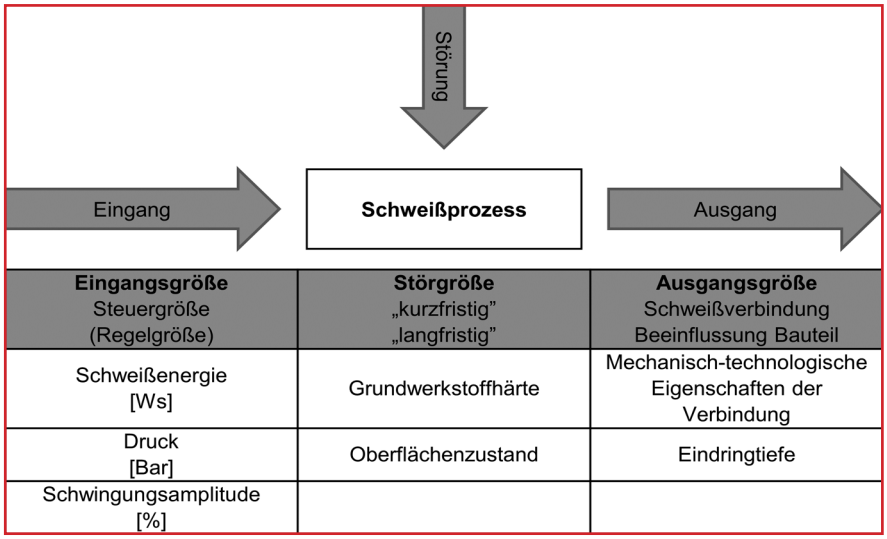
Untersuchungen zum Störeinfluss von Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften auf Cu-Cu Metall-Ultraschallschweißverbindungen

Müller, f. W.; Schiebahn, A.; Reisgen, U. (1)

Metall-Ultraschallschweißen

Das Metall-Ultraschallschweißen ist ein stoffschlüssiges Fügeverfahren, aufgrund des geringen Wärmeeintrags ist das Verfahren für anspruchsvolle Anwendungen wie elektrotechnische Bauteile geeignet. Im Rahmen der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen gewinnt die Nutzung des Verfahrens in der Batterietechnik, für Litzen- und Leiterkonfektionierung sowie der Leistungselektronik stetig weiter an Bedeutung. Trotz aller bisherigen Bemühungen treten im Industrieeinsatz Prozessschwankungen auf. [1, 2] Diese sind häufig nicht erklärbar, da bezüglich der komplexen Wirkzusammenhänge während des Schweißprozesses wissenschaftlich fundierte Kenntnisse fehlen. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keine Möglichkeit, den Fügeprozess im industriellen Umfeld zu überwachen. Als bauteilabhängige Einflussgrößen auf den Prozess gelten im Allgemeinen der Oberflächenzustand, Werkstoff und Geometrie der Fügepartner [3].

Untersuchungsmethoden zur direkten Prozessüberwachung aus Laboranwendungen mit Einsatz hochsensibler, externer Messtechnik eignen sich aufgrund von begrenzter Zugänglichkeit und fehlenden Auswertemethoden nicht für eine industrielle Qualitätssicherung. Alternative Ansätze auf Basis von anlageninternen Messwerten und künstlicher Intelligenz (z.B. Neuronale Netze) können die externen Vorgänge und Einflüsse zwischen den Fügenteilen, der Umgebung und den Werkzeugen gegenwärtig nicht ausreichend detailliert abbilden. Es ist in diesem Zusammenhang auch darauf hinzuweisen, dass die Qualität der geschweißten Verbindung zum aktuellen Zeitpunkt nicht zerstörungsfrei bewertet werden kann und eine stichprobenweise Prüfung zur Losfreigabe nur bedingt aussagekräftig ist. Vereinfacht kann der Metall-Ultraschallschweißprozess wie in Bild 1 dargestellt in Eingangs-, Stör- und Ausgangsgrößen aufgeteilt werden. Im Falle des Punkt- oder Linienschweißens ist eine Prozessdarstellung ohne rückführbare Größen zutreffend, einzig die Schwingungsamplitude und die insgesamt umgesetzte Schweißenergie (alternativ die Schweißzeit) werden zur Prozessteuerung bzw. zur Definition des Prozessendes industriell eingesetzt. Vorgreifend beschränkt sich die Aufzählung auf die in dieser Studie untersuchten Störgrößen.

