

Ultraschallprüfung mittels Transversalwellen beim Widerstandspunktschweißen Simulation der Schallausbreitung

Christian MATHISZIK*, Uwe FÜSSEL*, Jörg ZSCHETZSCHE*, Christoph
GROßMANN*, Marcus HEIDE*, Frank SCHUBERT**, Thomas WINDISCH**

* Technische Universität Dresden

** Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP Institutsteil Dresden

Kurzfassung. In der Serienproduktion von Stahlblechkonstruktionen ohne Dichtheitsanforderungen und mit Einzelblechdicken bis 3 mm ist das Widerstandspunktschweißen das dominante Fügeverfahren. Durch beständig steigende Qualitätsansprüche rücken zerstörungsfreie Verbindungsprüfungen immer mehr in den Fokus. Aufgrund der verdeckten Verbindungsbildung, der geringen Unterschiede zwischen Fügestelle und Grundmaterial und der für eine Prüfung erschwerenden Zinkschicht, konnte bislang kein vertrauenswürdiges prozessparalleles Prüfverfahren gefunden werden. Ein vielversprechendes zerstörungsfreies Prüfverfahren basiert auf der prozessparallelen Durchschallung der Fügestelle mit transversalen Ultraschallwellen. An der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden wurde dafür ein Ultraschallmesssystem zur Integration von dafür bestehender Ultraschallsensorik entwickelt. Darauf aufbauend werden die Schritte zur geeigneten Modellierung der Schallstrecke und zur Simulation der Schallwellendynamik mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) beschrieben. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Fügeprozess und Ultraschalldurchlässigkeit.

1 Einführung

Im heutigen Karosserie- und Fahrzeugbau ist das Widerstandspunktschweißen das wichtigste und am häufigsten angewendete Fügeverfahren ohne Dichtheitsanforderungen für Einzelblechdicken bis 3 mm. Das Schweißverfahren hat sich in dieser Branche durch seine hohe Effizienz und Produktivität etabliert. Verfahrensbedingt entsteht die Fügeverbindung bzw. Schweißlinse innerhalb des Überlappbereichs der geschweißten Bleche und ist daher äußerlich nicht sichtbar (Abbildung 1). Für die zerstörungsfreie Qualitätssicherung ist die verdeckte Lage der Fügeverbindung jedoch problematisch, da die Größe der Schweißlinse entscheidend für die Festigkeit der Fügeverbindung ist und somit ein Qualitätsmaß darstellt. Bisher werden aus der laufenden Produktion stichprobenweise Bauteile entnommen und zerstörend geprüft. Dies ist mit einem hohen Prüfaufwand und viel Schrott verbunden, wodurch erhebliche Kosten entstehen, was die Nachhaltigkeit des Prozesses in Frage stellt. In der Vergangenheit gab es daher viele Bestrebungen, ein geeignetes prozessbegleitendes zerstörungsfreies Prüfverfahren (ZfP) zu entwickeln. Bisher konnte sich jedoch keines in der industriellen Massenproduktion durchsetzen.



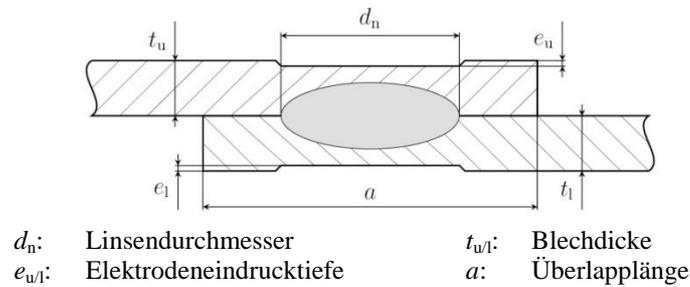


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schweißlinse beim Widerstandspunktschweißen

Ein vielversprechendes Prüfverfahren beruht auf der prozessparallelen Durchschallung der Fügezone mit horizontal polarisierten, transversalen Ultraschallwellen. Für ein besseres Prozessverständnis sind eine genaue Kenntnis der Ausbreitung der transversalen Ultraschallwellen, sowie deren Interaktion mit der Schweißlinse von großer Bedeutung.

2 Ultraschallmodul 4.0

An der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden wurde das Ultraschallmodul 4.0 entwickelt. Das System baut auf dem Bosch Rexroth Ultraschallsystem PSQ 6000 auf und ist mit einem eigenen Ansteuerungs- und Auswertesystem ausgestattet. Zur prozessparallelen Durchschallung wird an einer Schweißelektrode ein Ultraschallsender und an der gegenüberliegenden ein Empfänger installiert.

