Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53

Optimiertes Prozessmonitoring beim Widerstandsschweißen

Qualitative in-situ-Stromfluss-messung der Schweißzone

T. Reichenstein, A. Scheck, M. Meiners, J. Franke

ZUSAMMENFASSUNG Das Kondensatorentladungsschweißen ist ein Widerstandsschweißverfahren, das sich durch kurze Prozesszeiten und gutes Automatisierungspotenzial auszeichnet. Bisher erfasste Kenngrößen der Prozessüberwachung ermöglichen keine signifikanten Aussagen zur Gleichmäßigkeit der Verbindungsqualität. Dieser Beitrag stellt ein qualitatives in-situ-Stromflussmesssystem vor, welches das bisherige Prozessmonitoring ergänzt, den Aufbau von neuem Prozesswissen ermöglicht und durch das verbesserte Prozessverständnis neue Anwendungsfelder für das KE-Schweißen erlaubt.

STICHWÖRTER

Schweißen, Qualitätsmanagement, Sensoren

Qualitative in-situ current flow measurement of the weld zone

ABSTRACT Capacitor discharge welding (CDW) is a resistance welding process characterized by short process times and good potential for automation. Up to now, recorded parameters of process monitoring do not allow significant statements regarding uniformity of the joint quality. This paper presents a qualitative in-situ current flow measurement system, which complements the existing process monitoring, enables the development of new process knowledge and allows new application fields for CDW due to an improved process understanding.

1 Motivation

Der steigende Wettbewerb und der damit verbundene steigende Kostendruck sowie die wechselnden Kundenanforderungen veranlassen Unternehmen dazu, ihre Produktion zu optimieren. Die zunehmende Automatisierung und Digitalisierung in der Produktion zeigen, wie die Fabrik der Zukunft aussieht: Sie ist smart, effizient und zeichnet sich durch kurze Prozesse sowie eine hohe Qualität aus. Da Montageprozesse meist einen der letzten Schritte in der Wertschöpfungskette darstellen, haben sie und vor allem die dabei vorkommenden Fügeprozesse einen bedeutenden Einfluss auf die Qualität des Endprodukts [1].

Das KE-Schweißen (Kondensatorentladungsschweißen) ist einer der Prozesse, welcher sich durch seine hohe Effizienz und die kurzen Prozesszeiten sowie durch eine geringe Netzbelastung und hohe Reproduzierbarkeit auszeichnet [2]. In der Automobilzuliefererindustrie kommt dieses Verfahren häufig zum Einsatz, zum Beispiel bei der Herstellung von Getrieben, Sitzen und Komponenten der Treibstoffeinspritzung, wie der Hochdruckpumpe. Bereits kleine Veränderungen der Stromamplitude, des Werkzeugverschleißes oder der Schweißzykluszeit können jedoch zu einer schlechteren Qualität der Schweißnaht führen, die bisher nur durch zerstörende Prüfverfahren überprüft wird [3]. Die mangelnde Steuerbarkeit des Prozesses und die variierende Schweißnahtfestigkeit haben dazu geführt, dass viele potenzielle Anwender zögern, KE-Schweißen einzusetzen, obwohl damit auch hochfeste Stähle oder kleine Teile aus unterschiedlichen Metallen gefügt werden können. [4]

2 Das Kondensatorentladungsschweißen: Grundlagen und Handlungsbedarf

Als Widerstandsschweißprozess klassifiziert, wird das KE-Schweißen hauptsächlich als Buckelschweißoperation ausgeführt, beispielsweise für Ringschweißungen. Im Vergleich mit anderen Widerstandsschweißprozessen zeichnet es sich durch einen hohen Stromstoß (bis zu 1000 kA) in Form eines einzelnen Gleichstromimpulses aus (bei Abwandlungen auch mehrere Impulse möglich) sowie durch die kurze Schweißzeit von 3 ms bis 15 ms. Die notwendige Schweißenergie wird in Kondensatorbänken gespeichert, die während der Schweißpausen aufgeladen werden. Ein deutlich höherer Wirkungsgrad als bei anderen Widerstandsschweißverfahren aufgrund der geringeren Verlustwärme, der kurzen Prozesszeiten und der kleinere Netzbelastung sind entscheidende Vorteile des KE-Schweißens im Vergleich zu anderen Widerstandsschweißverfahren. [4]

Das zugrunde liegende physikalische Prinzip beim Widerstandsschweißen ist die Joule’sche Erwärmung, welche elektrische in thermische Energie umwandelt, in Abhängigkeit vom lokalen Anstieg der Stromdichte in der Schweißzone, folglich dem Anstieg des Widerstands [5]. Die hohe Energiedichte und der lokale Energieeintrag führen zu einer kleinen Wärmeeinflusszone und somit zu geringem Verzug sowie guter Materialintegrität [6]. **Bild 1** zeigt anhand von zwei zu fügenden Bauteilen die Unterteilung des KE-Schweißprozesses in die vier Prozessschritte Kraftaufbau, Erhitzen (Entladung des Kondensators), Einsinken (Strommaximum) und Abkühlen (Verbindungsbildung) sowie

