

Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Analyse der Betriebsfestigkeit von Hartlötverbindungen

Wolfgang TILLMANN *, Norman SIEVERS *, Matthias MANKA *,
Lukas WOJARSKI *, Reiner ZIELKE *

* TU Dortmund Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, Dortmund

Kurzfassung. Das Löten ist eine geeignete Alternative zum Schweißen, um an komplexen und schwer zugänglichen Stellen stoffschlüssige Fügeverbindungen herzustellen. So tritt mit fortschreitender Entwicklung und steigenden Festigkeitsanforderungen das Löten zunehmend auch in den Interessenfokus der Automobil-, Luftfahrt- und Energiebranche. Doch gerade bei der Auslegung von sicherheitsrelevanten Bauteilen, wie beispielsweise bei der Benzineinspritzung im Motorraum, mangelt es im Vergleich zur Schweißtechnik an robusten Werkzeugen zur Auslegung von Löt Nähten. Aus diesem Grund soll im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens „2besafe“ die Betriebsfestigkeit von Hartlötverbindungen analysiert werden, um den Konstrukteuren sinnvolle Auslegungsrichtlinien und wertvolle Daten zur Erstellung von FEM-Simulationen zu liefern. Hierbei nehmen die eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren ein entscheidendes Bindeglied zwischen der Herstellung und den Belastungsuntersuchungen ein. Durch eine geeignete Qualitätssicherung und Dokumentation der Fügeverbindungen trägt dies zur genauen Identifizierung der Schädigungsmechanismen bei und liefert somit wertvolle Informationen zur Erstellung der Auslegungsrichtlinien. Als Verfahren werden daher die Ultraschallprüfung zur flächenhaften Bestimmung der Löt nahtqualität und die Lasertriangulation zur exakten Beschreibung des Bauteilversatzes verwendet.

Einführung

Das Bestreben nach einer größtmöglichen Bauteilsicherheit bei gleichzeitig geringen Fertigungskosten dominiert die Entscheidungsfindung bei der Wahl des zu verwendenden Fügeverfahrens. Hochfeste Lötverbindungen ermöglichen dabei oftmals vollkommen neue Handlungsalternativen, da sie die positiven Eigenschaften verschiedener Werkstoffe miteinander vereinigen. Hinsichtlich ihrer Auslegung bedarf es allerdings zunehmend an Kennwerten, die insbesondere die Lebensdauer gelöteter Bauteile bei dynamischer Belastung angeben und die verwendeten, insbesondere sicherheitsrelevanten Bauteile, für ihren Einsatz qualifizieren [1]. So besteht beispielsweise bei der Herstellung von Common-Rails für die Benzindirekteinspritzung der Bedarf, die gelöteten Stahlverbunde mit verwendeten Kupferlot in Bezug auf Ihre Lebensdauer in ihrem Belastungskollektiv zu untersuchen, um somit deren Sicherheit gewährleisten zu können. Eine weitere Anwendung ist das Löten von verschleißbeständigen Hartmetallplättchen aus Wolframcarbid/Kobalt, die auf Stammblätter von Kreissägen mit einem Lotwerkstoff auf Silberbasis gelötet



werden [2]. Diese pro Kreissäge eingesetzten zahlreichen Fügeverbindungen müssen den intensiven dynamischen Beanspruchungen des Schnittprozesses standhalten. Diese Fragestellung nach der dynamischen Belastbarkeit von Lötverbindungen lässt sich somit auf zahlreiche löstechnische Anwendungen übertragen und ist somit Gegenstand des Gemeinschaftsvorhabens „2BeSafe“. Hierzu werden am Institut für Oberflächentechnik der RWTH Aachen Probekörper löstechnisch hergestellt, am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der TU Dortmund zerstörungsfrei und am Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt zerstörend untersucht.