Während des Schweißprozesses wird die Fügestelle mit transversalen Ultraschallwellen, mit einer Mittenfrequenz von ca. 50 kHz, durchschallt. Das Ergebnis ist eine charakteristische Transmissionskurve nach Abbildung 2 links. Der Verlauf der Kurve wird durch die Materialkennwerte der Werkstoffe und die Ausbreitung der polarisierten Transversalwelle bestimmt. Prinzipiell kann dieser Kurvenverlauf in drei Zeitabschnitte eingeteilt werden: die Vorhalte-, Schweiß- und Nachhaltezeit. In der Vorhaltezeit t_s findet der Kraftaufbau statt. Hier werden die Bleche durch die Elektrodenkraft F_{EL} zusammengepresst und die Kontaktbedingungen zum Einkoppeln der Schallwellen verbessern sich. Folglich steigt die Intensität der empfangenen Ultraschallwellen parallel zum Kraftaufbau. Anschließend wird der Schweißstrom I_w eingeschaltet. Dabei erwärmen sich die Bleche in einer ersten Phase der Stromflusszeit t_w . Der kurzzeitige Einbruch der Intensität ist auf die aufschmelzende Zinkbeschichtung der Bleche zurückzuführen. Im weiteren Verlauf dieser Phase erreicht die Intensität der Ultraschallwellen ein lokales Maximum im Punkt *B*. Hier sind die Schallimpedanzen von Kupfer und Stahl gleich [1]. Durch die andauernde Wärmeentwicklung kommt es anschließend zur Bildung der Schmelzlinse. Die wachsende Schmelzlinse stellt ein zunehmendes Hindernis für die Transversalwelle dar, welche nahezu keine Scherwellen aufnimmt. Die Schmelze dämpft somit die Ausbreitung der Schallwellen, was einen deutlichen Einbruch der Transmissionskurve bewirkt. Schließlich wird ein lokales Minimum im Punkt *C* erreicht. Nach Abschalten des Schweißstroms I_w beginnt die Nachhaltezeit t_h . Unter der weiterhin wirkenden Elektrodenkraft F_{EL} kühlt sich die Fügezone schnell ab. Die Schweißlinse erstarrt und die Transmission der Ultraschallwellen nimmt deutlich zu, da nun optimale Einkoppelbedingungen für die Schallwellen und direkte Kopplung der Bleche über die erstarrte Schweißlinse besteht.

Die über den gesamten Schweißprozess aufgezeichnete Transmissionskurve gibt Aufschluss über die Qualität der Verbindung. Dazu werden in [2] verschiedene charakteristische Kenngrößen der Transmissionskurve vorgestellt, die dem erzielten Linsendurchmesser gegenüber gestellt werden. Dabei zeigen der Signaleinbruch und die mittlere Transmission jeweils zwischen den Punkten *B* und *C* gute Korrelationen zum Linsendurchmesser (Abbildung 2 rechts).

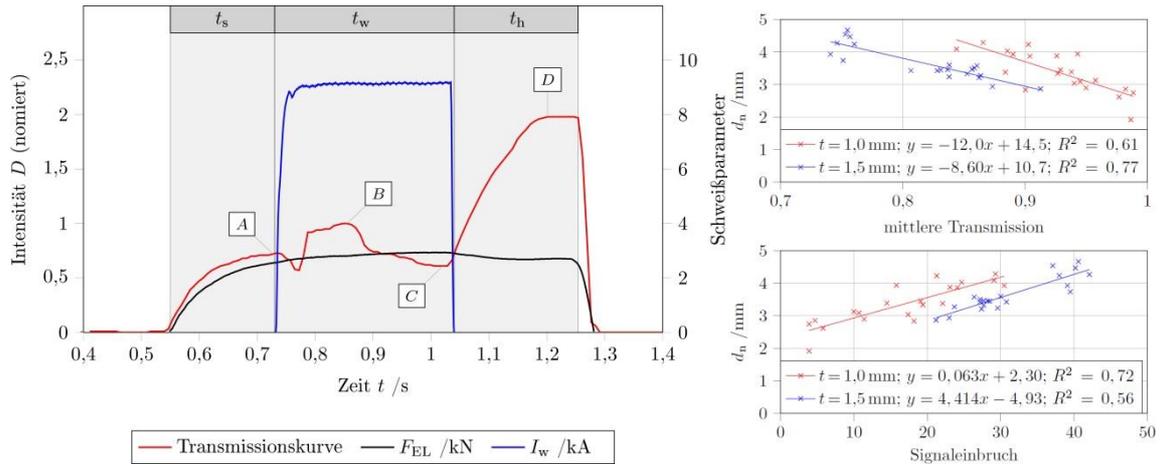


Abbildung 2: links: Transmissionskurve einer Punktschweißverbindung mit den charakteristischen Punkten A, B, C und D; rechts: Zusammenhang zwischen dem erzielten Linsendurchmesser und ausgewählten Kenngrößen der Transmissionskurve

3 Versuchsdurchführung und Simulation

3.1 Schwingungsmessung mittels Laser-Doppler-Vibrometrie

Für die Simulation der Wellenausbreitung ist die genaue Kenntnis über die Polarisationsrichtung der Ultraschallwandler essentiell. Allerdings besteht derzeit kein Zugriff auf die Datenblätter der eingebauten Wandler. Daher wird im Vorfeld zu den Simulationsberechnungen eine Messung der Schallwellen mit Hilfe der Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) am rotierenden Sender durchgeführt (Abbildung 3 links). Während der Messung wird der Sender mit einer Serie von Spannungsimpulsen zur Aussendung transversaler Schallwellen angeregt. Dies ermöglicht eine zeitaufgelöste Messung der sich am oberen Konus einstellenden Schwingungsformen über den gesamten Winkel φ von 0° bis 360° .

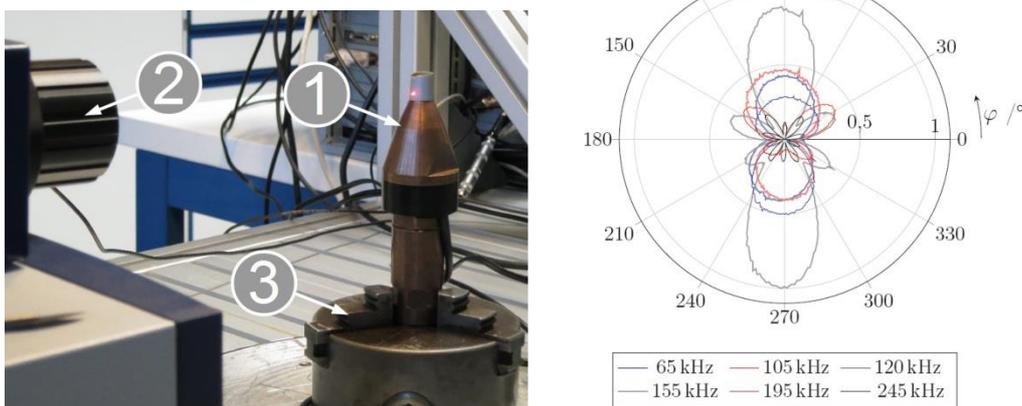


Abbildung 3: links: Messaufbau der LDV-Messung (1: Sender, 2: Laservibrometer, 3: Rotationstisch); rechts: Polardiagramm der gemessenen Verschiebungen bei ausgewählten Frequenzen über den Winkel φ

Die Messergebnisse in Abbildung 3 rechts zeigen, dass die größten Schwingungsamplituden in die Winkelrichtungen $\varphi = 90^\circ$ und $\varphi = 270^\circ$ mit einer Frequenz von 120 kHz auftreten. Mit der Kenntnis über die Lage der piezoelektrischen Schallwandler bei 0° und 180° lässt sich über die um 90° verdrehte Schwingungsorientierung auf entsprechende Scherwandler schlussfolgern.

3.2 Aufbau des Simulationsmodells

Aufbauend auf den Erkenntnissen der LDV-Messung konnte zunächst der Sender in ANSYS® simuliert werden. Im Modell erfolgt die Anregung der Scherwandler durch Spannungsimpulse, die denen des Ultraschallmoduls 4.0 nachempfunden sind. Dazu wird die elektromechanische Kopplung von Piezokeramiken, die ANSYS® anbietet, genutzt. In einer ersten Modellevaluation werden ein Halb- und ein Vollmodell modelliert und miteinander verglichen. Zur weiteren Evaluation der Simulationsergebnisse werden diese denen der LDV-Messung gegenübergestellt, um anschließend das Gesamtmodell zu simulieren. Zum Gesamtmodell gehören der Sender, die Elektrodenkappen, die Stahlbleche und der untere Elektrodenschaft mit angebrachtem Empfänger (Abbildung 4). Es werden insgesamt vier unterschiedliche Modelle berechnet. Jedes Modell entspricht einem charakteristischen Punkt der Transmissionskurve aus Abbildung 2. Dabei werden jeweils die Rand- und Kontaktbedingungen im Bereich der Punktschweißlinse nach Tabelle 1 definiert.

Tabelle 1: Eigenschaften der Simulationsmodelle des Gesamtmodells

char. Punkt	Randbedingungen
A	vor Beginn des Stromflusses
B	gleiche Impedanzen zwischen Kupfer und Stahl
C	flüssige Schmelzlinse
D	feste Schweißlinse

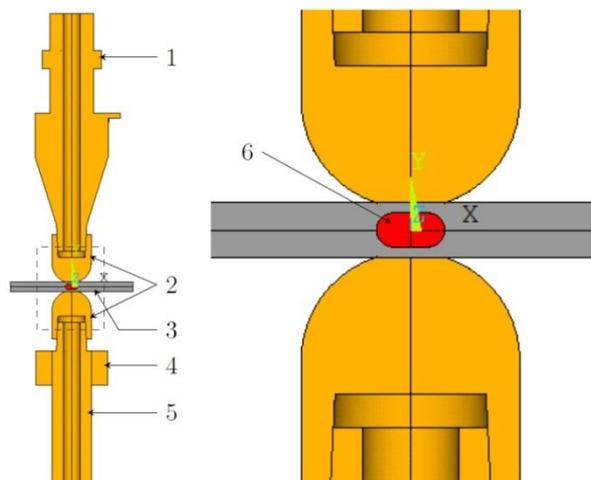


Abbildung 4: FE-Modell des Ultraschallmoduls 4.0 als Halbmodell (1:Sender, 2: Elektrodenkappen, 3: Stahlbleche, 4: Schaft, 5: Empfänger, 6: Schmelzlinse)

4 Simulationsergebnisse

4.1 Sender

Das Halbmodell weist nur geringfügige Unterschiede zum Vollmodell auf, die durch die definierte Symmetrieebene im Halbmodell hervorgerufen werden. Daher sind Halbmodelle für die anschließenden Simulationen in Anbetracht einer effizienteren Simulationsberechnung ausreichend.

Beim Vergleich der Messergebnisse der LDV-Messung mit den Simulationsergebnissen zeigt sich, dass die simulierten und gemessenen radialen Verschiebungen u_{rad} die gleiche Größenordnung besitzen. Es zeigen sich Übereinstimmungen bzgl. Phase und Schwingungsmoden der Ultraschallwellen, die der Abbildung 5 zu entnehmen ist. Die Ab-

bildung 5 rechts zeigt auch, dass jedoch Abweichungen in den Frequenzbändern vorhanden sind, die auf angenommene Näherungen des Simulationsmodells zurückzuführen sind.