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

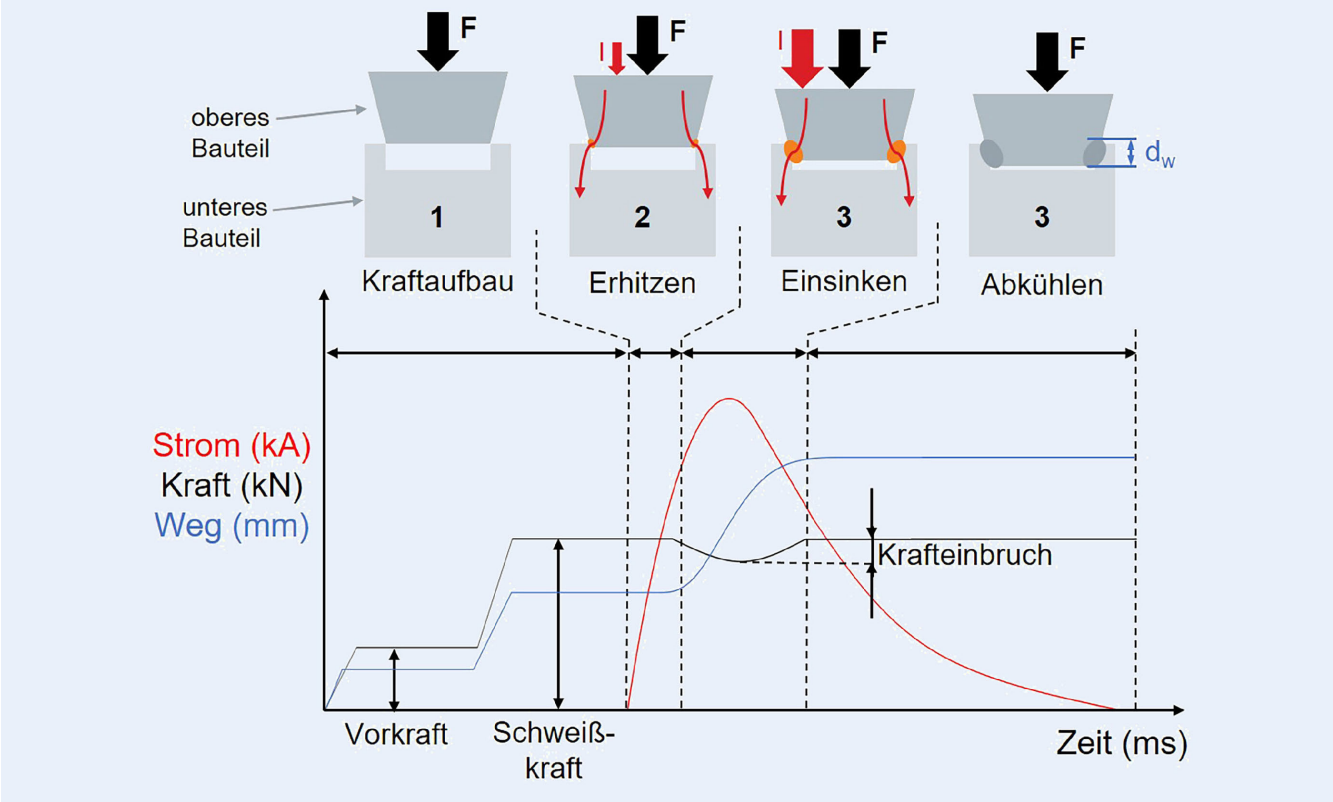

Bild 1. KE (Kondensatorentladungsschweißen)-Prozessschritte und qualitative Kurven (d_w = Schweißnahtlänge).
Grafik: FAU/Lehrstuhl FAPS in Anlehnung an Wehle [8]

die zugehörigen qualitativen Kurven für Gesamtstrom, Pressenkraft und zurückgelegten Weg [7, 8].

Beim Schweißen handelt es sich um einen „speziellen Prozess", da die Qualität der Verbindung nicht vollständig durch einfache Prüfung des Ausgangsmaterials oder der Eingangsparameter analysiert werden kann. Die Qualitätssicherung bei diesen Prozessen ist herausfordernd, da direkte Überprüfungen oft zerstörend sind und zerstörungsfreie Prüfmethoden, wie Ultraschallprüfungen oder Röntgenuntersuchungen, durch verschiedene Faktoren wie Geometrie oder Materialbeschaffenheit limitiert sein können. Ein effektives Qualitätsmanagement erfordert daher eine Kombination aus fortschrittlichen Prüfmethoden, präziser Prozesssteuerung und kontinuierlicher Datenanalyse. Durch Echtzeit-Datenüberwachung und adaptive Steuerungssysteme kann die Prozessqualität optimiert und die Fehlerwahrscheinlichkeit reduziert werden. [9, 10]