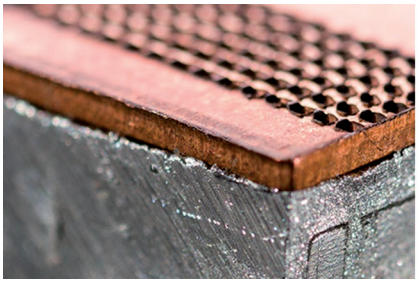


Eingangsgröße Steuergröße (Regelgröße)	**Störgröße** „kurzfristig" „langfristig"	**Ausgangsgröße** Schweißverbindung Beeinflussung Bauteil
Schweißenergie [Ws]	Grundwerkstoffhärte	Mechanisch-technologische Eigenschaften der Verbindung
Druck [Bar]	Oberflächenzustand	Eindringtiefe
Schwingungsamplitude [%]		

Bild 1: Schweißprozess als System in Anlehnung an (4) Einflussgrößen auf den M-USS-Prozess nach [3]

Untersuchungen zur Prozessüberwachung von Cu-Cu Verbindungen

Im Rahmen des IGF-Projektes Systemidentifikation und Monitoring von Metall-Ultraschallschweißprozessen (SIMUSS) soll durch eine mechanische Modellierung des Schwingungsverhaltens ermöglicht werden, bei geringem Einsatz von Messtechnik bereits präzise Aussagen über den vorliegenden Prozessverlauf zu treffen. Auf Basis dieser umfassenden Informationen können in Zukunft Kennwerte zur Qualitätssicherung abgeleitet werden. Grundstein des Forschungsprojektes ist die empirische Charakterisierung von Störgrößen auf den Fügeprozess und das sich einstellende Schwingungsverhalten



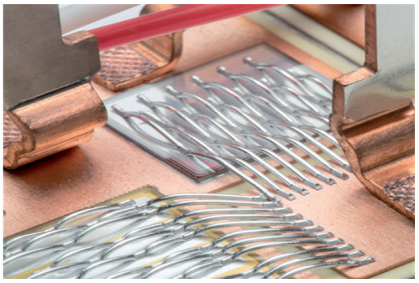


Bild 2: Stromschiene Batterieprototyp – ISF RWTH Aachen I IGBT Verschaltung – Schunk Sonosystems GmbH Wettenberg [5]

Bezeichnung	Anforderung (R_M MPa)	R_M real / s (MPa / n=5)	HV0,2 / s (n=8)
W	R220	231,64 / 0,16	53,86 / 0,83
HH	R240	256,91 / 0,54	71,00 / 1,30
H	R290	304,66 / 0,55	98,73 / 1,78