So befasst sich dieser Beitrag mit der Auslegung und Entwicklung von zerstörungsfreien Verfahren zur Prüfung und Charakterisierung der gelöteten Bauteile. Hierzu findet neben der Ultraschallprüfung in Tauchtechnik auch die innovative Nutzung eines Lasertriangulationssensors in Kombination mit einem Hexapoden statt, um die Qualität der gelöteten Fügezone und den Winkelversatz der gelöteten Bauteile präzise zu bestimmen.

Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung erlaubt eine volumetrische Analyse von Bauteilen. So können Fügeverbindungen wie Schweiß- oder Lötnahte zerstörungsfrei inspiziert werden. Während bei der Schweißnahtprüfung dieses Verfahren in zahlreichen Applikationen gerade bei sicherheitsrelevanten Bauteilen bereits seit Jahrzehnten etabliert ist, werden gelötete Fügeverbunde mit diesem Verfahren nur in seltensten Fällen geprüft. Gründe hierfür liegen an der oftmals schweren Zugänglichkeit der Lötnaht, aber auch an den hohen Prüfkosten bei einer ganzheitlichen Prüfung. Dennoch ermöglicht dieses akustische Verfahren bei der Lötnahtprüfung im Lötgut befindliche Sprödphasen zu detektieren [3], die einen erheblichen Einfluss auf die Betriebsfestigkeit besitzen [4].

Ein Aspekt, der eine sichere und präzise Prüfung von Lötnahten erschwert, sind die auftretenden Reflektionen am Lötspalt. Diese können je nach Wellenform und Frequenz, wie auch den akustischen Eigenschaften der Grenzfläche, zu einer Überlagerung oder Auslöschung der Ultraschallwellen führen und stören somit das Prüfsignal. So lässt sich der Reflektionsfaktor R_{Spalt} am Lötspalt nach Gleichung 1 bestimmen [5], wobei λ für die Wellenlänge und d die Breite des Spaltes steht. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Formel für Dauerschall gilt, jedoch auch in guter Näherung für Schallimpulse angewendet werden kann.

$$R_{Spalt} = \sqrt{\frac{\frac{1}{4}\left(m-\frac{1}{m}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}{1+\frac{1}{4}\left(m-\frac{1}{m}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Faktor m steht für das Verhältnis der Schallimpedanzen z an der Grenzfläche vom Substrat (1) zum Lötgut (2) und ist das Produkt aus der Schallgeschwindigkeit c und der Dichte des Werkstoffes ρ .

$$m = \frac{z_1}{z_2} = \frac{c_1 \cdot \rho_1}{c_2 \cdot \rho_2} \quad \text{Gleichung 2}$$

In Tabelle 1 sind die akustischen Eigenschaften für zwei ausgewählte und für die Löttechnologie industriell bedeutsame Werkstoffkombinationen aufgeführt. Im ersten Fall handelt es sich um den korrosionsbeständigen Edelstahl 1.4301, der mit Hilfe des Kupferlotes Cu 110 gefügt worden ist. Im industriellen Gebrauch wird diese Fügeverbindung beispielsweise bei Benzineinspritzverteilern verwendet und häufig im

Durchlauföfen in Schutzgasatmosphäre gelötet. Hierbei kann unter anderem das Ausgasen des Binders bei pastöser Applikation des Lotwerkstoffes oder ein unzureichender kapillarer Fülldruck zu Benetzungsfehlern und Poren im Lötgut führen, die die Betriebsfestigkeit und Dichtheit der Bauteile gefährden. Bei der zweiten Variante handelt es sich um das verschleißbeständige Hartmetall K10, das im industriellen Rahmen mit Silberbasislötmetallen induktiv auf die Stammlätter von Kreissägen gelötet wird. Da dieser Prozess an Luft ohne Verwendung eines Schutzgases stattfindet, muss üblicherweise auf die Verwendung von Flussmitteln zurückgegriffen werden. Das Flussmittel beseitigt vorhandene Oxide, schützt die zu fügenden Oberflächen und senkt die Oberflächenspannung für eine gute Benetzung des flüssigen Lotes. Rückstände des Flussmittels im erstarrten Lot führen zwangsläufig zu Poren im Lötgut, aber auch der induktive Lötprozess ist äußerst sensibel bezüglich der Handhabungsparameter, so dass kritische Benetzungsfehler auftreten können.

