


Isabel Balz

**Prozessanalyse der thermo-
mechanischen Vorgänge während der
Verbindungsbildung beim
Metall-Ultraschallschweißen**



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

Band 3/2020

Shaker Verlag

**Prozessanalyse der thermo-mechanischen Vorgänge während
der Verbindungsbildung beim Metall-Ultraschallschweißen**

**Analysis of Thermo-Mechanical Processes During
the Bond Formation in Ultrasonic Metal Welding**

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

vorgelegt von
Isabel Balz, geb. Georgi

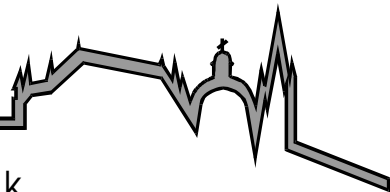
Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen
 Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Michael Vorländer

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar

Isabel Balz

**Prozessanalyse der thermo-
mechanischen Vorgänge während der
Verbindungsbildung beim
Metall-Ultraschallschweißen**



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

Band 3/2020

Shaker Verlag

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7537-3

ISSN 0943-9358

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Zuallererst möchte ich dem Institutsleiter, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen, für die Möglichkeit zur Promotion, die Betreuung der Arbeit und den wissenschaftlichen Freiraum zur Erstellung dieser herzlich danken. Ebenso gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Michael Vorländer für die Übernahme des Koreferates und die fruchtbare Diskussion über die Inhalte dieser Dissertation sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Getreu der Meinung des Dalai Lama „Wenn wir nicht zusammenarbeiten, werden wir für unsere Probleme keine Lösung finden.“ möchte ich mich bei allen ISF-lern für die große Unterstützung, den fachlichen Schlagabtausch, den tollen Teamgeist und die unvergesslichen Wanderungen bedanken. Rückblickend auf die legendären ISF-Feiern bleibt wohl ein Satz ewig in meinen Erinnerungen: „Fuck you, I won't do what you tell me.“

Besonders bedanken möchte ich mich bei Florian, Linda, Bärbel und Jens, die mich regelmäßig bei messtechnischen Fragestellungen unterstützt und mich so einige Male mit ihren MATLAB / LabVIEW Kenntnissen gerettet haben. Auch meinem großartigen Studententeam (Eric, Oli, Benedikt, Andreas, Simon, Phil) möchte ich besonderen Dank aussprechen. Eure Einsatzbereitschaft, eure Unterstützung, das tolle Arbeitsklima und der gegenseitige Respekt ist mit keinem Geld der Welt zu bezahlen! Liebe Julia, manchmal ist man einfach nur dankbar dafür, eine besondere Person kennengelernt und als Freund zu haben: Du bist für mich ein wahrhaft inspirierender Mensch. Bleib so wie du bist!

Ein weiterer großer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Rosenthal und Herrn Dr.-Ing. Lohoff von der Forschungszentrum Jülich GmbH, die mich bei der messtechnischen Umsetzung und Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen tatkräftig unterstützt haben.

Mein größter und persönlichster Dank gilt meiner Familie. Zum einen danke ich meinem Mann, besten Freund und gleichzeitig größten Antreiber Andy. Du hast mir so viel Verständnis und moralische Unterstützung entgegengebracht, woraus ich immer wieder Kraft für neuen Tatendrang schöpfen konnte. Auch meiner treuen und geduldigen Schnüffelnase Leonie danke ich für den Spaß und die wichtige Ablenkung während meiner Schreibpausen. Zum anderen bedanke ich mich bei meiner Mutter Ines, Andreas und meinen Großeltern, dass sie mich jederzeit auf meiner akademischen Laufbahn unterstützt haben. Euer Interesse am Gelingen dieser Arbeit hat mich stets motiviert.

Kurzfassung

Das Metall-Ultraschallschweißen (Ultrasonic Metal Welding, kurz: „USMW“) eignet sich besonders zum Verbinden von elektrotechnischen Bauteilen und rückt aufgrund der steigenden Komplexität elektronischer Systeme immer mehr in den industriellen Fokus. Trotz der industriellen Verbreitung können Prozessschwankungen beim USMW auftreten. Diese sind häufig nicht erklärbar, da bezüglich der komplexen Wirkzusammenhänge von Schweißwerkzeugen und Fügeteilen während des Schweißprozesses wissenschaftlich fundierte Kenntnisse fehlen.

Das Ziel der Dissertation ist daher die Beschreibung von thermo-mechanischen Vorgängen im mechanischen Gesamtsystem, bestehend aus Sonotrode, Amboss und Fügeteilen, die während der Verbindungsbildung beim Metall-Ultraschallschweißen von artgleichen Kupferblech-Verbindungen auftreten.

Neben einleitenden und abschließenden Kapiteln gliedert sich die Arbeit in drei Hauptteile: In den Kapiteln 4 und 5 wird der Versuchsaufbau mit dem verwendeten Prozess-Datenerfassungssystem vorgestellt, die gewonnenen Messsignale aufbereitet sowie hinsichtlich ihrer Eignung für die Prozessanalyse bewertet. Dazu wird neben den maschineninternen Sensorsignalen das Schwingungsverhalten im mechanischen Gesamtsystem während des USMW Prozess durch eine Hochgeschwindigkeitskamera und zwei Laser-Doppler-Vibrometer extern erfasst. Die aufbereiteten Messsignale werden in Kapitel 6 ausgewertet, um charakteristische, transiente Prozesssignale zu identifizieren. Um diesen Signalen später konkrete Zustände der Verbindungsbildung zuordnen zu können, wird der Schweißprozess nach definierten Zeiten abgebrochen und die Verbindungsbildung unter mikrostrukturellen und bruchmechanischen Gesichtspunkten umfassend charakterisiert.

Abschließend werden in Kapitel 7 die während der Verbindungsbildung ablaufenden thermo-mechanischen Vorgänge durch ein empirisch basiertes Prozessphasenmodell beschrieben, indem charakteristische Prozesssignale mit den Mechanismen der Verbindungsbildung korreliert werden. Die abschließende Überprüfung des Modells unter veränderten Prozessbedingungen gibt außerdem Aufschluss über dessen Übertragbarkeit. Bezugnehmend auf den aktuellen Stand der Forschung erlauben die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit tiefere Einblicke zu den stattfindenden thermo-mechanischen Vorgängen beim USMW. Die in-situ Prozessanalyse ist somit der Schlüssel für ein umfassenderes Prozessverständnis und damit auch für eine verbesserte Prozessfähigkeit des USMW.

Abstract

Ultrasonic Metal Welding (USMW) is a particularly suitable process for joining electric components and its use is growing due to the increasing complexity of electronic systems. Despite its widespread application, USMW suffers from quality variations. These are often unclear due to a lack of deep scientific knowledge regarding the complex interactions between tools and joining parts during welding process.

Therefore, the aim of this doctoral thesis is to describe thermo-mechanical processes in the mechanical overall-system, consisting of horn, anvil and joining parts, which occur during bonding formation in USMW of similar sheet metal joints of copper.

This work is divided in three main parts: Chapters 4 and 5 present the experimental setup with process data acquisition system, the processing of the measured signals and an evaluation concerning their suitability for process analysis. For this purpose, in addition to the machine internal sensors, the oscillation behavior of the mechanical overall-system during the USMW process is recorded externally by a high-speed camera and two laser Doppler vibrometers.

The processed measurement signals are used in chapter 6 to identify characteristic transient process signals. In order to be able to assign concrete states of bonding formation to these signals later on, the welding process is stopped after defined times and the bonding formation is characterized under microstructural and fracture-mechanical aspects.

Finally, in Chapter 7, the thermo-mechanical processes taking place during bonding formation are described by a process phase model by correlating characteristic process signals with the mechanisms of bond formation. The final verification under changed process conditions also provides information about the interchangeability of the model. Regarding the current state of research, the results of the present work allow deeper insight into the thermo-mechanical processes taking place in USMW. Thus, the in-situ process analysis is helpful to a more profound understanding and leads to an improved process capability of the USMW.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Metall-Ultraschallschweißen	3
2.1.1	Verfahrensgrundlagen und Maschinentchnik	3
2.1.2	Ultraschallschweißprozess als tribologisches System.....	5
2.1.3	Temperaturentwicklung in der Fügezone	7
2.1.4	Reibung und plastische Verformung während des Schweißprozesses ...	9
2.1.5	Bestehende Prozessphasenmodelle	10
2.1.6	Theorien zu Bindungsmechanismen	13
2.1.7	Verbindungsfestigkeit und deren Einflussgrößen	15
2.2	Prozessmesstechnik beim Metall-Ultraschallschweißen	20
2.2.1	Qualitätssicherung in der Industrie	20
2.2.2	Forschung im Bereich der Prozessüberwachung	21
2.3	Schallemissionsanalyse zur Charakterisierung von Fügeprozessen	25
2.3.1	Grundlagen der Entstehung und Ausbreitung von Körperschall.....	26
2.3.2	Methoden der Signalverarbeitung von Maschinenschwingungen.....	29
3	Zielsetzung und Methodik der Arbeit.....	35
4	Versuchsaufbau und Datenakquisition	38
4.1	Anlagentechnik zum Metall-Ultraschallschweißen	38
4.2	Prozessdatenerfassung	40
4.2.1	Maschinenparameter.....	42
4.2.2	Ermittlung der Werkzeugschwingungen durch Laser-Vibrometrie	44
4.2.3	Erfassung thermo-mechanischer Effekte in der Fügezone.....	45
4.3	Versuchstechnik.....	47
4.3.1	Versuchswerkstoffe und -durchführung	47
4.3.2	Methoden der Verbindungscharakterisierung	50

5	Bewertung der Messmethoden	52
5.1	Angepasste Signalvorverarbeitung	52
5.1.1	Konventionelle Maschinenparameter	52
5.1.2	Laser-Vibrometrie: Körperschallsignale der Werkzeuge	53
5.1.3	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen: Schwingung im mechanischen Gesamtsystem	56
5.2	Eignung der untersuchten Sensorsignale zur Prozessanalyse	58
5.2.1	Konventionelle Maschinenparameter	58
5.2.2	Laser-Vibrometrie: Körperschallsignale der Werkzeuge	61
5.2.3	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen: Schwingungsanalyse im mechanischen Gesamtsystem	65
5.2.4	Gegenüberstellung der verwendeten Messmethoden für die Schwingungsmessung	68
6	Charakteristische thermo-mechanische Vorgänge und Prozesssignale	71
6.1	Mechanismen der Verbindungsbildung in Abhängigkeit der Schweißzeit	71
6.1.1	Verformung der Fügeteile unter Berücksichtigung der Temperatur	72
6.1.2	Mikrostruktur und Härte	77
6.1.3	Verbindungsfestigkeit und Bruchverhalten	84
6.2	Charakteristische Signale für die Zustandsanalyse	87
6.2.1	Charakteristische Prozesssignale	87
6.2.2	Prozesssignalübergreifende Zeitabschnitte	99
7	Empirisch basiertes Prozessphasenmodell	101
7.1	Empirisches Modell zur Beschreibung der thermo-mechanischen Vorgänge während der Verbindungsbildung	101
7.2	Bewertung des empirisch basierten Prozessphasenmodells	106
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
9	Literaturangaben	i