Im Gegensatz zu anderen Widerstandsschweißprozessen können der Schweißstrom und die Schweißzeit nicht manuell eingestellt werden. Die einzigen beiden Prozessvariablen, mit welchen der Schweißprozess direkt beeinflusst werden kann ohne einen aufwendigen Umbau der Anlage vornehmen zu müssen, sind die Schweißenergie oder die Ladeenergie der Kondensatorbank und die Pressenkraft. Derzeit gibt es noch kein Simulationsmodell, das vollständig das Zusammenwirken der physikalischen Prozesse während des Schweißvorgangs geeignet abbildet. Daher gestaltet sich die Auslegung des Fügeprozesses in der Praxis als schwierig und beruht oft auf Erfahrungswerten von Anlagenherstellern. [4]

Wenn es während des Fügeprozesses zu Fehlern kommt, so ist die Suche nach der Fehlerursache aufwendig. Eine nachträgliche Überprüfung der Schweißnahtfestigkeit ist nur mit zerstörenden Verfahren möglich, weshalb im Fehlerfall ganze Produktionschargen aussortiert werden. Bisherige Systeme zum Prozessmonitoring beim KE-Schweißen basieren auf der Überwachung der jeweiligen Kraftkurven, Einsinktiefen und Kondensatorentladungskurven (zeitlicher Verlauf der Stromstärke). Bei Ringschweißnähten oder anderen, nicht punktförmigen Schweißungen fehlt aber die Verteilung des Stromflusses in der Schweißnaht zur Bestimmung der Wärmeentwicklung. Eine Erfassung der Stromflussverteilung entlang der Schweißnaht kann jedoch Aussagen über mögliche Fehler in der Schweißnaht liefern. Umso wichtiger ist es, dass Messsysteme entwickelt werden, die diese signifikante Prozessvariable für eine geeignete Prozessüberwachung erfassen. Es gilt die Stromflussverteilung in der Schweißzone zu überwachen, die für die Joule'sche Erwärmung und damit für den Schweißprozess entscheidend ist.

Über die neuen Informationen dieser Daten kann das Prozesswissen und somit die Akzeptanz dieses Fügeverfahrens bedeutend gesteigert werden, da bisherige Messsysteme diese qualitätskritische Messgröße noch nicht erfassen. Dies könnte den Einzug des Fügeverfahrens in andere Anwendungsfelder ermöglichen. Die Anforderungen an das notwendige Messsystem sind vor allem ein ausreichend großer Messbereich, um die gesamte Höhe des Stromstoße zu erfassen, eine geeignete Bandbreite, um während der kurzen Schweißzeit das Signal adäquat aufzulösen, eine indirekte Messung, da eine direkte Messung mithilfe eines Widerstands den KE-Schweißprozess beeinflussen würde und eine geringe Bauhöhe, um das Messsystem – für eine hohe Signifikanz der Ergebnisse – auf Höhe der Schweißzone möglichst nahe zu positionieren.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

3 Aufbau und Funktionsweise des Messsystems

Ziel des indirekten qualitativen in-situ-Messsystems ist die qualitative Überwachung der Schweißnaht basierend auf der Stromflussverteilung innerhalb der Schweißzone. Hierfür ist das Messsystem als zirkulärer Array aus insgesamt 24 Hall-Effekt-Sensoren aufgebaut, die in acht Sensorcluster mit jeweils drei Hall-Effekt-Sensoren unterteilt und auf einer Grundplatte angeordnet sind. Diese Sensorcluster können auf der Grundplatte in unterschiedlichen diskreten Abständen zum Zentrum angeordnet werden, um das Messsystem flexibel auf verschiedene Teiledurchmesser und Schweißströme anpassen zu können. Das entwickelte Messsystem ist beeinflusst durch die Vorarbeiten von *Di Rienzo et al.* [11], *Weiss et al.* [12] und *Shan et al.* [13]. In **Bild 2** ist der konzeptionelle Aufbau des Messsystems von oben zu sehen [14].

Die Messung der induzierten magnetischen Flussdichte B im Abstand zum Bauteilzentrum, beziehungsweise deren zirkuläre Ausprägung dient als Indikator für die Verteilung des Stromflusses durch das Bauteil und folglich für die Bestimmung der Schweißqualität (**Bild 3**).

Ein Algorithmus sorgt dafür, dass Interferenzen der einzelnen Sensorcluster reduziert werden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen [15]. Werden während eines Schweißvorgangs signifikante

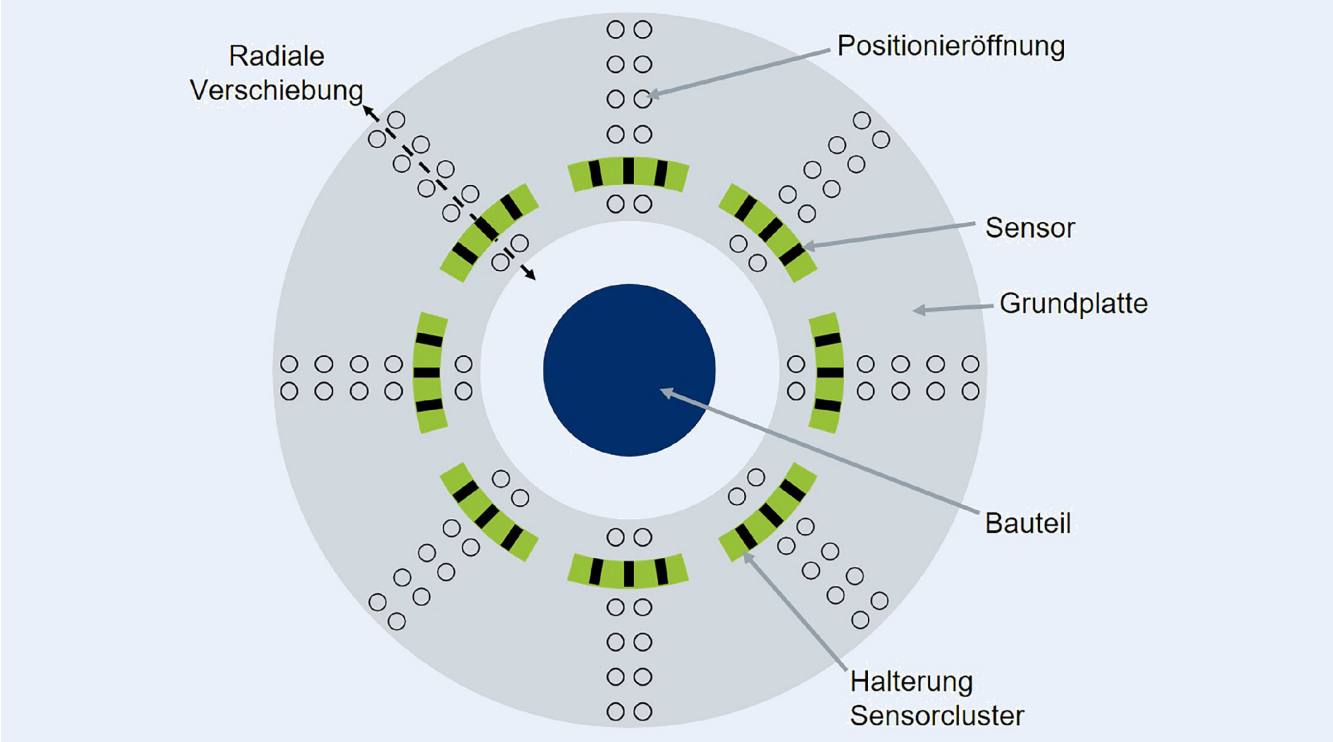

Bild 2. Konzeptioneller Messaufbau mit Bauteil (von oben). *Grafik: FAU/Lehrstuhl FAPS nach Meiners et al. [14]*