Tabelle 1. Akustische Eigenschaften von anwendungsrelevanten Werkstoffen in der Löttechnologie

Werkstoff	Schallgeschwindigkeit [km/s]	Dichte [g/cm ³]
Stahl (1.4301)	5,9	7,9
Kupferlot (Cu 110)	4,7	8,9
Hartmetall (K10)	6,7	15,0
Silberlot (Ag 449)	3,6	8,9

Die Lage, Häufigkeit und Form der Poren hat einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit des Fügeverbundes. Aus diesem Grund ist die Absicherung der Lötprozesse durch die Detektion von Benetzungsfehlern zur Bewertung der Betriebsfestigkeit zwingend erforderlich, da sie im Belastungsfall den Spannungszustand im Lötgut kritisch beeinflussen.

Da im industriellen Umfeld der Lötspalt allerdings selten exakt eingestellt werden kann, sondern je nach Prozessbedingungen einer gewissen Schwankung unterliegt, wird hierdurch die präzise Detektion von Inhomogenitäten im Lötgut erschwert. In den Diagrammen von Abbildung 1 sind die berechneten Reflexionsgrade im anwendungsrelevanten Intervall des Lötspaltes für die zwei bereits beschriebenen Anwendungsfälle aufgetragen. Bei den Stahllötungen wird ein schmaler Lötspalt zwischen 0,05 und 0,15 mm für einen ausreichend hohen kapillaren Fülldruck gewählt. Damit der duktile Lotwerkstoff die während des Lötens auftretenden Eigenspannungen in Folge der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und Hartmetall kompensieren kann, wird beim Löten von Hartmetall üblicherweise der Lötspalt deutlich vergrößert und kann unter kritischen Bedingungen bis zu 0,5 mm betragen.

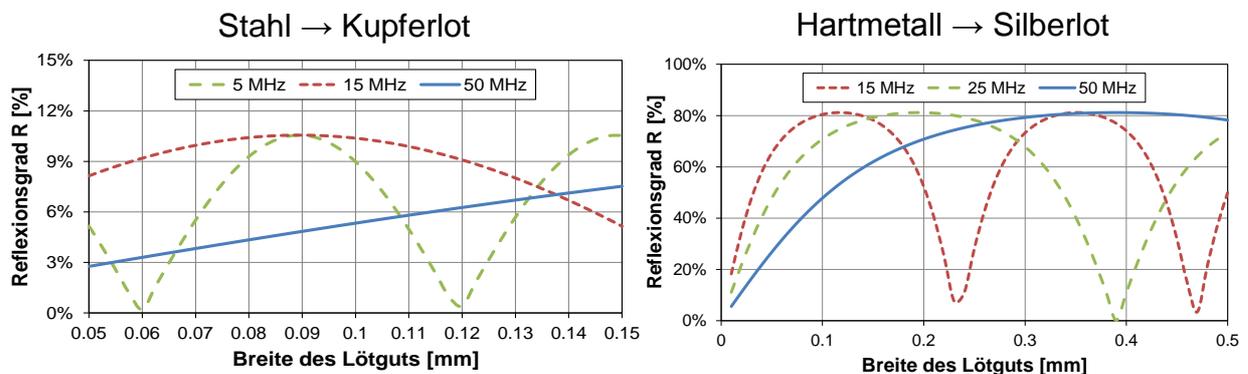


Abb. 1. Variation der Reflexionsgrade bei verschiedenen Spaltbreiten des Lötgutes

Da die akustischen Eigenschaften des Stahls und des Kupferlotes ähnlich sind, steigt der Reflexionsgrad bei den hier gewählten Prüffrequenzen nicht über 12 % an. Während an der Grenzfläche von Hartmetall zum Silberlot hin der Reflexionsgrad auf 80 % ansteigt. Doch belegt die Auswertung der Reflexionsgrade, dass je nach Prüffrequenz am Lötspalt bereits Abweichungen von wenigen μm einen erheblichen Einfluss auf die Reflexion besitzen. Hinzu kommt, dass je nach gewählter Prüffrequenz und vorhandenem Lötspalt der Reflexionsgrad sogar bis auf 0 % abfallen kann, so dass die Lötnaht und somit Poren durch die Ultraschallprüfung nicht zu identifizieren sind.

Bei der Auswahl der geeigneten Prüffrequenz muss somit nicht nur die Größe der zu detektierenden Fehler berücksichtigt werden, sondern bereits im Vorfeld eine Abschätzung stattfinden, in welchem Intervall die Lötnahtbreite vorliegt. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs sind in Abbildung 2 zwei verschiedene Hartmetalllötungen im C-Scan der Ultraschallprüfung gegenübergestellt, die einen unterschiedlichen Lötspalt besitzen. Die weiterführenden Untersuchungen ergaben, dass die Probe A einen konstanten Lötspalt von $180\ \mu\text{m}$ und die Probe B von $100\ \mu\text{m}$ besitzt. Die Proben wurden jeweils mit 2 Prüffrequenzen von 15 und 50 MHz untersucht. Mit Hilfe von Lötstop wurde während der Lötung verhindert, dass ein Teil der Lötnaht mit dem Lotwerkstoff benetzt, so dass in jeder Probe ein Referenzreflektor für die Analyse vorhanden ist. Der Vergleich der Lötungen belegt, den signifikanten Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz und dem Lötspalt auf die Amplitude der Ultraschallreflexion. Während bei Probe A die Variation der Amplituden für die verschiedenen Prüffrequenzen vernachlässigbar ist, reflektiert bei Probe B der Reflektor bei 15 MHz deutlich stärker als bei 50 MHz. Resümierend hat somit eine Lötspalt Variation von $80\ \mu\text{m}$ einen erheblichen Einfluss auf das Prüfergebn. Für die Beurteilung der Prüfbefunde bedeutet dies, dass nicht die Amplitude als primäre Grundlage zur Beurteilung herangezogen werden darf. Zur Feststellung von Porositäten, insbesondere bei Lötflächen deren Spaltmaße nach der Herstellung nicht exakt bekannt sind, müssen mit Hilfe von bildgebenden C-Scans beurteilt werden. Hier können die Falschfarbenbilder zur Identifizierung von Poren genutzt werden. Dies erschwert natürlich auch einen effizienten Einsatz von Handgeräten zur Ultraschallprüfung von Lötflächen.

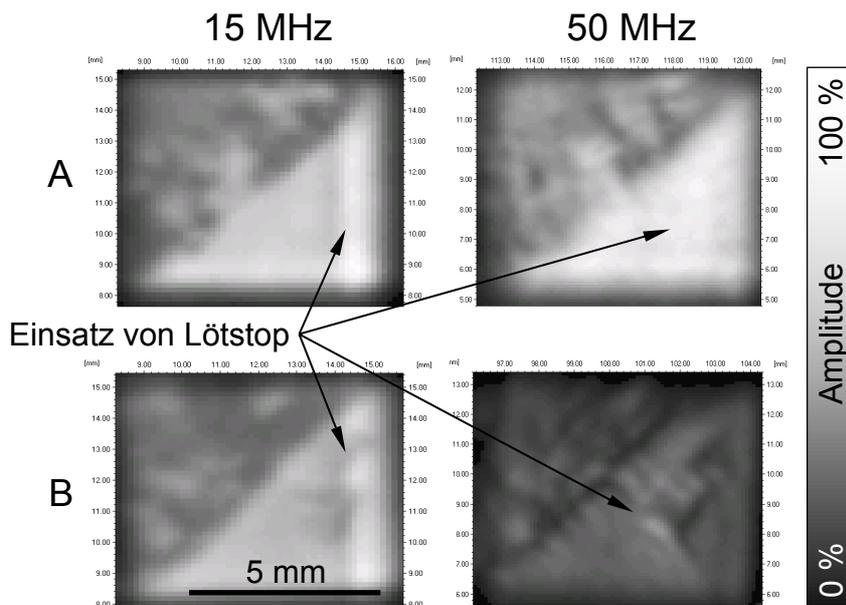


Abb. 2. Gegenüberstellung der Prüfbefunde zweier gelöteter Hartmetallverbunde bei unterschiedlichen Prüffrequenzen.

Geometrische Vermessung

Für die Entwicklung von sicheren Auslegungswerkzeugen bezüglich der Betriebsfestigkeit von Löt Nähten müssen Lebensdaueruntersuchungen an gelöteten Bauteilen vorgenommen werden. Durch die Fertigung und insbesondere auch bei der Verbundherstellung der benötigten Bauteile können infolge der prozessbedingten Fertigungscharakteristika, wie Einhaltung der Spaltmaße, Prozesstemperaturen oder auch der gewählten Oberflächenreinigung, Abweichungen von der idealen Bauteilgeometrie entstehen. Diese Abweichungen führen bei den Dauerbelastungen zu einem inhomogenen Spannungszustand und somit zu einer variierenden Dauerfestigkeit. Um diese Streuung bei der späteren Untersuchung der Dauerfestigkeit ein- und abgrenzen zu können, muss der geometrische Versatz an den gelöteten Bauteilen bestimmt werden.

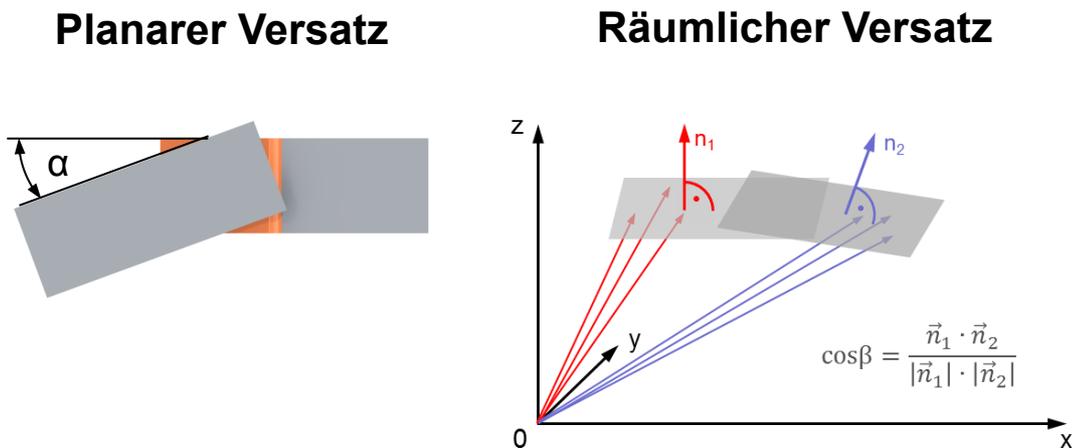


Abb. 3. Mögliche Versatzarten beim Lötten.

Die beiden möglichen Versatzarten, bezeichnet als der planare- und räumliche Versatz, sind in Abbildung 3 in den Skizzen dargestellt. Der für die Untersuchung entscheidende Versatz lässt sich mit Hilfe zweier Winkel bestimmen. Hier steht auf der linken Seite der planare Winkelversatz in der Bauteilebene, wie er durch die fertigungsbedingten Toleranzen der Lötlehre auftreten kann. Auf der rechten Seite ist der Raumwinkel zwischen den beiden zusammengelöteten Bauteilhälften dargestellt, der infolge einer inhomogenen Lötspaltbreite entstehen kann.

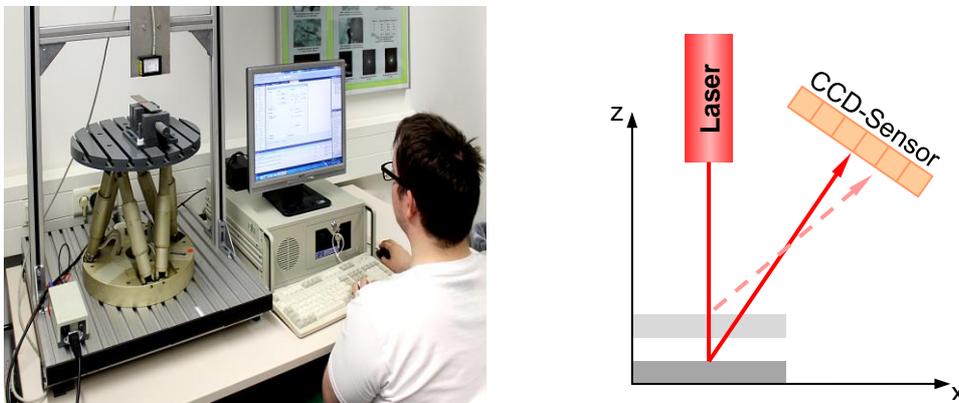


Abb. 4. Links: Messstand zur geometrischen Vermessung von gelöteten Bauteilen. Rechts: Skizze zur Funktionsweise der Lasertriangulation

Da bereits geringste Abweichungen einen signifikanten Einfluss auf die Betriebsfestigkeit haben, muss der Versatz der Bauteile sehr präzise gemessen werden, um eine Rückkopplung zur Fertigung als auch eine abschließende Bewertung der Lebensdaueruntersuchungen durchführen zu können. Hierzu wurde ein System zur Vermessung der Löt Nähte entwickelt, das mit Hilfe der Lasertriangulation und einem Hexapoden zur Bewegung der Bauteile funktioniert. Das Messverfahren ist in Abbildung 4 dargestellt. Die gelötete Probe wird auf dem Hexapoden in eine Halterung eingespannt und automatisch bewegt, während der darüber befindliche Sensor den Abstand zur Bauteiloberfläche misst. Die Lasertriangulation ermöglicht eine berührungslose Abstandsmessung mit einer Genauigkeit von $1,2 \mu\text{m}$. Hierbei trifft der Laserstrahl auf die Bauteiloberfläche, wird je nach vorliegendem Abstand in einem anderen Winkel reflektiert und von einem CCD-Sensor erfasst. Über die trigonometrischen Funktionen kann somit der Abstand gemessen werden. Der Hexapode kann mit einer Genauigkeit von $1 \mu\text{m}$ bewegt werden, so dass durch diese Werkzeuge eine präzise Messung möglich ist. Der räumliche Versatz lässt sich mit Hilfe der normalen Vektoren n_1 und n_2 beschreiben, die Senkrecht auf den beiden Blechen stehen, siehe Abbildung 3 rechts. Durch eine Abtastung der beiden zusammengelöteten Bleche werden die Ebenen und Kanten bestimmt und mit Hilfe der trigonometrischen Funktionen die Versatzwinkel berechnet. Der Sensor erlaubt eine Abtastung von 5 kHz , so dass die systembedingten Schwingungen durch die Probenmanipulation mit Hilfe einer Mittelung aus der Berechnung entfernt werden.

Erste Probelötungen konnten mit diesem System erfolgreich und reproduzierbar vermessen werden, wobei eine Messtoleranz von $1,4 \%$ bei einem räumlichen Versatzwinkel von $0,41^\circ$ erzielt wurde. Somit steht nun ein Messsystem zur Verfügung, das automatisiert die fertigungsbedingten Versatzwinkel zerstörungsfrei vor einer Betriebsfestigkeitsprüfung bestimmen kann. Mit diesem System können nun große Bauteilmargen vor der Festigkeitsprüfung charakterisiert werden, die einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer kennlinien haben.

Zusammenfassung und Ausblick

Derzeit mangelt es an zuverlässigen Werkzeugen zur sicheren und robusten Auslegung von gelöteten Fügeverbindungen, wie sie industriell auf vielfältige Weise eingesetzt werden. Besonders in sicherheitsrelevanten Bereichen wie beispielsweise der Common-Rail-Einspritzung, die im Motorraum von Kraftfahrzeugen den Kraftstoff unter hohem Druck zur Brennkammer führen. Da die Dichtheit dieser Leitungen über den Lebenszyklus ein kritischer Qualitätsfaktor ist, müssen derzeit überproportionale Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung angenommen werden. Bezüglich der Kosten- und Energieeffizienz sind daher Berechnungs- und Auslegungstools, wie sie bereits für die Schweißtechnik existieren, unabdingbar.

In diesem Zuge ist auch eine Qualitätsprüfung sowohl bei der Entwicklung dieser Werkzeuge als auch für eine spätere Prüfung von kritischen Fügekomponenten notwendig. Hierzu wurde in diesem Beitrag die Ultraschallprüfung für die Analyse von zwei verschiedenen Werkstoffsystemen untersucht. Es konnte theoretisch als auch in praktischen Messungen nachgewiesen werden, dass der Lötspalt in Abhängigkeit zur Prüffrequenz einen signifikanten Einfluss auf die Amplitude des reflektierten Ultraschallimpulses besitzt. Dies erfordert gerade bei Bauteilen mit variierenden Lötspalten eine intensivere Analyse, so dass eine Handprüfung nur eingeschränkt nutzbar ist. Für die Prüfung und Analyse dieser Löt Nähte ist daher eine Interpretation der C-Scans erforderlich, um die Strukturen des Lötguts mit Hilfe der Amplitudenverteilungen zu bewerten. Ferner wäre aber auch eine

Messung des Lötspaltes durch eine Mehrfrequenz-Prüfung denkbar, wozu aber weiterführende Untersuchungen notwendig sind. Dies könnte allerdings im Bereich der zerstörungsfreien Lötnahtprüfung ein entscheidender Entwicklungsschritt sein, da die Einhaltung der exakten Spaltbreiten ein signifikantes Kriterium für hochfeste Fügeverbunde darstellt.

Weiterhin wurde in diesem Beitrag ein selbstentwickeltes Messsystem vorgestellt, das mit Hilfe der Lasertriangulation und einem Hexapoden den geometrischen Versatz von gelöteten Bauteilen bestimmen kann.

Danksagung

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AIF für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungsvorhabens 2BeSafe (IGF: 17766 N/3).

Referenzen

- [1] B. Wielage, F. Hartung, M. Türpe.: Festigkeitseigenschaften und Dauerschwingfestigkeit sprödphasenfreier Hochtemperaturlötverbindungen bei Raumtemperatur. Schweißen und Schneiden 44, 10, S. 545-549, 1992
- [2] M. Magin and S. Rassbach, "Stress Analysis on Brazed Hardmetal Saw Teeth," Proceedings 17th Plansee-Seminar, 2009
- [3] W. Tillmann, N. Sievers, M. Manka, R. Zielke, L. Wojarski: Detektion von Sprödphasen in gelöteten 1.4301 / Ni 620-Verbunden mittels Ultraschallprüfung; 15. Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz, Tagungsband, ISBN: 978-3-00-039358-7, 2012
- [4] I. Hoyer: Beitrag zur Entwicklung von Hochtemperaturlöten auf Eisenbasis, Dissertation, Chemnitz, 2005
- [5] J. Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Verlag, 1980