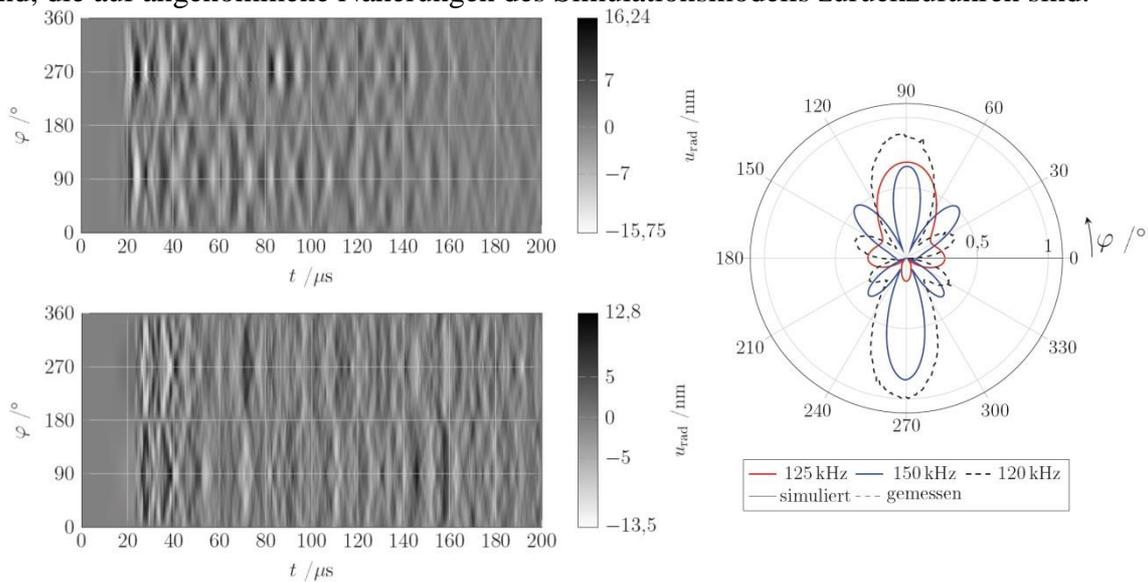
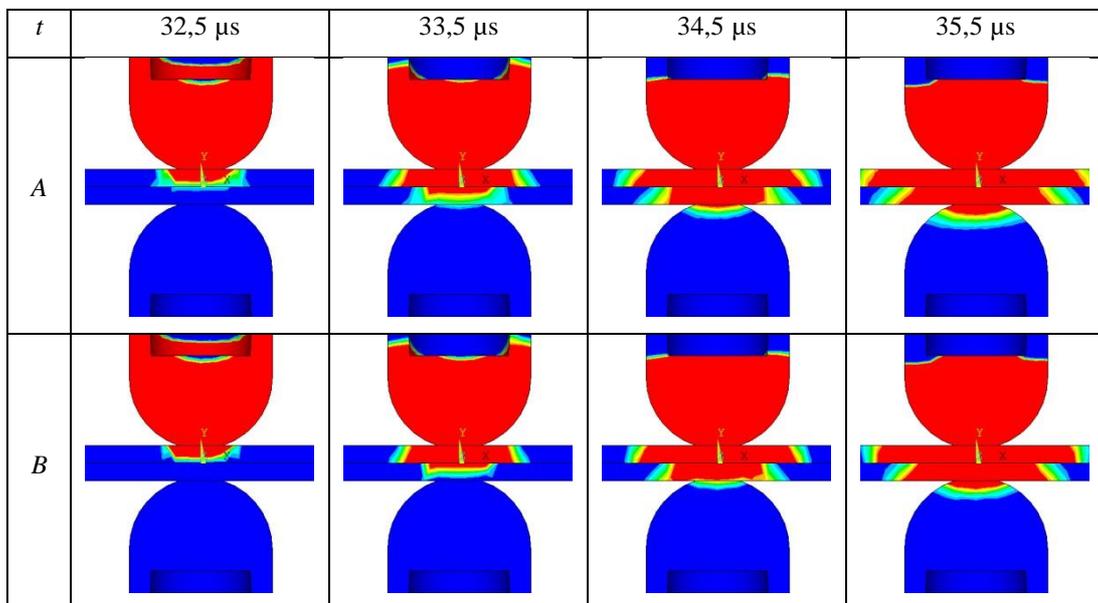


Abbildung 5: links: grauwertcodierte Amplitudenverteilung der radialen Verschiebungen u_{rad} in Abhängigkeit von Drehwinkel φ und Zeit t (oben: Laser-Doppler-Vibrometrie, unten: simuliertes Halbmodell), rechts: Schwingungsmoden zu ausgewählten Frequenzbereichen

4.2 Gesamtmodelle

Die Wellenausbreitung für die jeweiligen charakteristischen Punkte ist in Form von Contour-Plots in Abbildung 6 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Ausbreitung durch die vorherrschenden Randbedingungen in der Kontaktzone beeinflusst wird. Die flüssige Schmelze (Punkt C) stellt ein Hindernis für die Ausbreitung der Welle dar. Diese läuft jedoch an den Rändern vorbei und ist danach wieder homogen über den Querschnitt verteilt.



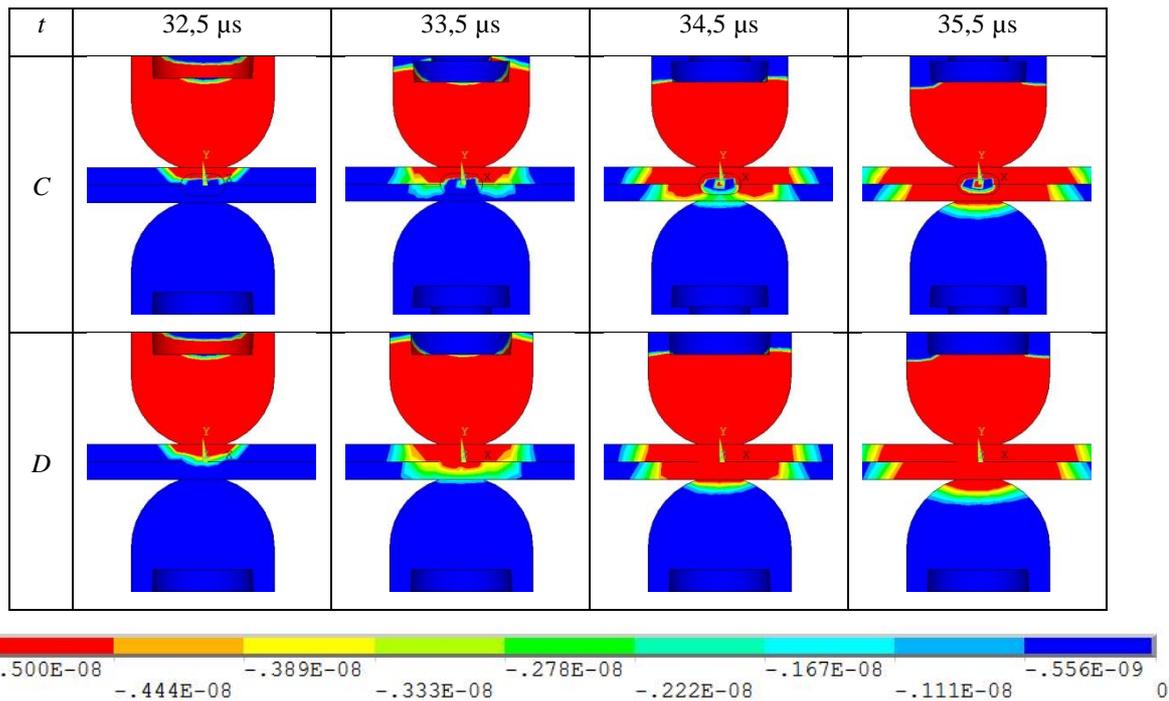


Abbildung 6: x-Komponente der Verschiebung am Gesamtmodell an den charakteristischen Punkten nach Tabelle 1 der Transmissionskurve im zeitlichen Verlauf $t=32,5 \mu\text{s}$ bis $t=35,5 \mu\text{s}$

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die Simulationen aller charakteristischen Punkte sowohl qualitative als auch quantitative Übereinstimmungen zu den realen Messergebnissen aufweisen. Die Unterschiede zwischen Simulation und Realität sind auf derzeit nicht vorhandenen Informationen bzgl. der Material- und Geometriedaten von Sender und Empfänger und auf die bislang nicht berücksichtigte Erwärmung im Modell zurückzuführen. Ausblickend stellt das erarbeitete Modell die Basis für weitere Simulationen und die Möglichkeit zur Entwicklung einer optimierten Ultraschallsensorik dar.

6 Referenzen

- [1] E. Waschkies, "Prüfen des Widerstandspunktschweißprozesses mit Ultraschall," *Schweißen & Schneiden*, Vols. 49, Heft 1, pp. 15-16, 1997.
- [2] C. Mathizik, "Großer Beleg: Verifizieren eines ausgewählten Ultraschallmoduls zur Linsendurchmesserbestimmung beim Widerstandspunktschweißen und Entwicklung eines erkennenden Algorithmus," TU Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2012.

Ultraschallprüfung mittels Transversalwellen beim Widerstandspunktschweißen

Simulation der Wellenausbreitung

Christian MATHISZIK*, Uwe FÜSSEL*, Jörg ZSCHETZSCHE*, Christoph GROßMANN*, Marcus HEIDE*, Frank SCHUBERT**, Thomas WINDISCH**

* Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage
** Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP Institutsteil Dresden

Kurzfassung Das Widerstandspunktschweißen ist durch eine verdeckte Verbindungsbildung charakterisiert. Für diesen Schweißprozess konnte bislang noch kein vertrauenswürdiges prozessparalleles Prüfverfahren gefunden werden. Ein vielversprechendes zerstörungsfreies Prüfverfahren basiert auf der prozessparallelen Durchschallung der Fügestelle mit transversalen Ultraschallwellen. An der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden wurde dafür ein Ultraschallmesssystem zur Integration von dafür bestehender Ultraschallsensoren entwickelt. Darauf aufbauend werden die Schritte zur geeigneten Modellierung der Schallstrecke und zur Simulation der Schallwellendynamik mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) beschrieben. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Fügeprozess und Ultraschalldurchlässigkeit.