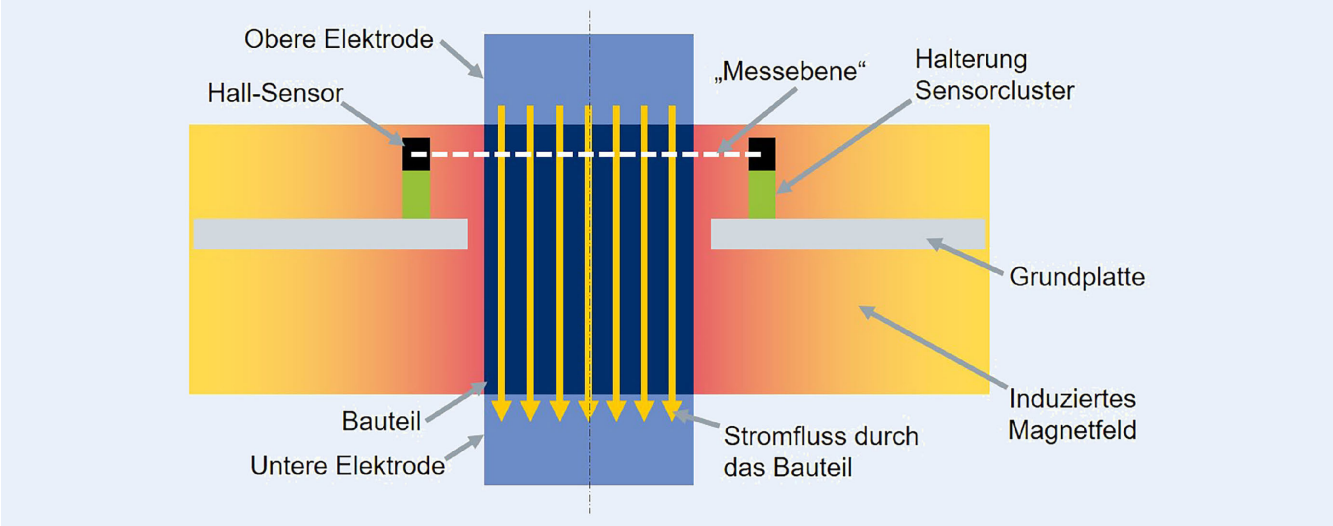

Bild 3. Schematische Skizze des Messprinzips mit rotationssymmetrischem Bauteil und gleichmäßiger Ausprägung des Magnetfelds (seitliche Ansicht im Schnitt). *Grafik: FAU/Lehrstuhl FAPS*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Unterschiede bei den Messergebnissen der einzelnen Sensoren oder Sensorcluster festgestellt, lässt dies auf eine inhomogene Ausbreitung des induzierten Magnetfelds und auf mögliche Schweißfehler in den zugehörigen Bereichen schließen.

Die Auswahl der Sensoren hängt von der Höhe der induzierten magnetischen Flussdichte B ab, welche nach dem Biot-Savart-Gesetz proportional zum Strom und zum Abstand ist. Je näher die Messung am Bauteil erfolgt, desto signifikanter sind die Messergebnisse für Aussagen über die Schweißqualität in dieser Region, allerdings steigt damit auch der notwendige Messbereich des Hall-Effekt-Sensors. Über Simulationen können Positionen für signifikante Bereiche sowie die notwendigen Mindest- und Maximalabstände der Sensoren, in Abhängigkeit des Schweißstroms, ermittelt werden [14]. Das Messsystem wird an eine nachgelagerte Auswerteeinheit (oder direkt an die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)) angeschlossen, um die Messergebnisse an die Steuerung zu übermitteln und das bestehende Prozessmonitoring zu erweitern.

4 Prototypische Erprobung und Validierung

Die Validierung und prototypische Erprobung des Konzepts wurde an einer KE-Schweißanlage durchgeführt, die zum Verschweißen von Gehäusen aus hochfestem Stahl mit einem dazugehörigen Deckel verwendet wurde und die nach 6 ms das Maximum des Stromstoßes von 93 kA erreicht. Dabei wurde nicht das gesamte Messsystem mit seinen 24 Sensoren verwendet, sondern ein Prototyp mit vier Hall-Effekt Sensoren (A1366 Allegro) mit einer Bandbreite von 120 kHz und einem Messbereich bis circa 250 mT. Die Messwerte wurden für die prototypische Erprobung und Validierung mit einem Oszilloskop erfasst und ausgewertet. In **Bild 4** ist der Aufbau des Prototyps sowie die Oszilloskopbilder der Messkurven mit einer Referenzmessung und einer Validierungsmessung zu sehen. Bei den Versuchen wurde ein Zentrierbolzen verwendet, um das Gehäuse in der gleichen Position zu halten und somit reproduzierbare Messungen durchführen zu können.

Bei der Durchführung der Versuche hatten die Sensoren 3 und 4 den kleinsten Abstand zum Zentrum, dann Sensor 2 und anschließend Sensor 1. Grund war, dass zusätzlich überprüft werden sollte, ob auch bei Messungen außerhalb des Messbereichs die Kurvenform Aufschluss über Veränderungen der Ausbreitung des Magnetfelds geben kann und nicht nur die Beträge der Maxima. Um die qualitative Fehlerdetektionsfähigkeit des Messsystems zu validieren, wurden zuerst mehrere Messungen mit Gutteilen (Referenzmessung) durchgeführt und anschließend mehrere Messungen mit zuvor eingebrachten Defekten am Deckel im Bereich des Sensors 1, um eine fehlerhafte Schweißung zu provozieren (Validierungsmessung). Die dargestellten Kurven für Referenzmessungen waren alle vergleichbar. Das Messsystem konnte die eingebrachten Fehler detektieren und zeigte einen Unterschied der gemessenen magnetischen Flussdichte an sowie eine Verformung der Kurven für die anderen drei Sensoren (siehe rechts in Bild 4). Da die Defekte manuell eingebracht wurden, zeigten diese betragsmäßig unterschiedliche Differenzen, wobei jeweils signifikante Unterschiede zu den Werten der Referenzmessung gemessen werden konnten (in Bild 4 circa 38 mT).

5 Vergleich zu bestehenden Ansätzen und Potenziale für weitere Anwendungen

Die Messergebnisse des Prototyps konnten die qualitative Fehlerdetektionsfähigkeit bestätigen. Die Deformation des induzierten Magnetfelds als Indikator für die Stromflussverteilung äußerte sich durch die Abnahme der magnetischen Flussdichte im Bereich von Sensor 1 (Maximalwert) und eine Zunahme der Kurvensteigung der anderen drei Messkurven. Die Bandbreite war hoch genug, um den KE-Schweißprozess zu überwachen und konnte so die Echtzeitfähigkeit bestätigen beziehungsweise die Möglichkeit zum potenziellen Einsatz des Messsystems als Online-Monitoring-Werkzeug.

Der funktionelle Nachweis ist der erste Schritt bei der Entwicklung eines in-situ-Messsystems beim KE-Schweißen, jedoch sind noch weiterführende Versuchsreihen und Entwicklungsmaßnahmen vor einem kommerziellen Einsatz nötig. Auch wenn gezeigt wurde, dass die Steigung der Kurven Informationen enthält, sollten andere Sensoren für die weitere Untersuchung verwendet werden, welche einen höheren Messbereich sicherstellen.

Durch ein Messsystem basierend auf diesem Konzept wäre der Einsatz in einer vollautomatisierten Produktion möglich, da die Messergebnisse direkt von der Steuerung ausgewertet und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden können, wie etwa das Ausschleusen von Bauteilen mit möglichen Schweißfehlern. Dadurch müssen nicht mehr, wie zu Beginn erwähnt, gesamte Produktionschargen aussortiert werden, wenn es in anschließenden zerstörenden Stichprobenprüfungen zu Fehlern kommt, sondern die mangelhaften Bauteile können direkt in der Linie identifiziert und nachverfolgt werden. Diese Online-Monitoring-Fähigkeit trägt zu einer Verbesserung des Qualitätsmanagements bei und eröffnet dem KE-Schweißen weitere Anwendungsfelder und

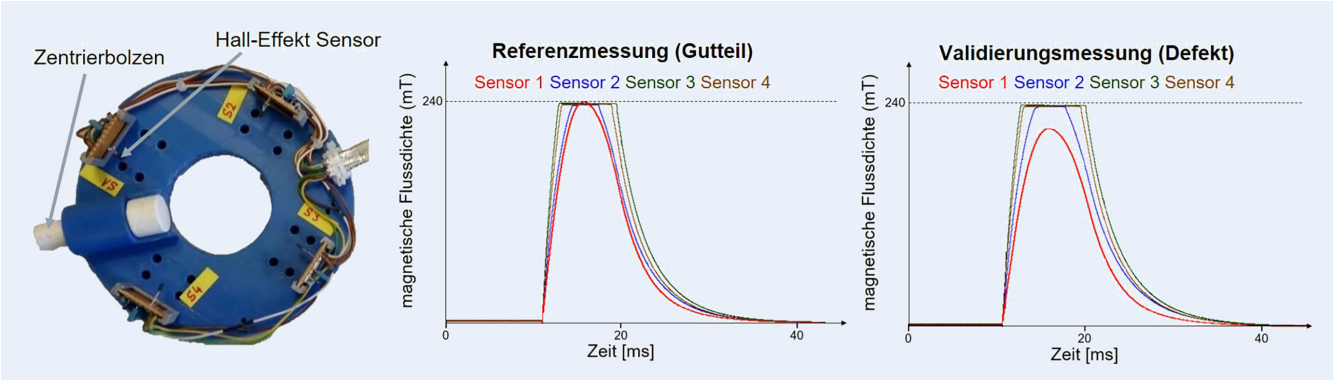

Bild 4. Prototyp des Messsystems (links) und Oszilloskopbilder der Messkurven (rechts). *Grafik FAU / Lehrstuhl FAPS in Anlehnung an Meiners et al. [14]*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Branchen, in denen bisher aufgrund der mangelhaften Aussagekraft der Prozessüberwachung noch von dessen Einsatz abgesehen wurde – trotz der Vorteile hinsichtlich hoher Effizienz, kurzer Prozesszeit und Schweißmöglichkeiten.

Im Gegensatz dazu existieren in der Literatur verschiedene Ansätze zur zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen [16–18]. *Yang et al.* [16] setzen eine innovative Ultraschallmethode zur zerstörungsfreien Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen in Edelstahl ein. Diese Methode zeichnet sich durch die Anwendung einer spiralförmigen C-Scan-Technik aus, die eine höhere Effizienz und Genauigkeit im Vergleich zu konventionellen linearen oder X-Y-Scanmethoden bietet. Die spiralförmige Scantechnik ermöglicht eine präzise Lokalisierung auch kleinster Defekte, die bei herkömmlichen Ultraschallverfahren oft schwer zu erkennen sind.

Eine Ultraschallmessung wird auch von *Mathiszik et al.* [17] verwendet und durch eine eigens entwickelte passiv magnetische Flussdichtemessung erweitert. Die angewandten Techniken liefern umfassende Daten für detaillierte Einblicke in die Struktur und Integrität der Schweißnähte und erlauben eine präzise Identifizierung von Defekten und Inhomogenitäten. Diese Methoden sind für eine Vielzahl von Materialien geeignet und können auch bei komplexen Geometrien effektiv eingesetzt werden. Jedoch kann die Zugänglichkeit der Schweißnaht in einigen Fällen, vor allem bei komplexen Bauteilen, eine Herausforderung darstellen.

Eine Kombination verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren setzen auch *Tsukada et al.* [18] ein. Dabei werden neben einer magnetischen Flussdurchdringungsmessung auch Wirbelstrommessungen verwendet. Die Ergebnisse der Studie verdeutlichen eine gute Korrelation der magnetischen Flussdurchdringung mit zerstörenden Schertests, da Veränderungen in der Permeabilität durch die Nuggetbildung aufgezeigt werden. Außerdem können mit der Wirbelstrommessung detaillierte Informationen über das Profil der Nuggettiefe gewonnen werden, was die Identifikation defekter Produkte effektiv unterstützt. Die kombinierte Anwendung beider Techniken ist eine effektive Methode zur Beurteilung der Integrität von Schweißverbindungen, ohne diese zu beschädigen. Die Integration dieser Techniken ermöglicht eine tiefgehende Prüfung der Materialbeschaffenheit bis in unterliegende Schichten. Dies ist besonders wertvoll, um das Nuggetprofil und mögliche Fehlstellen unter der Oberfläche zu erkennen.

Die aktuellen Ansätze zur zerstörungsfreien Prüfung, bei denen neben den vorgestellten Messverfahren [16–18] auch noch Röntgenverfahren oder Computer Topographen eingesetzt werden, ermöglichen eine genauere Ermittlung der Defektgrößen, im Gegensatz zum vorgestellten in-situ-Messsystem. Sie müssen jedoch in einem separaten Prozessschritt durchgeführt werden, was zu längeren Durchlaufzeiten pro Bauteil führt. Zudem sind diese Prüfverfahren mit deutlich höheren Anschaffungs- und Betriebskosten für Hard- und Software verbunden, im Gegensatz zu vergleichsweise günstigen Hall-Sensoren. Auch kommen bei den anderen Prüfverfahren weitere organisatorische Anforderungen hinzu, wie etwa die Notwendigkeit von Strahlenschutzbeauftragten sowie regelmäßige Überprüfungen und Wartungen.

Durch die Erweiterung des bestehende Prozessmonitorings beim KE-Schweißen wird es möglich, signifikante, qualitative Aussagen über die Schweißnahtqualität zu treffen. Das so gewonnene Prozesswissen kann wieder an das Engineering zurückgeführt werden. Werden in bestimmten Bauteilbereichen vermehrt Schweißfehlern detektiert, so sollte die Geometrie des Bauteils in diesen Bereichen angepasst werden, um die Fehlerneigung zu reduzieren. Diese expliziten Erkenntnisse können bei der Auslegung von KE-Schweißprozessen berücksichtigt werden, welche oft auf Grundlage von implizitem Erfahrungswissen beruhen, wie eingangs erwähnt. Auch bei der fertigungsgerechten Gestaltung von Bauteilen lässt sich dieses Prozesswissen integrieren. Vor allem die Tatsache, dass es noch keine Simulation gibt, welche den KE-Schweißprozess vollständig mit allen physischen Wechselwirkungen abbildet, erfordert den Einsatz eines solchen Messsystems in der Praxis, um die geforderte Qualität der Schweißnaht überwachen zu können.

Abhängig von dem zur Verfügung stehenden Bauraum in bestehenden KE-Schweißanlagen muss das spätere Messsystem angepasst werden, sodass es ohne große Umbaumaßnahmen integriert werden kann und ein Retrofit von bestehenden KE-Schweißanlagen möglich ist. Die damit gesammelten Daten können anschließend als Ausgangspunkt für erweiterte Analysewerkzeuge dienen, wie beispielsweise Machine Learning. Der Einsatz des Messsystems ist nicht nur auf das KE-Schweißen beschränkt, sondern kann auch in anderen Widerstandsschweißprozessen eingesetzt werden, um deren Prozessmonitoring zu ergänzen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag stellt das Konzept eines qualitativen in-situ-Messsystems für die Prozessüberwachung beim Kondensatorentladungsschweißen vor. Dieses Messsystem erlaubt es, die Stromflussverteilung innerhalb der Schweißnaht zu überwachen, welche eine der Hauptprozessgrößen des KE-Schweißens darstellt, um qualitativ Schweißfehler detektieren zu können. Das vorgestellte Messsystemkonzept bestand aus einem zirkulären Array aus Hall-Effekt-Sensoren zur Messung der Ausbreitung der magnetischen Flussdichte, die vom Schweißstrom induziert wurde. Mithilfe des Messsystems kann das KE-Schweißen in neuen Anwendungsfeldern und Branchen eingesetzt werden, die zuvor durch die unzureichende in-situ-Prozessüberwachung abgeschreckt wurden.

In den nächsten Schritten für die Weiterentwicklung zu einem Messsystem für den kommerziellen Einsatz sollen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um Zusammenhänge über die Defektgrößen abzuleiten und dadurch quantitative Aussagen treffen zu können. Dafür sollen mit destruktiven Messverfahren die entsprechenden Defektgrößen ermittelt werden, welche in Abhängigkeit des gemessenen Unterschiedes in der Magnetfeldausprägung dokumentiert werden – ähnlich wie beim Vorgehen von *Tsukada et al.* [18]. Diese Datensätze können als Ausgangsbasis für das Training von Predictive-Quality-Modellen dienen. Des Weiteren können die Ergebnisse des Messsystems auch genutzt werden, um die Entwicklung von Simulationsmodellen für das KE-Schweißen zu unterstütze, beziehungsweise diese zu validieren. Im Umkehrschluss können neue Simulationsmodelle genutzt werden, um Algorithmen zu entwerfen, welche die Einflüsse von Störfeldern auf das Messsystem kompensieren können.

Literatur

[1] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G. et al.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Darmstadt: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik -WGP 2016

[2] Ketzel, M.-M.; Hertel, M.; Zschetzsche, J. et al.: Heat development of the contact area during capacitor discharge welding. Welding in the World 63 (2019) 5, pp. 1195–1203

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

[3] Paul, B. K.; Wilson, D. D.; McDowell, E. et al.: Study of weld strength variability for capacitor discharge welding process automation. Science and Technology of Welding and Joining 6 (2001) 2, pp. 109–115
[4] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe „Widerstandsschweißen“: Merkblatt DVS 2911. Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Techniken. Düsseldorf: DVS Media 2016
[5] Hamedi, M.; Atashparva, M.: A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. Welding in the World 61 (2017) 2, pp. 269–290
[6] Venkataraman, S.; Devletian, J. H.: Rapid Solidification of Stainless Steels by Capacitor Discharge Welding. Welding Journal 67 (1988) 6, pp. 111–118
[7] Wehle, M.; Schmid, F.; Schmitz, G. et al.: Experimental Study on the Role of the Electrical Contact Resistance in Resistance Projection Welding. 10th International Seminar & Conference on Advances in Resistance Welding, Esslingen, 2018, pp. 1–7
[8] Wehle, M.: Basics of process physics and joint formation in resistance projection welding processes. Dissertation, Universität Stuttgart, 2020
[9] DIN EN ISO 15607: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Allgemeine Regeln (ISO 15607:2019). Ausgabe Februar 2020
[10] DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015). Ausgabe November 2015
[11] Di Rienzo, L.; Bazzocchi, R.; Manara, A.: Circular arrays of magnetic sensors for current measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 50 (2001) 5, pp. 1093–1096
[12] Weiss, R.; Itzke, A.; ReitenspieB, J. et al.: A Novel Closed Loop Current Sensor Based on a Circular Array of Magnetic Field Sensors. IEEE Sensors Journal 19 (2019) 7, pp. 2517–2524
[13] Shan, P.; Yao, Q.; Li, Y. et al.: Reconstruction of current density distribution in weld area during resistance spot welding of aluminum alloy based on magnetic field. Transactions of Tianjin University 21 (2015) 2, pp. 129–134
[14] Meiners, M.; Reichenstein, T.; Franke, J. et al.: Current Distribution Monitoring in Capacitor Discharge Welding. 25th IEEE International Conference 2020, Vienna, Austria, 2020, pp. 447–453
[15] Itzke, A.; Weiss, R.; DiLeo, T. et al.: The Influence of Interference Sources on a Magnetic Field-Based Current Sensor for Multiconductor Measurement. IEEE Sensors Journal 18 (2018) 16, pp. 6782–6787
[16] Yang, L.; Chuai, R.; Cai, G. et al.: Ultrasonic Non-Destructive Testing and Evaluation of Stainless-Steel Resistance Spot Welding Based on Spiral C-Scan Technique. Sensors (Basel) 24 (2024) 15, doi. org/10.3390/s24154771
[17] Mathiszik, C.; Koal, J.; Zschetzsche, J. et al.: Non-destructive characterization of resistance projection welded joints by ultrasonic and passive magnetic flux density testing. Welding in the World (2024), doi. org/10.1007/s40194–024–01808–3
[18] Tsukada, K.; Miyake, K.; Harada, D. et al.: Magnetic Nondestructive Test for Resistance Spot Welds Using Magnetic Flux Penetration and Eddy Current Methods. Journal of Nondestructive Evaluation 32 (2013) 3, pp. 286–293

Tobias Reichenstein, M. Sc.
tobias.reichenstein@faps.fau.de
Tel. +49 9131 / 85-28972
Foto: FAU / Lehrstuhl FAPS

Albert Scheck, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)
Egerlandstr. 7–9, 91058 Erlangen
www.faps.fau.de

Moritz Meiners, M. Sc. M. Sc.
Schäfer Werkzeug- und Sondermaschinenbau GmbH
Dr. Alfred Weckesser Str. 6, 76669 Bad Schönborn

LIZENZ
Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY