistung am Kontakt	W
$q_{2,A}$	durch natürliche Konvektion und Strahlung übertragener Wärmestrom	$\frac{W}{m^2}$
$q_{2,F}$	durch erzwungene Konvektion übertragener Wärmestrom	$\frac{W}{m^2}$
$q_{2,Konvektion}$	Konvektionswärmestrom	$\frac{W}{m^2}$
$q_{2,Strahlung}$	Strahlungswärmestrom	$\frac{W}{m^2}$
$q_{2,j,kontakt}$	Joule'sche Wärmeleistung am Kontakt	$\frac{W}{mm^2}$
$q_{3,j,mat}$	Joule'sche Wärmeleistung im Material	$\frac{W}{mm^3}$
$q_{3,p}$	Wärmeleistung durch plastische Verformungsarbeit	$\frac{W}{mm^3}$
R	elektrischer Widerstand	Ω
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert	μm
R_E	Engewiderstand	Ω
R_F	Filmwiderstand	Ω
R_K	Kontaktwiderstand	Ω
R_S	Stoffwiderstand eines stromdurchflossenen Leiters	Ω

Symbol	Beschreibung	Einheit
R_q	quadratische Rauheit	μm
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
$R_{i,red}^2$	um den Faktor i reduziertes Bestimmtheitsmaß	-
r	spezifischer Kontaktwiderstand	Ωmm^2
r_0	Basiskontaktwiderstand	Ωmm^2
$r_{0,K}$	klebstoffspezifischer Basiskontaktwiderstand	Ωmm^2
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T_0	Referenz- bzw. Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$
T_{lim}	Halbwertstemperatur	$^{\circ}C$
T_S	Schmelztemperatur	$^{\circ}C$
$T_{W,ab}$	Temperatur des abfließenden Kühlwassers	$^{\circ}C$
$T_{W,zu}$	Temperatur des zufließenden Kühlwassers	$^{\circ}C$
ΔT	Temperaturdifferenz	$^{\circ}C$
t	Zeit	s
t_o, t_u	Blechdicke oben / unten	mm
U	elektrische Spannungsdifferenz	V
u_z	Verschiebung in z-Richtung	mm
$\dot{V}$	Durchflussgeschwindigkeit	$\frac{l}{min}$
x	Spalt zwischen den Blechen	mm

Griechische Symbole

α	Wärmeausdehnungskoeffizient	$\frac{1}{K}$
α_A	Wärmeübergangskoeffizient für natürliche Konvektion und Strahlung zur Umgebungsluft	$\frac{W}{m^2 K}$
α_F	Wärmeübergangskoeffizient für erzwungene Konvektion am Kühlwasser	$\frac{W}{m^2 K}$
α_K	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion	$\frac{W}{m^2 K}$
α_S	Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung	$\frac{W}{m^2 K}$
ε	Dehnung	-
ε_p	Druckexponent	-
ε_S	Emissionskoeffizient	-
ε_T	Temperaturexponent	-
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	plastische Vergleichsdehnrate	$\frac{1}{s}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
η	Dichte der in Kontakt stehenden Rauhigkeitsspitzen	$\frac{1}{mm^2}$
$\dot{\lambda}$	Proportionalitätsfaktor	$\frac{1}{MPa \cdot s}$
ν	Querkontraktions- bzw. Poissonzahl	-
Π_A, Π_B	Peltier-Koeffizienten der Stoffe A und B	V
ρ	Dichte	$\frac{g}{cm^3}$
$\rho_{contact}$	spezifischer Widerstand	Ωmm
$\rho_{contaminant}$	Verschmutzungsterm	Ωmm
ρ_e	spezifischer Stoffwiderstand	Ωmm
$\rho_{e,1}, \rho_{e,2}$	spezifische Stoffwiderstände der Kontaktpartner	Ωmm
$\rho_{e,F}$	flächenabhängiger Widerstand der Fremdschicht	Ωmm^2
ρ_W	Dichte von Wasser	$\frac{g}{cm^3}$
σ_F	Fließspannung	MPa
σ_{SB}	Strahlungszahl	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
$\bar{\sigma}$	Vergleichsspannung	MPa
$\bar{\sigma}_{vm}$	Vergleichsspannung nach Von Mises	MPa
Φ	elektrisches Potential	V

Vektoren

$\mathbf{a}$	Beschleunigung
$\mathbf{b}$	Massenkraftdichte
$\mathbf{E}_e$	elektrische Feldstärke
$\mathbf{j}$	Stromdichte

Matrizen und Tensoren

$\mathbf{C}$	Steifigkeitstensor
$\mathbf{I}$	Einheitstensor
$\mathbf{S}$	Spannungsdeviator
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Verzerrungstensor
$\boldsymbol{\sigma}$	Cauchy'scher Spannungstensor