Ultraschallsensorik An der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden wurde das *Ultraschallmodul 4.0* entwickelt. Es basiert auf dem Bosch Rexroth Ultraschallsystem PSQ 6000 und dient der prozessparallelen Durchschallung beim Widerstandspunktschweißen. Dazu wird an der einen Seite ein Ultraschallsender und auf der gegenüberliegenden ein Empfänger an der Schweißzange befestigt (Abb. 1). Das Ergebnis einer prozessparallelen Durchschallung ist eine charakteristische Transmissionskurve nach Tab. 2. Der Verlauf der Kurve wird dabei durch die prozessbedingte Veränderung der Schallimpedanzen und deren Einfluss auf das Übertragungsverhalten bestimmt (Tab. 1).



Abb. 1: Schweißzange mit Sender (oben) und Empfänger (unten)

Widerstandspunktschweißen
Der Prozess im Detail



<http://tu-dresden.de/Members/christian.mathiszik/risvprozess/>

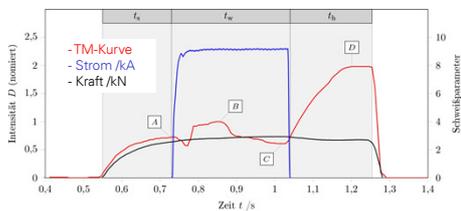


Abb. 2: Transmissionskurven an den charakteristischen Punkten nach Tab. 2

Tab. 1: Prozessschritte beim Widerstandspunktschweißen

Parameter	Prozessschritt	Einfluss
Vorhaltezeit t_s	Zusammenpressen der Bleche, Verbesserung der Kontaktbedingungen	↑ Bessere Einkopplung der Schallwellen, Intensität
Stromflusszeit t_w	Einschalten des Schweißstroms, Materialerwärmung bis zum Aufschmelzen der Bleche im Bereich der Fügeverbindung	↓ Sinkende Intensität mit Entstehen der Schmelzlinse
Nachhaltezeit t_h	Erstarren und Abkühlen der Fügeverbindung unter Kraffteinwirkung der Elektroden	↑ Zunehmende Intensität mit Erstarung der Fügestelle

Laser-Doppler-Vibrometrie Für die Simulation der Wellenausbreitung ist die genaue Kenntnis über die Polarisationsrichtung der Ultraschallwandler essentiell. Daher wurde im Vorfeld zu den Simulationsberechnungen eine Messung der Schallwellen mit Hilfe der Laser-Doppler-Vibrometrie am rotierenden Sender durchgeführt (Abb. 3). Die Messergebnisse in Abb. 4 zeigen, dass die größten Schwingungsamplituden in die Winkelrichtungen $\varphi=90^\circ$ und $\varphi=270^\circ$ mit einer Mittenfrequenz von 120 kHz auftreten. Mit der Kenntnis über die Lage der piezoelektrischen Schallwandler bei 0° und 180° lässt sich über die um 90° verdrehte Schwingungsorientierung auf entsprechende Scherwandler schlussfolgern.

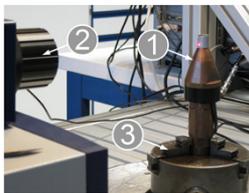


Abb. 3: Messaufbau der Laser-Doppler-Vibrometrie (1: Sender; 2: Laservibrometer; 3: Rotationstisch)

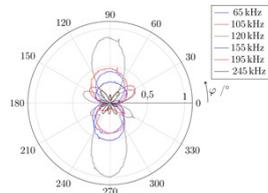


Abb. 4: Polardiagramm der gemessenen Verschiebungen bei ausgewählten Frequenzen über den Winkel φ

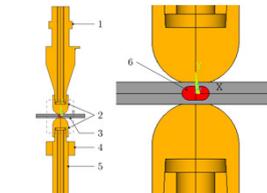


Abb. 5: FE-Modell des Ultraschallmoduls 4.0 als Halbmodell (1: Sender, 2: Elektrodenkappen, 3: Stahlbleche, 4: Schaft, 5: Empfänger, 6: Schmelzlinse)

Tab. 2: char. Punkte der Transmissionskurve

A:	vor Beginn der Stromflusszeit
B:	gleiche akustische Impedanzen zwischen Kupfer und Stahl [1]
C:	flüssige Schmelzlinse
D:	festе Schweißlinse

[1] E. Waschkius, "Prüfen des Widerstandspunktschweißprozesses mit Ultraschall," Schweißen & Schneiden, Vols. 49, Heft 1, pp. 15-18, 1997

Simulationsmodelle Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Messung der Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) konnte zunächst der Sender als Halbmodell erstellt werden. Im Modell erfolgt die Anregung der Piezos durch Spannungsimpulse, die denen des Ultraschallmoduls 4.0 nachempfunden sind. Zur Evaluation der Simulationsergebnisse werden diese der LDV-Messung gegenübergestellt, um anschließend das Gesamtmodell zu simulieren. Zum Gesamtmodell gehören der Sender, die Elektrodenkappen, die Stahlbleche und der untere Elektrodenschicht mit angeschlossenem Empfänger (Abb. 5). Es werden insgesamt vier unterschiedliche Modelle berechnet. Jedes Modell entspricht einem charakteristischen Punkt der Transmissionskurve. Dabei werden jeweils die Rand- und Kontaktbedingungen im Bereich der Punktschweißlinse nach Tab. 2 definiert.

Ergebnisse und Diskussion

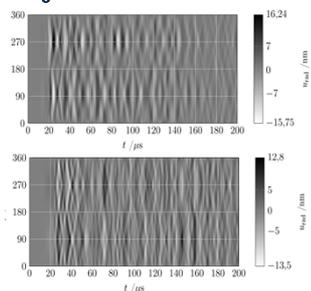


Abb. 6: grauwertorientierte Amplitudenverteilung der radialen Verschiebungen u_{rad} in Abhängigkeit von Drehwinkel φ und Zeit t der LDV-Messung (oben) und simuliertem Halbmodell (unten)

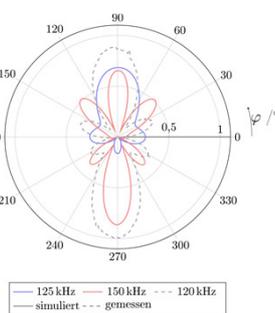


Abb. 7: Schwingungsmoden zu ausgewählten Frequenzbereichen

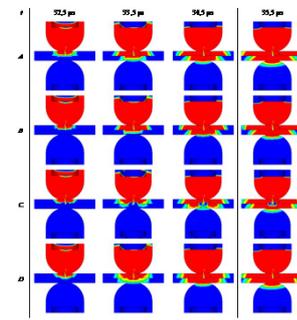


Abb. 8: x-Komponente der Verschiebung am Gesamtmodell an den charakteristischen Punkten nach Tab. 2 der Transmissionskurve im zeitlichen Verlauf $t=32,5 \mu s$ bis $t=35,5 \mu s$

Sender Beim Vergleich der Messergebnisse der Laser-Doppler-Vibrometrie mit den Simulationsergebnissen zeigt sich, dass die simulierten und gemessenen radialen Verschiebungen u_{rad} die gleiche Größenordnung besitzen. Es zeigen sich Übereinstimmungen bzgl. Phase und Schwingungsmoden der Ultraschallwellen, die den Abb. 6 und 7 zu entnehmen sind. Abb. 7 zeigt jedoch auch, dass noch Abweichungen in den Frequenzbändern vorhanden sind, die auf angenommene Näherungen des Simulationsmodells zurückzuführen sind.

Gesamtmodell Die Wellenausbreitung für den jeweiligen charakteristischen Punkt nach Tab. 2 ist in den Contour-Plots in Abb. 8 ersichtlich. Dabei zeigt sich, dass die Ausbreitung durch die vorherrschenden Randbedingungen in der Kontaktzone beeinflusst wird. Die flüssige Schmelze (Punkt C) stellt ein Hindernis für die Ausbreitung der Welle dar. Diese läuft jedoch an den Rändern vorbei und ist danach wieder homogen über den Querschnitt verteilt.

Fazit Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die Simulationen aller charakteristischen Punkte sowohl qualitative als auch quantitative Übereinstimmungen zu den realen Messergebnissen aufweisen. Die Unterschiede zwischen Simulation und Realität sind auf derzeit nicht vorhandenen Informationen bzgl. der Material- und Geometriedaten von Sender und Empfänger zurückzuführen. Ausblickend stellt das erarbeitete Modell die Basis für weitere Simulationen und die Möglichkeit zur Entwicklung einer optimierten Ultraschallsensoren dar.



Christian Mathiszik
Technische Universität Dresden
Institut für Fertigungstechnik
Professur für Fügetechnik und Montage

+49 351 463-35537
+49 351 463-37249
@ christian.mathiszik@tu-dresden.de

FTM
Fügetechnik und Montage

In Zusammenarbeit mit dem
Fraunhofer
IZFP

DRESDEN
concept
Exzellenz aus
Wissenschaft
und Kultur