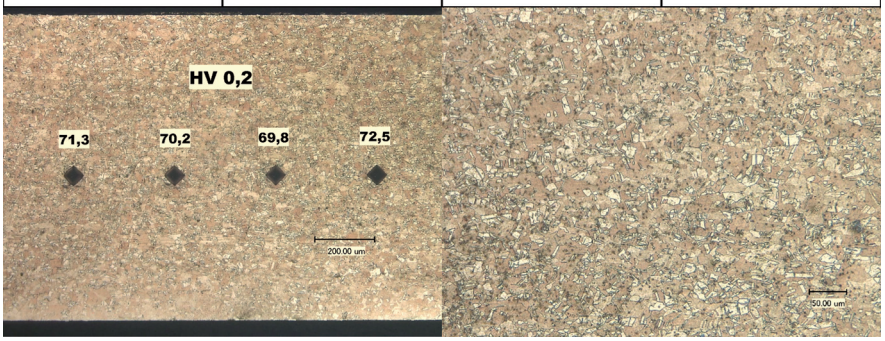


Bild 3: HV Untersuchung in Blechmitte – ISF RTWH Aachen, Mikroskopische Aufnahme

der Anlage mit Hilfe hochauflösender Messtechnik, ohne die eine Modellbildung oder –validierung nicht möglich ist. Aufgrund seiner Relevanz erfolgen die Untersuchungen bei SIMUSS auf Basis von Cu-Cu Überlappverbindungen mit 1 mm Materialstärke. Typische Anwendungen in ähnlicher Konfiguration sind Komponenten von Leistungselektronikbauteilen oder Batteriebaugruppen, dargestellt in Bild 2. In diesen Anwendungen fließen hohe Ströme, durch die große Anbindungsfläche lassen sich unter anderem niedrige Übergangswiderstände und geringe spezifische Stromlasten sicherstellen.

Bei dem Versuchsmaterial handelt es sich um Cu-ETP (CW004A) nach DIN EN 13599:2014. Es ist hervorzuheben, dass Cu-ETP aufgrund seines Restsauerstoffgehalts und dem damit einhergehenden Risiko der Wasserstoffkrankheit nicht für Schmelzschweißverfahren empfohlen ist [6]. Verwendet wird kaltgewalztes Blechmaterial in den Zuständen R220, R240 und R290, nachfolgend als weich (W), halb-hart (HH) und hart (H) bezeichnet. Die Zusammensetzung und die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Versuchswerkstoffe werden mithilfe einer Optischen Emissionsspektroskopie, Härtemessungen und das Gefüge einer HH Probe. Bei allen Versuchen konnte eine sehr geringe Standardabweichung s erzielt werden.

Die Schweißversuche werden an einer Schweißanlage der Firma Schunk Sonosystems GmbH vom Typ LS-C am ISF in Aachen durchgeführt. Verwendet wird ein 4 kW Generator sowie ein Linearschwingersystem, bestehend aus dem dazugehörigen Konverter, einem Booster sowie einer λ/2-Sonotrode mit Profilierung für Cu-Werkstoffe. Die Anlage zeichnet sich neben einer massiven Bauweise durch eine gute Zugänglichkeit von Sonotrode und Amboss während des Schweißens aus, was die direkte Prozessbeobachtung ermöglicht. Bild 4 zeigt schematisch den Anlagenaufbau und die verwendete Messtechnik.

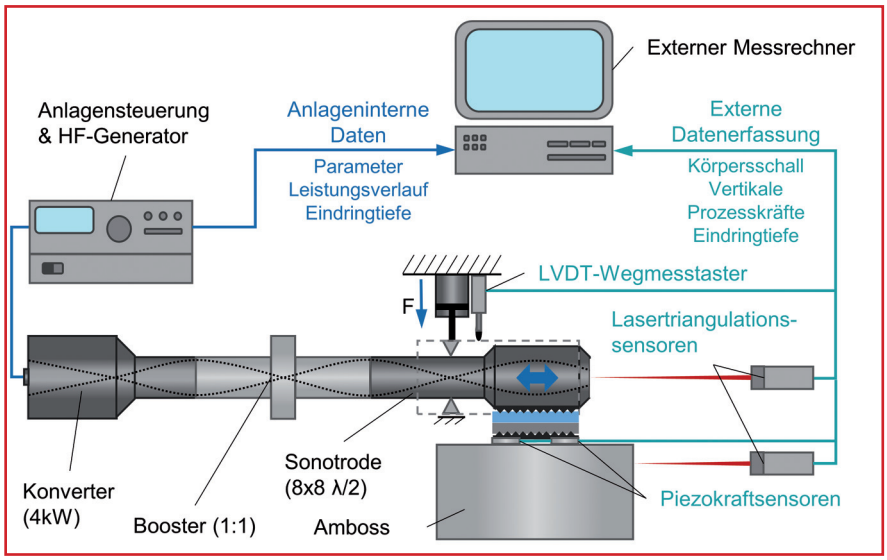


Bild 4: Schematische Darstellung der Ultraschallschweißanlage LS-C am ISF RWTH Aachen

nach Vickers im Querschliff sowie Zugprüfungen nach DIN EN ISO 6892-1:2016 in und senkrecht zur Walzrichtung überprüft. Auf Basis der Schliffbilder lässt sich ebenfalls die Gleichmäßigkeit im Werkstoffgefüge über den Blechquerschnitt feststellen. Bild 3 fasst ausgesuchte Ergebnisse tabellarisch zusammen und zeigt beispielhaft eine durchgeführte Härtemessung

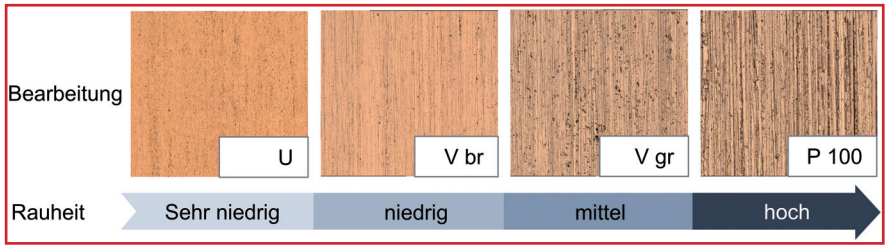


Bild 5: Beispielaufnahmen der gerichtet bearbeiteten Oberflächen

Die Versuche werden mit optimierten Parametersätzen durchgeführt. Die Parameteroptimierung wurde durch eine validierte Modellierung der Schweißgüte, ermittelt als maximale Scherkraft, auf Basis von statischer Versuchsplanung in Form eines Wirkungsflächenplans umgesetzt. Die Versuchsreihen in SIMUSS erfolgen mit verschiedenen Blechabmaßen, die verwendeten Parameter und Abmaße sind jeweils aufgeführt.

Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf den Schweißprozess

Die Oberflächenrauheit des Versuchsmaterials wird mit Hilfe eines Laserkonfokalmikroskops optisch vermessen. Die

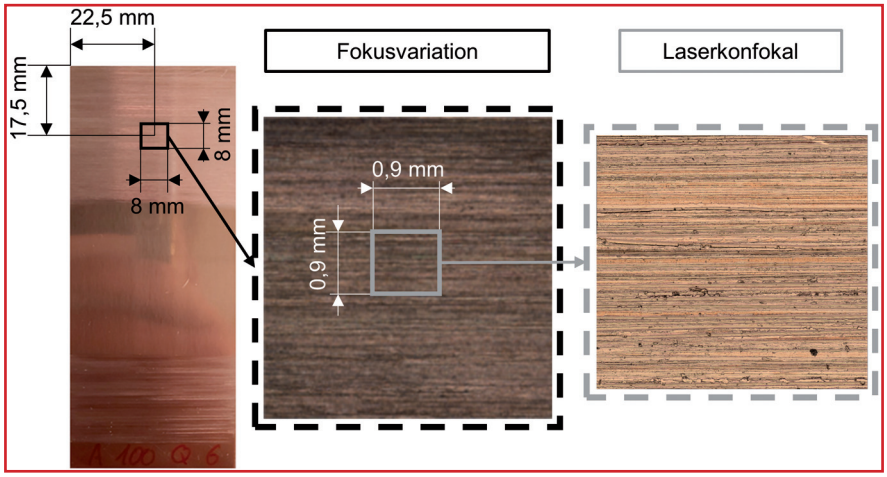


Bild 6: Schematische Darstellung der Messbereiche und Verfahren

Grundwerkstoff und Oberflächenzustand	Mittl. S_A	Mittl. S_Q	Mittl. S_Z	n
W U	0,14	0,18	1,9	3
HH U	0,127	0,162	2,721	16
H U	0,13	0,17	2,6	3
HH V br	0,154	0,208	7,334	16
HH V gr	0,543	0,729	12,572	16
HH P 100	1,398	1,874	23,05	16

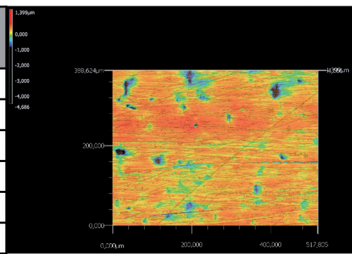


Bild 7: Gemittelte Oberflächenkennwerte des Versuchsmaterials, Bestimmung nach [7]

dreidimensionale Messung erlaubt die Erfassung von richtungsabhängigen und flächigen Oberflächenmerkmalen, wie sie durch Umformvorgänge oder Oberflächenbearbeitungen erzeugt werden können. Verwendet wird ein Laserkonfokalmikroskop vom Typ VK-X1000 der Keyence Corporation.

Durch eine Bearbeitung der Blechoberflächen kann die Störgröße Oberflächenrauheit gezielt eingestellt werden. Die Erzeugung von unterschiedlichen Rauheiten erfolgt mit Schleifvliesen und -papieren. Ausgehend von der unbearbeiteten Fläche U über die Bearbeitung mit zwei verschiedenen Vliesen V br und V gr bis hin zu Schleifpapier mit einer Körnung von 100, P 100, nimmt die Rauheit wie in Bild 5 gezeigt zu. Das Schleifen erfolgt in einer Vorrichtung, welche nur eine Bearbeitungsrichtung zulässt. Nach der Bearbeitung werden die Proben in einem Ultraschallbad entfettet, vor der eigentlichen Schweißung erfolgt eine weitere Reinigung mit Propan-2-ol, um nach der Reinigung angesammelte Feststoffe von der Oberfläche zu entfernen.

Die Vermessung der Oberflächeneigenschaften der Proben erfolgt in zwei Schritten. In einer ersten Messung wird der komplette Schweißbereich in geringer Auflösung durch eine Fokusvariation vermessen. Aus diesem Datensatz lassen sich oberflächliche Schäden, geometrische Verformungen des Blechs sowie die Homogenität der Oberfläche in der Kontaktzone ermitteln. Im zweiten Schritt erfolgt die hochaufgelöste, quantitative laserkonfokale Messung der Oberfläche in einem Teilbereich der Kontaktzone.

Das in Bild 6 gezeigte Vorgehen lässt sich durch den nur geringfügigen Mehrwert vollständigen feinaufgelösten Messung bei einer immensen Steigerung der Verarbeitungszeit und der erzeugten Datenmenge begründen. Bild 7 zeigt die über die vermessenen Proben n gemittelten Messwerte der gewalzten Oberflächen, sowie die schleifend bearbeiteten Oberflächenzustände.

Für die bearbeiteten Proben ist die Betrachtung von Schiefe Ssk und Kurtosis Sku [7] der erzielten Oberfläche ebenfalls von Relevanz, um die Güte und Wiederholbarkeit der Behandlungen zu ermitteln. Hierbei zeigen sich im Vergleich zu den unbearbeiteten Flächen keine Auffälligkeiten.

Es zeigt sich, dass die Veränderung der Oberflächeneigenschaften großen Einfluss auf die frühe Phase der Verbin-

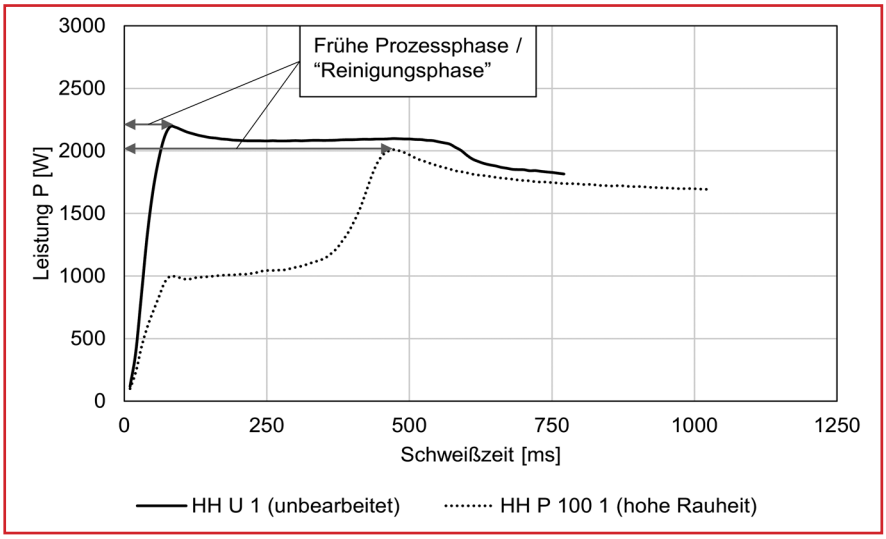
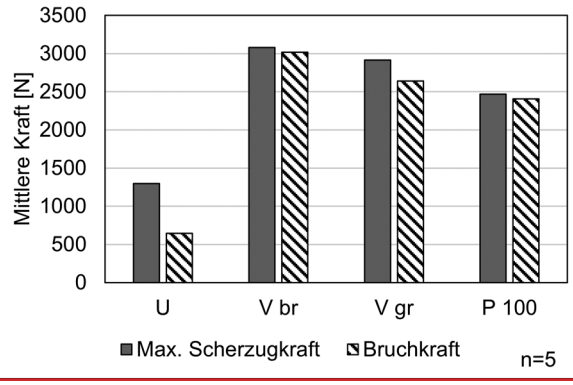


Bild 8: Repräsentative Leistungskurven bei Schweißungen unterschiedlicher Oberflächenrauheit



Parameter	
Energie	1500
Amplitude	100 %
Druck	5 Bar
Geometrie	105 mm x 45 mm x 1 mm

Bild 9: Scherzugversuchsergebnisse Variation Oberflächenrauheit

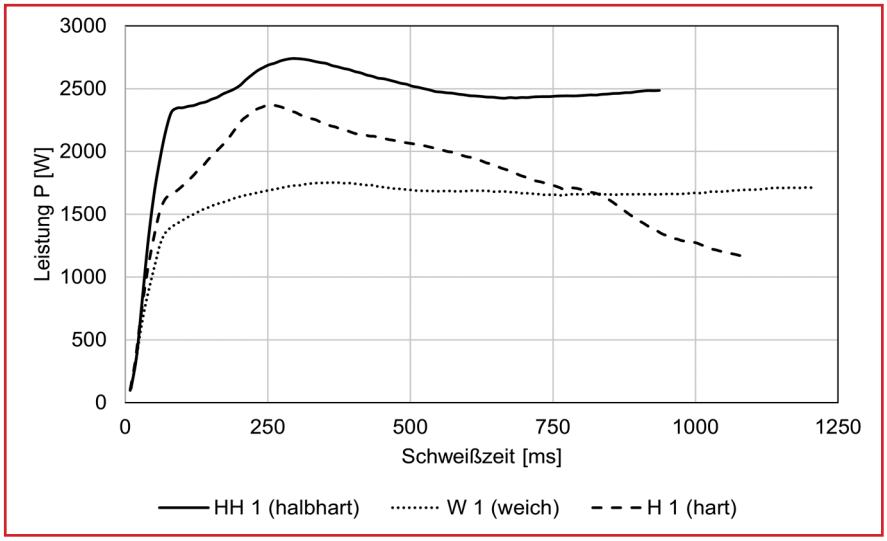
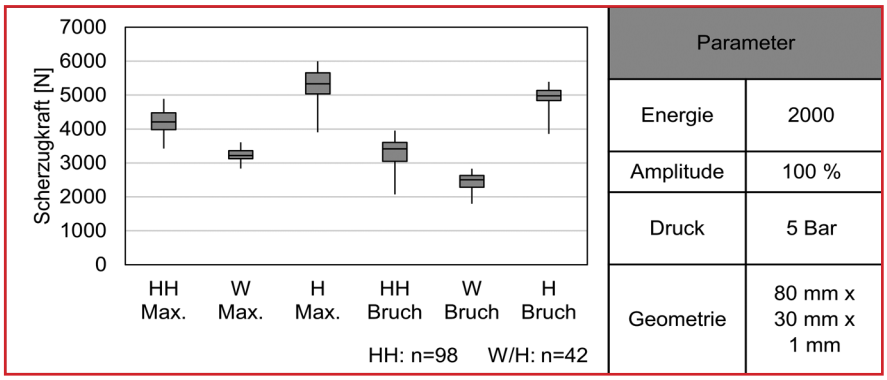


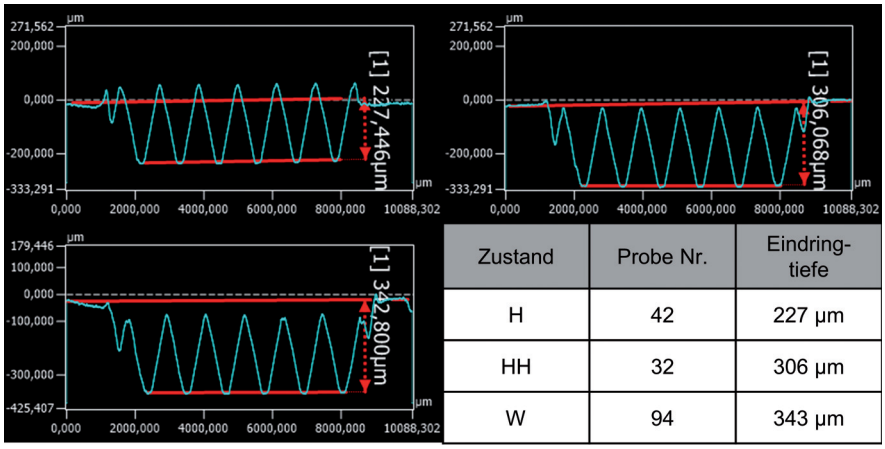
Bild 10: Repräsentative Leistungskurven bei Schweißungen unterschiedlicher Werkstoffhärte



Parameter	
Energie	2000
Amplitude	100 %
Druck	5 Bar
Geometrie	80 mm x 30 mm x 1 mm

Bild 11: Scherzugkräfte Variation Werkstoffhärte

dungsbildung nimmt. Die Änderung des Leistungsverlaufs lässt sich in Bild 8 erkennen. Die größere Rauheit führt zu einer Verlängerung der Reinigungsphase, in der der Schweißprozess nur mit vergleichsweise geringer Leistung stattfindet. Die Steigerung der Verbindungsfestigkeit, dargestellt in Bild 9, legt jedoch nahe, dass die während dieser Prozessphase aufgewandte Energie hauptsächlich in der relevanten Zone, dem Kontaktbereich der beiden Bleche, umgesetzt wird. Damit kommt es trotz zunehmender Schweißdauer und der einhergehenden Wärmedissipation in das umliegende Material zu einer Verbesserung der Verbindungseigenschaften. Mit zunehmender Rauheit verschlechtern sich die Verbindungseigenschaften wieder. Eine Analyse der Bruchflächen zeigt hier die Zunahme an Kontaktstellen außerhalb der Sonotrodenfläche, was zu einem schlechter definierten Schweißprozess führt.



Zustand	Probe Nr.	Eindring-tiefe
H	42	227 µm
HH	32	306 µm
W	94	343 µm

Bild 11: Messung der Eindringtiefe anhand optischer Messdaten

Einfluss der Grundwerkstofffestigkeit

Bei Verwendung von kaltverfestigenden Werkstoffen wie Kupfer spielen Wärmebehandlung und Umformvorgänge im Produktionsprozess eine wichtige Rolle. Bei den in der Elektroindustrie mit dem Ultraschallschweißen verarbeiteten Bauteilen handelt es sich oft um gestanzte Bleche, denen im oder nach dem Stanzprozess eine Verformung aufgeprägt wird. Auf den Ultraschallprozess wirken sich die Härte, die Dehngrenze und im weiteren Sinne auch der E-Modul aus. (3) Änderungen dieser mechanischen Eigenschaften, wie sie sich im Rahmen der Vorverarbeitung ergeben können, beeinflussen dementsprechend auch den Schweißprozess.

Der in Bild 11 bezeichnete Parametersatz ist für den Werkstoffzustand HH optimiert. Als Störgröße wird die Grundwerkstofffestigkeit angepasst. Die drei Werkstoffzustände zeigen eine unterschiedliche Oberflächenstruktur. Die Unterschiede sind Bild 7 zu entnehmen und können, basierend auf den vorherigen Untersuchungen, als wenig signifikant eingestuft werden. Diese Annahme wird durch die im Prozessbeginn ähnlich verlaufenden Schweißenergieaufnahmen in Bild 10 gestützt.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass sich eine Änderung der Werkstoffhärte erheblich auf das Ergebnis des Schweißprozesses auswirkt. Die sich einstellenden Schweißenergieverläufe unterscheiden sich in Höhe und Konstanz der umgesetzten Leistung. Auf Basis einer Analyse der Schweißzeit lässt sich nicht zuordnen, ob der Referenzwerkstoff gegen weicheres oder härteres Material ausgetauscht wurde. Die Eindringwege der Sonotrode in das obere Werkstück unterscheiden sich jedoch stark, exemplarisch in Bild 12 dargestellt. Die Eindringwege wurden aus Messdaten des Laserkonfokalmikroskops bestimmt.

Fazit

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die Oberflächeneigenschaften und die Grundwerkstoffhärte einen deutlichen Einfluss auf den Schweißprozess nehmen. Diese Änderungen müssen sich jedoch nicht zwangsläufig negativ auf die Verbin-

dungsfestigkeit auswirken. Die bezüglich der Oberflächenrauheit erzielten Ergebnisse legen nahe, dass eine Strukturierung der Bleche, beispielsweise im Walzvorgang, die Verbindungsgüte bestimmter Bauteilgeometrien entscheidend verbessern kann. Im Laborversuch lassen sich die eingestellten Störgrößen anhand von Leistungskurve, Schweißzeit und der Eindringtiefe von den Referenzverläufen unterscheiden. Es ist davon auszugehen, dass sich unter realen Bedingungen weniger ausgeprägte Störungen ergeben, was die manuelle Identifikation der vorhandenen Störgrößen nicht mehr möglich macht. Auf eine Überprüfung der Blechcharge mit Härtemessungen bzw. Zugversuchen und der Bestimmung der Oberflächeneigenschaften zur Prädiktion der zur erwartenden Festigkeiten kann anhand empirischer Untersuchungen nicht verzichtet werden.

Danksagung

Das IGF Vorhaben 20.161 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren E.V. DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf wird über die AiF im Rahmen des Programms zu Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

[1] Greitmann, M. J. Entwicklung eines Qualitätssicherungs(QS)-Systems für das Ultraschallschweißen auf Basis Neuronaler Netze unter Nutzung der von der Maschine zur Verfügung gestellten Messwerte - Schlussbericht zu AiF-Vorhaben AiFNr. 12.937N, DVS-Nr. 5.022. Stuttgart : Institut für Materialprüfung, Werkstoffekunde und Festigkeitslehre Universität Stuttgart, 2004.
[2] Lee, S. Process and Quality Characterization for Ultrasonic Welding of Lithium-Ion Batteries. Dissertation. Michigan : University of Michigan, 2013.
[3] Wodara, J. und Adam, T. Ultraschallfügen und -trennen. Grundlagen der Fügetechnik. Fachbuchreihe Schweißtechnik. Düsseldorf : Verlag für Schweßen und verwandte Verfahren, 2004. Bd. 151/1.
[4] Zhang, Y. an analysis of welding process monitoring and control. Real-Time Weld Process and Monitoring. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2008.
[5] Ultraschallschweißen in der Automobilproduktion. Fey, M., et al. 11 suppl., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018, Bd. 23. ISSN 2195-1462.
[6] Deutsches Kupferinstitut, Auskunfts- und Beratungsstelle für die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen. Kupfer/Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung (DKI-Informationsdruck i.004). Düsseldorf : s.n., 1997.
[7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 25175-2:2012: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit - Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächenkenngrößen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

(1) Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen University