

Sensorische Überwachung eines Ultraschallschweißprozesses

Phi-Long CHUNG¹, Timo REINDL¹, Johannes RITTMANN¹, Marc KREUTZBRUCK¹
¹ Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart

Kontakt E-Mail: phi-long.chung@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Das Ultraschallschweißen ist ein anerkanntes und weit verbreitetes Fügeverfahren, um Einzelkomponenten dauerhaft miteinander zu verbinden. Besondere Merkmale sind eine ausschließlich lokale Erwärmung der Fügepartner, geringe Schweißzeiten sowie eine hohe Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Die Schweißnahtqualität hängt dabei von vielzähligen Faktoren ab. Ausgehend von den Prozessparametern, den Toleranzen der Fügeteile bis hin zu Theorien über ein chaotisches Werkstoffmodell im Grenzbereich des Ultraschallschweißens wird der Prozess gewollt und ungewollt beeinflusst. Dies kann zu schwankenden Prozessqualitäten führen. Die Bewertung der Schweißnahtqualität erfolgt bisher durch eine zerstörende Prüfung der Schweißnaht. Die sensorische Überwachung des Ultraschallschweißprozesses ermöglicht es, schon während des Prozesses Aussagen über die Schweißnahtqualität treffen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wird die sensorische Überwachung der im Prozess auftretenden mechanischen Schwingungseffekte mithilfe von Piezoschwingern aufgezeigt. Neben der Schallenergiedichte sowie dem im Prozess auftretenden nichtlinearen Schwingungsverhalten wird anhand von nachgelagerten Zugversuchen die Schweißnahtqualität untersucht. Dabei weist sowohl die Höhe der Schallenergiedichte als auch insbesondere der Verlauf des Nichtlinearitätsfaktors über die Prozessdauer eine Korrelation mit der resultierenden Schweißnahtqualität auf.

1. Einleitung

Als Sonderverfahren des Schweißens wird unter dem Ultraschallschweißen nach DIN 1910-3 ein Verfahren verstanden, bei dem die Wärmeenergie zum Aufschmelzen des Materials durch innere Reibung und Grenzflächenreibung erzeugt wird [1]. Verglichen mit anderen Serienschweißverfahren liegen die Vorteile dieses Verfahrens in kurzen Schweißzeiten, geringen Investitionskosten und einem geringen Energieverbrauch. Fügeteile können bereits innerhalb weniger Sekunden miteinander verschweißt werden, sodass sich das Ultraschallschweißen besonders für die Massenproduktion von kleinen bis mittelgroßen Bauteilen bei Stückzahlen von bis zu 50 000 eignet [2].

Durch die zahlreichen parallel ablaufenden, komplexen Vorgänge während des Schweißprozesses in der Fügezone, ist das exakte Materialverhalten noch nicht vollständig abbildbar. Dies hat zur Folge, dass für die Schweißnahtfestigkeit wichtigen Prozessparameter



wie die Schweißamplitude, die Schweißzeit und der Schweißdruck nur durch ausführliche Testreihen oder Erfahrungswerte ermittelt werden können. Aktuelle Verfahren nutzen zerstörende Prüfverfahren, um Aussagen über die Schweißnahtqualität zu erhalten. Mithilfe einer sensorischen Überwachung soll bereits während des Schweißprozesses über die Auswertung der Prozessparameter eine Aussage über die Schweißnahtgüte getroffen werden.

2. Ultraschallschweißen

Ultraschallschweißanlagen bestehen aus einem Ultraschallgenerator, einem Konverter, einem Booster, einer Sonotrode und einem Amboss [2], siehe Abb. 1. Innerhalb des Ultraschallgenerators werden elektrische Schwingungen im niedrigen Ultraschallbereich zwischen 20 kHz und 70 kHz erzeugt, die durch den Konverter in mechanische Schwingungen gleicher Frequenz umgewandelt werden. Kommerzielle Konverter verwenden dazu ein keramisches Piezoelement bzw. ein magnetostriktives Element [3]. Der nachgeschaltete Booster leitet die mechanischen Schwingungen auf die Sonotrode und ist in der Lage die Schwingungsamplituden der Schweißanlage zu beeinflussen, welche üblicherweise von 20 µm bis 100 µm reichen. Anschließend werden die mechanischen Schwingungen über die Sonotrode in das zu verschweißende Bauteil eingeleitet. Die zu verschweißenden Bauteile besitzen in der Regel einen Energierichtungsgeber (ERG), um einen definierten Energieeintrag in die Schweißzone zu erhalten. Das Gegenstück zur Sonotrode bildet der Amboss, der zur Positionierung und Aufnahme des zu verschweißenden Bauteils dient.

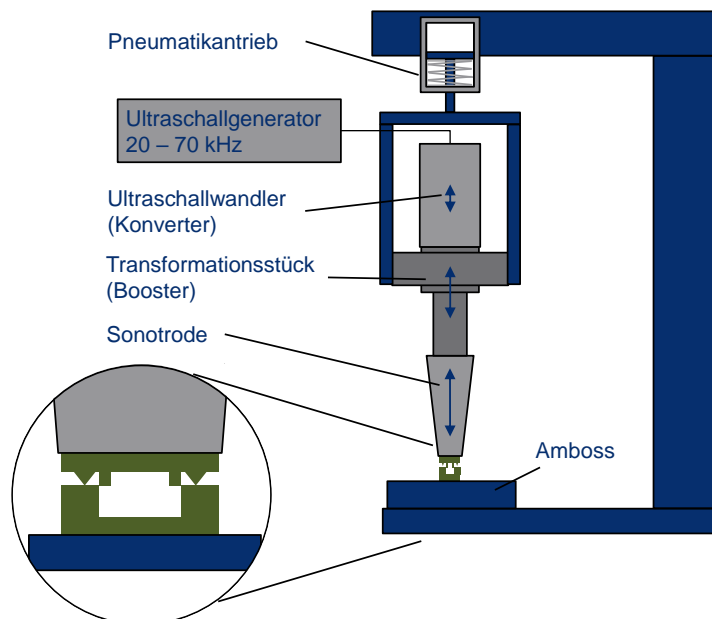


Abb. 1. Schematischer Aufbau einer Ultraschallschweißanlage mit Bauteil inklusive Energierichtungsgeber

2.1 Schweißparameter

Für die Gewährleistung einer hohen Schweißnahtqualität müssen die Prozessparameter beim Ultraschallschweißen auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Wird mittels Computertomographie (CT) die Schweißnaht einer faserverstärkten Probe betrachtet (Abb. 2), führen fehlerhafte Parametereinstellungen beispielsweise zu einer Verringerung

der Nahtdicke oder Lufteinschlüssen innerhalb der Schweißnaht und schlussendlich zu einer Verringerung der Schweißnahtfestigkeit.

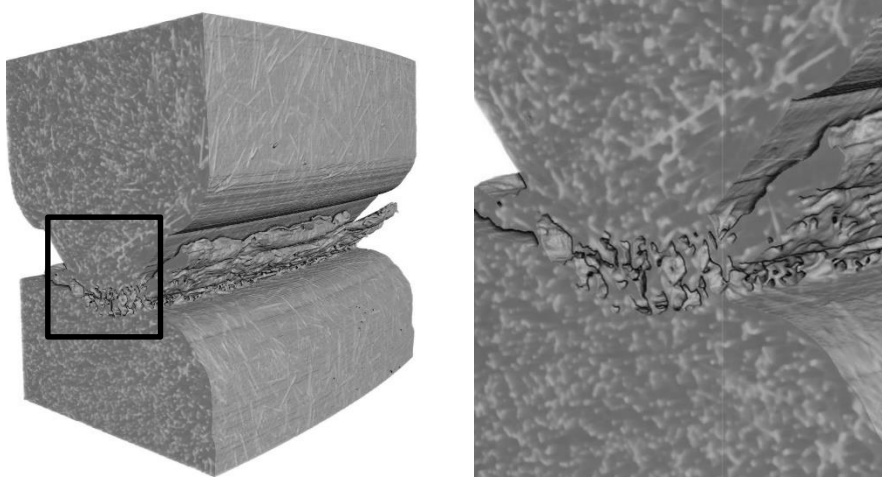


Abb. 2. Schweißnaht eines faserverstärkten Bauteils in der CT-Prüfung

Nachfolgend werden sowohl die Auswirkungen der Amplitude der mechanischen Schwingung sowie die Anpresskraft auf die Schweißnaht näher erläutert.

Die entscheidenden Faktoren beim Festlegen der Amplitude sind Werkstoff, Formgestalt und Geometrie der Fügeebene. Je nachdem, ob die Fügepartner aus amorphen oder teilkristallinen Kunststoffen bestehen, wird die Amplitudenhöhe variiert. Amorphe Kunststoffe benötigen bei einer Arbeitsfrequenz von 20 kHz Amplituden zwischen 15 μm und 35 μm während teilkristalline Kunststoffe bei gleicher Arbeitsfrequenz höhere Amplituden von 25 μm bis 50 μm benötigen [3]. Der Zusammenhang zwischen dem volumenspezifischen Wärmestrom \dot{q} und der Schwingungsamplitude A während des Ultraschallschweißen wird in [4] hergeleitet und in Gleichung 1 dargestellt.

$$\dot{q} = 1/2 \cdot E'' \cdot \epsilon_0^2 \cdot \omega \quad (1)$$

E'' beschreibt den werkstoffabhängigen Verlustmodul während ϵ_0 die Dehnung und ω die Kreisfrequenz darstellt, die vom Schweißprozess abhängig sind. ϵ_0 ist proportional zu den gewählten Amplituden des Prozesses [3]. Dadurch ergibt sich die Beziehung zwischen dem viskoelastischen Wärmestrom \dot{q} und der Amplitude A in Gleichung 2. Die Schallenergiedichte E und die Amplitude stehen über Gleichung 3 in Zusammenhang.

$$\dot{q} \sim A^2 \cdot \omega \quad (2)$$

$$E = A^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho \quad (3)$$

Die Anpresskraft wirkt sich beim Ultraschallschweißen auf die Energieumwandlung aus. Höhere Anpresskräfte führen zu einer gesteigerten Fügegeschwindigkeit und resultieren in kürzeren Schweißzeiten. Zusätzlich wirken sich hohe Anpresskräfte positiv auf die Schweißnahtfestigkeit aus, wobei zu hohe Kräfte zu einer Senkung der Schweißnahtqualität führen. In diesem Fall wird ein großer Teil der Schmelze aus der Fügezone gedrückt und die Nahtdicke verringert. Anpresskraft und Amplitude müssen aufeinander angepasst werden, sodass als Richtwerte kleine Amplituden mit großen Anpresskräften sowie große Amplituden mit geringen Anpresskräften empfohlen werden [3].

Die benötigte Schweißzeit t_s ist im Prozess jeweils von der Amplitude und der Anpresskraft abhängig. Bei zu hohen als auch zu kurzen Schweißzeiten werden geringe Schweißnahtqualitäten erreicht. Da die Bildung einer konstanten Schweißnaht entscheidend für die Qualität der Verbindung ist, werden optimale Schweißzeiten in Testreihen ermittelt.

Die Schweißzeit ist dabei so kurz wie möglich zu halten, um eine Beschädigung des Werkstoffs im Fügebereich zu vermeiden [3].

2.2 Prozessüberwachung

Für die sensorische Überwachung bieten sich eine Vielzahl an Methoden an. Piezosensoren sind dabei eine Möglichkeit, um zusätzliche Messwerte aus dem Schweißprozess zu generieren und die Schwingungen am Amboss zu detektieren. Piezoelemente bestehen aus Piezokristallen oder -keramiken, die bei mechanischer Belastung eine Ladungsverschiebung in ihrem Inneren hervorrufen. Dieser Effekt kann ausgenutzt werden, um die mechanisch auftretenden Schwingungen in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Dadurch können auch höher harmonische Schwingungen im dreistelligen kHz Bereich detektiert werden.

Für die Signalauswertung kann mithilfe der Fast Fourier Transformation (FFT) ein Signal in seine Einzelfrequenzen zerlegt werden. Mit dem generierten Amplituden-Frequenzspektrum kann mithilfe von Gleichung 3 die Schallenergiedichte E am Piezoelement berechnet werden.

Die Amplitude A entspricht dabei der mechanischen Amplitude A_{mech} des Piezoelements und wird mit dem Umsetzungsfaktor α und der elektrischen Amplitude A_{el} nach Gleichung 4 bestimmt.

$$A_{mech} = \alpha \cdot A_{el} \quad (4)$$

Der Umsetzungsfaktor kann beispielsweise mit der Laser-Doppler-Vibrometrie erfasst werden. Dabei wird ein Piezoelement durch einen Frequenzgenerator mit der entsprechenden Frequenz und Spannungsamplitude beaufschlagt und die resultierende Auslenkung vermessen. Mithilfe des linearen Zusammenhangs zwischen mechanischer Auslenkung und der Spannungsamplitude kann der Umsetzungsfaktor α bestimmt werden. Damit die gesamte Schallenergie berücksichtigt wird, müssen neben der Grundfrequenz auch die höher harmonischen Schwingungen über Gleichung 5 berücksichtigt werden. Dabei bezeichnet A_i die Amplitude der Schwingung, ρ die Dichte des Piezoelementes sowie der Index i die Nummer der höher Harmonischen.

$$E_{ges} = \sum_0^i (A_i \cdot \alpha_i)^2 \cdot \omega_i^2 \cdot \rho \quad (5)$$

2.3 Nichtlineare Schwingungseffekte

In der klassischen Ultraschalltechnik wird davon ausgegangen, dass ein sinusförmiges Eingangssignal zu einem Ausgangssignal gleicher Frequenz führt. Hier werden nur die Änderungen in Amplitude und Phase betrachtet. Die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Anregung und Antwortverhalten ist für reale Systeme allerdings nur eine Näherung [6]. Das reale nichtlineare Verhalten führt unter anderem zur Ausbildung von höher harmonischen Schwingungen. Diese Schwingungen haben Frequenzen, die ganzzahlige Vielfache der Anregungsfrequenz sind. Weitere nichtlineare Effekte sind die Intermodulation und die Ausbildung von Subharmonischen [6]. Der Grund für das Auftreten und Verschwinden dieser Frequenzänderungen liegt in der nichtlinearen Dynamik der Festkörper und, je nach betrachtetem Prozess, auch in dem viskoelastischen Materialverhalten der Schmelze. Die nichtlinearen Effekte reichen dabei von der zwischenatomaren Ebene bei komplett homogenen Material bis zur Meso- und Makroebene bei Defekten und Inhomogenitäten [7–9]. Risse, Defekte und Poren, aber auch bereits Gitterdefekte (Leerstellen und Versetzungen) und Mikrostrukturen (Gleitbänder, Körner und Ausscheidungen) führen zu einer verstärkten Ausbildung von Nichtlinearität, weshalb das

Verfahren in vielen Fällen sehr viel sensitiver ist, als klassische Ultraschallanalysen [10]. Dieser Vorteil gegenüber herkömmlichen Analyseansätzen konnte im Bereich der Fehlerdetektierung bereits in vielen Anwendungsfällen gezeigt werden [6, 7, 11–17]. Als quantitativer Wert für die Bestimmung der Nichtlinearität kann das Nichtlinearitätsverhältnis gebildet werden. Das Nichtlinearitätsverhältnis N_i lässt sich nach Gleichung 6 bestimmen:

$$N_i = \sum_n \frac{v_n^2}{v_0^2} \quad (6)$$

Hierbei ist v_0 die Vibrationsgeschwindigkeit bei der Grundfrequenz und v_i die Vibrationsgeschwindigkeit bei den jeweiligen höher harmonischen Schwingungen. Die Vibrationsgeschwindigkeit v lässt sich hierbei berechnen nach Gleichung 7:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot A_{mech} \quad (7)$$

Die Sensitivität des nichtlinearen Ultraschalls auf Unterschiede sowohl in der Makro- als auch in der Mikrostruktur machen das Verfahren für die Untersuchung von Schweißverbindungen interessant, um im laufenden Schweißprozess die Unregelmäßigkeiten aufzudecken, die zu einer erheblichen Reduzierung der Schweißnahtqualität führen können. Dabei ist die Untersuchung im Ultraschallschweißprozess besonders naheliegend, da die Ultraschallanregung verfahrensbedingt bereits elementarer Teil des Prozesses ist. Im Fügespalt des Ultraschallschweißprozesses können dabei insbesondere die folgenden Mechanismen zum Tragen kommen:

- Die akustische Kontakt-Nichtlinearität (engl. CAN, [18]), ein Clapping / Reiben von schwach gebundenen Elementen der Kontaktflächen.
- Die Hertzsche Nichtlinearität (HN, [19]), eine Veränderung der Kontaktspannung durch Vergrößerung der Fläche der vorbelasteten Kontaktelemente von rauen Kontaktflächen.
- Die Nichtlinearität in der viskoelastischen Schmelze, ähnlich einer dämpfenden, hochabsorbierenden viskosen Flüssigkeit [20].

3. Versuchsaufbau

In den nachfolgenden Versuchen wurde die Schweißanlage HIQ 4800 der Firma Hermann Ultraschall verwendet. Diese Schweißanlage verfügt über eine Arbeitsfrequenz von 20 kHz bis 35 kHz und wurde in den Versuchsreihen bei 20 kHz betrieben. Die verwendeten Prüfkörper entsprechen den Vorgaben des deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS) und wurden aus Polyamid 6 (PA6) spritzgegossen (Abb. 3).

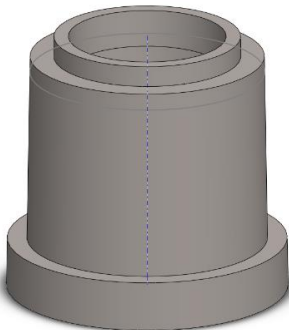


Abb. 3. Unterteil des eingesetzten Schweißprüfkörpers

Für die Überwachung des Abschmelzens vom ERG werden das Schwingungsverhalten des Ambosses im Ultraschallschweißprozess untersucht. Dazu werden zwei Piezoschwinger mithilfe einer dünnen Wachsschicht auf dem Amboss fixiert. Mithilfe der Piezoschwinger

werden die Schwingungen, die von der Sonotrode auf den Amboss treffen und in die Fügeebene reflektiert werden aufgezeichnet.

Aus empirischen Vorversuchen wird eine Schweißzeit von 0,6 s festgelegt und die Parameter der Anpresskraft und Amplitude variiert. Alle weiteren Schweißparameter wurden im Rahmen der Versuche für eine gute Vergleichbarkeit konstant gehalten und aus Erfahrungswerten sinnvolle Größenordnungen gewählt. Bei den Anpresskräften wurden 300 N, 400 N und 500 N gewählt. Für die Amplitude wurden Auslenkungen von 28 μm , 33 μm und 38 μm gewählt. Die resultierenden neun Kombinationen werden in einem vollen Versuchsplan in vierfacher Ausführung vermessen. In den Zugversuchen werden bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 0,5 mm/min jeweils drei Prüfkörper gemessen.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Piezoschwinger

Neben der Ermittlung der Schweißdauer können ohne die beschriebene FFT keine weiteren Informationen aus den Messdaten extrahiert werden. Wird die Fourier Transformation durchgeführt, kann das Amplituden-Frequenzspektrum der aufgezeichneten Signale ausgewertet werden. Zu erkennen sind die Grundschwingung von 20 kHz, sowie die dazugehörigen Oberschwingungen (Abb. 4).

Werden nun die Amplituden-Frequenzspektren der Grundschwingung und die dazugehörigen Oberschwingungen über der Schweißzeit aufgetragen (Abb. 5), wird deutlich, dass Piezoschwinger B hinsichtlich der Frequenzverteilung homogener als Piezoschwinger A ist. Eine mögliche Ursache besteht innerhalb einer mangelhaften Anbindung der Wachsschicht zwischen Amboss und Piezoschwinger, wodurch ein freies Schwingen ermöglicht werden konnte.

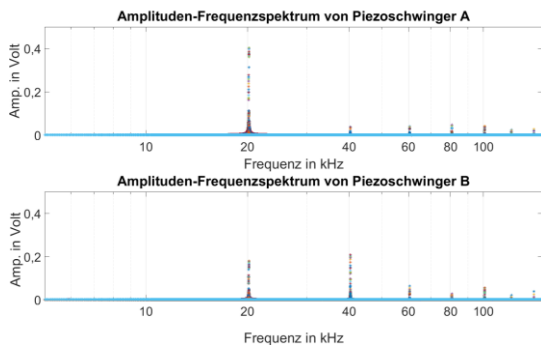


Abb. 4. Amplitudenspektrum des Ultraschallsignals an den Piezoschwingern

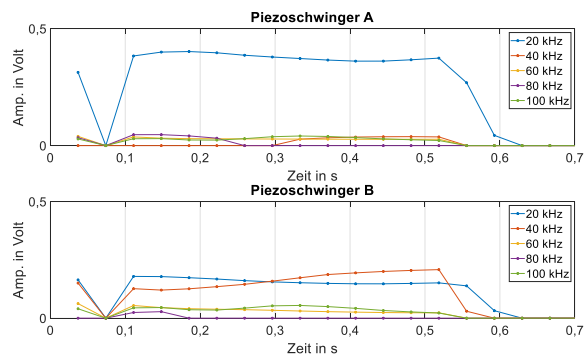


Abb. 5 Darstellung der Amplituden-Frequenzspektren über der Zeit an den Piezoschwingern

Für die Bestimmung der mechanischen Schwingungsamplituden wurde zunächst der Umsetzungsfaktor α der Piezoschwinger mittels Laser-Doppler-Vibrometer bei 20 kHz bestimmt. Beide Piezoschwinger verhalten sich dabei linear proportional zur angelegten Spannung und sind über die Steigung der Kurve in Abb. 6 definiert. Durch den linearen Zusammenhang ist die Bestimmung der Umsetzungsfaktoren der übrigen Frequenzen ausreichend mit dem Verhältnis β abgebildet (Abb. 7).

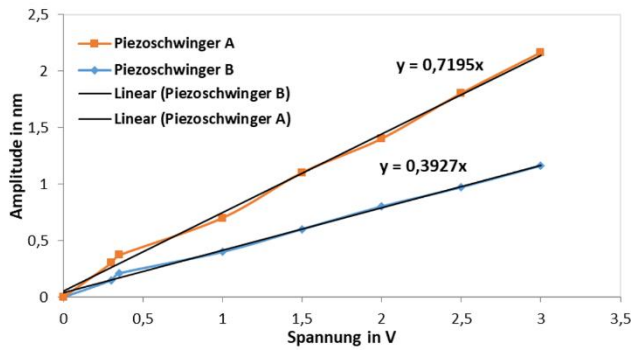


Abb. 6. Bestimmung des Umsetzungsfaktors der Piezoschwinger

f [kHz]	A [nm]	Verhältnis β
20	3,3	1,0
40	2,3	0,7
60	3,0	0,9
80	3,3	1,0
100	1,7	0,5

Abb. 7 Verhältnis β der gesamten Frequenzen

Mithilfe von Gleichung 8 können anschließend die spezifischen Energiedichten der Piezoelemente berechnet werden. Werden die einzelnen Energiedichten nach Gleichung 9 integriert, ist die Energiedichte einer Frequenz bestimmt. Die gesamte spezifische Energiedichte der Schwingung vom Amboss wird durch die Summe berechnet (Gleichung 10). In dem hier vorliegenden Fall beträgt die Dichte ρ der Piezoschwinger bei Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) etwa $\rho \sim 8000 \text{ kg/m}^3$. Der Index i stellt die Frequenz f von 20 kHz – 100 kHz dar und Index j den jeweiligen Messpunkt.

$$E_{ij} = (A_{ij} \cdot \alpha_i \cdot \beta_i)^2 \cdot (2\pi \cdot f_{ij})^2 \cdot \rho \quad (8)$$

$$E_i = \int_0^{t_s} E_{ij} dt \quad (9)$$

$$E = \sum_i E_i \quad (10)$$

Die Energiedichten sämtlicher Schweißversuche sind in Abb. 8 abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Energiedichten von Piezoschwinger A im Laufe der Versuche stärker variieren als die von Piezoschwinger B. Erneut wird eine fehlerhafte Kopplung vermutet.

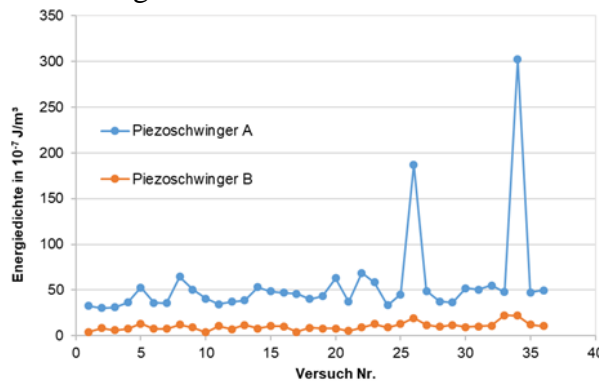


Abb. 8. Schallenergiedichten der Piezoschwinger A und B sämtlicher Versuche

Die Ergebnisse der Zugprüfungen sind gemeinsam mit den gemessenen Schallenergiedichten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Prüfkörper mit Amplituden von 28 μm eine geringere Reißkraft aufweisen als Prüfkörper mit Amplituden von 38 μm . Im Durchschnitt sind die Reißfestigkeiten bei 38 μm um Faktor 3 höher und bei 33 μm um Faktor 2. Bei den vorliegenden Prüfkörpern aus PA6 werden somit bei einer Schweißzeit von 0,6 s höhere Festigkeiten bei höheren Amplituden erreicht. Aufgrund der geringen Reißfestigkeit von bei Schweißamplituden von 28 μm , werden für die abschließende Diskussion nur die höheren Amplitudenstufen betrachtet.

Für die Überprüfung der Eignung von Piezoschwingern zur Überwachung des Ultraschallprozesses werden die ermittelten Energiedichten der Piezoschwinger über den Reißkräften der Versuche aufgetragen (Abb. 9). Anhand der Ergebnisse kann eine Korrelation zwischen höheren Amplituden und entsprechend hohen Schweißnahtfestigkeiten festgestellt werden. Besonders zwei Versuche stechen hierbei heraus. Dies sind die Schweißversuche mit einer Amplitudenhöhe von 38 μm bei 300 N und 500 N. Bis auf wenige Ausnahmen korrelieren die Energiedichten gut mit den gemessenen Reißkräften. Die Amplituden bei 28 μm müssen jedoch kritisch betrachtet werden, da mit vergleichbarer Energiedichte zu den Amplituden von 33 μm geringere Reißkräfte erreicht werden.

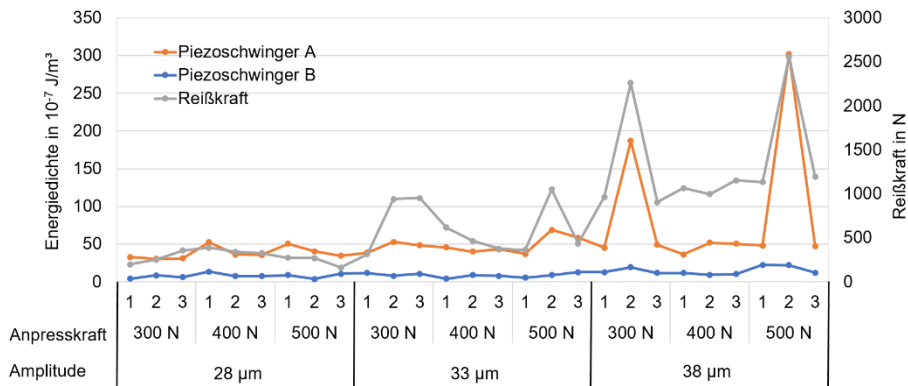


Abb. 9. Vergleich der Reißkräfte und Energiedichten an den Piezoschwingern

4.2 Nichtlinearitäten

In Abb. 10 ist die FFT des Messsignals eines weiteren Piezoelementes während einer Schweißung gezeigt. Gut zu erkennen sind die im Prozess auftretenden höher harmonischen Schwingungen. Diese Messung zeigt, dass im realen Schweißprozess eine hohe Nichtlinearität vorliegt. In Abb. 11 ist die FFT einer Laser-Doppler-Vibrometer Messung an der frei schwingenden Sonotrode der Ultraschallschweißanlage dargestellt. In der FFT ist zu erkennen, dass die Sonotrode in guter Näherung nur in ihrer Arbeitsfrequenz (20 kHz) schwingt und seitens der Anregung kaum höher Harmonische auftreten. Vergleicht man die Messungen wird deutlich, dass die Nichtlinearität im Schweißprozess auftritt. Die klare Ausbildung von höher Harmonischen macht die Betrachtung des Nichtlinearitätsfaktors im Rahmen einer Qualitätsaussage zielführend.

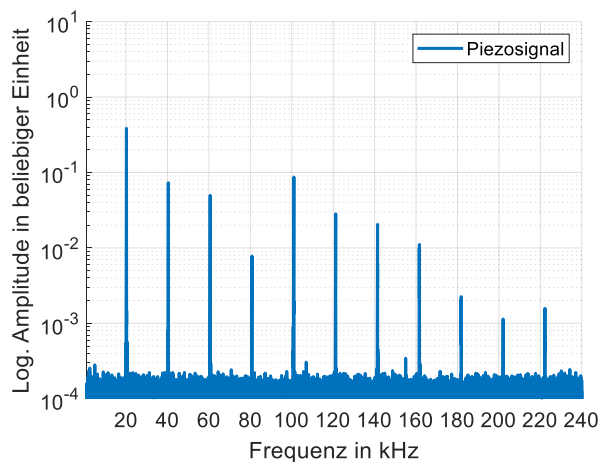


Abb. 10. Piezomessung der im Prozess auftretenden Schwingungen

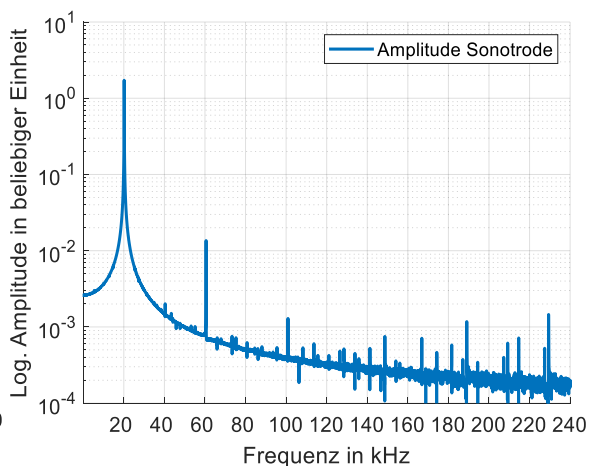


Abb. 11 Laser-Doppler-Vibrometer Messung der frei schwingenden Sonotrode

Ebenfalls wurden an Schweißprüfkörpern Untersuchungen der Nichtlinearität im Prozessverlauf durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend in Abb. 12 und Abb. 13 dargestellt. Gezeigt ist der Verlauf des Nichtlinearitätsfaktors nach Gleichung 6 über die Dauer des Schweißprozesses. Das Signal ist dabei zeitlich auf 1 ms diskretisiert.

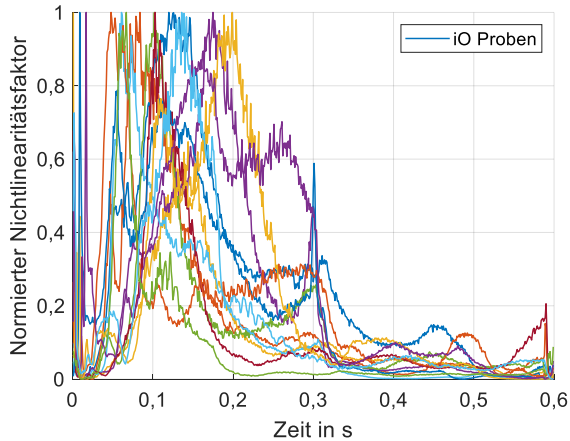


Abb. 12 Normierter Nichtlinearitätsfaktor während des Schweißprozesses von iO Proben **hoher** Zugfestigkeit

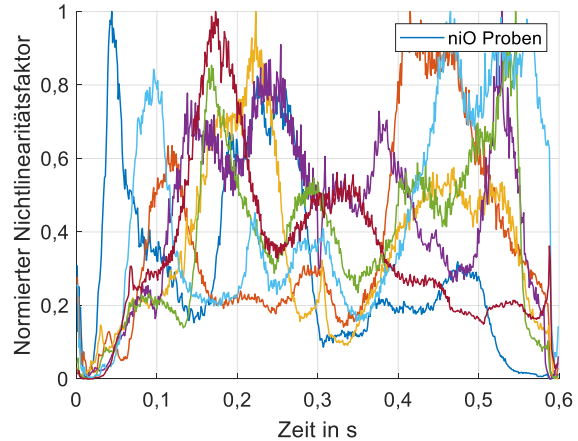


Abb. 13 Normierter Nichtlinearitätsfaktor während des Schweißprozesses von niO Proben **geringer** Zugfestigkeit

Die iO Proben, die in der Zugprüfung hohe Zugfestigkeiten erreicht haben (Abb. 12) und die niO Proben, die geringe Zugfestigkeiten erreicht haben (Abb. 13), zeigen stark unterschiedliche charakteristische Verläufe des Nichtlinearitätsfaktors über die Dauer des Schweißprozesses. Ein solches gegensätzliches nichtlineares Verhalten kann durch die Einflüsse verschiedener Mechanismen der Nichtlinearität auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten interpretiert werden. Das Einsetzen der prozesseitigen Ultraschallanregung aktiviert die Mechanismen der Nichtlinearität (CAN oder HN, abhängig von der Vorspannung) und sorgt bei iO Proben für einen starken Anstieg der Nichtlinearität zu Beginn des Prozesses (Abb. 12). Der Beitrag von CAN und HN fördert die Wärmeumwandlung und dauert bis zur Ausbildung eines gewissen Schmelzepolsters, das einen starken Abfall der Nichtlinearität aufgrund der Auswirkungen der Viskosität verursacht (Abb. 12, 250–350 ms). Durch die hohe Dämpfung, insbesondere der höheren Frequenzen, nimmt der Nichtlinearitätsfaktor in dieser Phase des Schweißvorganges wieder ab.

Bei niO Proben (Abb. 13) ist die beginnende nichtlineare Reaktion wesentlich geringer, was ein Hinweis auf eine übermäßige Kontaktvorspannung sein könnte, die nur den weniger effizienten HN-Mechanismus aktiviert und somit weniger umgewandelte Wärme aus den höheren Harmonischen Schwingungen liefert. Infolgedessen entwickelt sich der Schmelzprozess nicht in vollem Umfang und der dämpfende Einfluss der Viskosität auf die nichtlineare Antwort fällt gering aus. Vielmehr bleibt der Nichtlinearitätsfaktor bis zum Ende des Prozesses auf einem hohen Niveau, was sich entsprechend mit einem potenziell unvollständig ausgebildeten Schmelzepolster assoziieren lässt. Die Nichtlinearität spielt demnach eine doppelte Rolle: Zum einen sorgen die Mechanismen für eine effiziente Energieumwandlung in Wärme, zum anderen deutet ihr Rückgang im Prozessverlauf aufgrund der Viskosität der Schmelze auf die Entwicklung eines umfassenden Schmelzprozesses hin. Diese Ergebnisse unterstreichen die Eignung des nichtlinearen Schwingungsverhaltens als Charakteristikum für den Verlauf des Ultraschallschweißprozesses und die daraus resultierende Schweißnahtqualität.

5. Fazit und Ausblick

Die Erfassung der beim Schweißprozess auftretenden Schwingungen mittels Piezoschwingern ermöglicht eine qualitative Überwachung der Schweißnahtfestigkeit. In der Gegenüberstellung der ausgewerteten Schallenergiedichten und den Ergebnissen aus der Zugprüfung ist zu erkennen, dass die Energiedichte mit der Schweißnahtfestigkeit in Zusammenhang steht. Besonders bei großen Amplituden von bspw. 38 μm ist zu erkennen, dass hohe Energiedichten zu großen Reißkräften führen. Zwei der durchgeführten Schweißversuche weisen hier bei hohen Energiedichten ebenfalls hohe Zugfestigkeiten auf, wobei ein Zusammenhang bei niedrigen Schweißamplituden nicht ausreichend erkennbar ist. Dies könnte daran liegen, dass während des Schweißvorgangs nicht genügend Schwingungsenergie in die Prüfkörper eingeleitet wird. Geringe Amplituden führen dadurch zu einer niedrigen Energiemenge, die in Wärme umgesetzt werden kann. Das führt letztlich zu Abweichungen zwischen der mittleren Energiedichte und der mittleren Reißkraft.

In ersten Versuchen konnten zudem die nichtlinearen Schwingungseffekte bei iO und niO Proben betrachtet werden. Nichtlinearitäten fördern die Umwandlung von Energie in Wärme und demnach die effiziente Ausbildung einer Schmelze. Die Auswirkung der Mechanismen der Nichtlinearität sind zudem im Verlauf des Nichtlinearitätsfaktors zu erkennen. Während bei iO Proben der Nichtlinearitätsfaktor während der Schweißzeit durch Dämpfung der sich ausbildenden viskoelastischen Schmelze abnimmt, verbleibt das hohe Niveau des Nichtlinearitätsfaktors bei niO Proben auf einem ähnlichen Niveau und ist auf ein nicht ausgeprägtes Schmelzepolster zurückzuführen.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen das Potential von Piezoschwingern zur sensorischen Überwachung auf. Die Auswertung der Schallenergiedichte in Kombination mit nichtlinearem Schwingungsverhalten kann dadurch Rückschlüsse auf die resultierende Schweißnahtfestigkeit liefern.

Referenzen

- [1] DIN 1910-3, SCHWEIßEN; Schweißen von Kunststoffen, Verfahren, Berlin: Beuth, 1977.
- [2] BONTEN, C. Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen. München: Hanser, 2014. ISBN 3-446-44093-7
- [3] VERLAG FÜR SCHWEIßEN UND VERWANDTE VER-FARHEN DVS-VERLAG GMBH Taschenbuch Fügen von Kunststoffen, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2000.
- [4] AAKEN, A. V. *Einfluss von Feuchtigkeit auf das Ultraschallschweißen von Polyamiden*. Dissertation, RWTH Aachen, 2015.
- [6] KROHN, N. *Nichtlineares dynamisches Materialverhalten zur defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde. Stuttgart, 2002.
- [7] SOLODOV, I. und M. KREUTZBRUCK. Monitoring of Bonding Quality in CFRP Composite Laminates by Measurements of Local Vibration Nonlinearity. In: *Structural Health Monitoring 2019*. Lancaster, PA: DESTech Publications, 2018. ISBN 978-1-60595-601-5.
- [8] GUYER, R.A. und P.A. JOHNSON. *Nonlinear mesoscopic elasticity. The complex behaviour of granular media including rocks and soil*. Weinheim: Wiley, 2009. ISBN 3527407030.
- [9] SOLODOV, I., N. KROHN und G. BUSSE. CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids. In: *Ultrasonics*, 2002, **40**(1-8), 621–625. Doi:10.1016/S0041-624X(02)00186-5
- [10] JHANG, K.-Y., C.J. LISSENDEN, I. SOLODOV, Y. OHARA und V. GUSEV. *Measurement of nonlinear ultrasonic characteristics*. Singapore: Springer, 2020. Springer Series in Measurement Science and Technology. ISBN 9789811514616.
- [11] ROTHENFUSSER, M., M. MAYR und J. BAUMANN. Acoustic nonlinearities in adhesive joints. In: *Ultrasonics*, 2000, **38**(1-8), 322–326. Doi:10.1016/S0041-624X(99)00083-9

- [12] OHARA, Y., T. MIHARA und K. YAMANAKA. Effect of adhesion force between crack planes on subharmonic and DC responses in nonlinear ultrasound. In: *Ultrasonics*, 2006, **44**(2), 194–199. Doi:10.1016/j.ultras.2005.10.006
- [13] DONSKOY, D., A. SUTIN und A. EKIMOV. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing. In: *NDT & E International*, 2001, **34**(4), 231–238. Doi:10.1016/S0963-8695(00)00063-3
- [14] MEO, M. und G. ZUMPANO. Nonlinear elastic wave spectroscopy identification of impact damage on a sandwich plate. In: *Composite Structures*, 2005, **71**(3-4), 469–474. Doi:10.1016/j.compstruct.2005.09.027
- [15] YAN, D., S.A. NEILD und B.W. DRINKWATER. Modelling and measurement of the nonlinear behaviour of kissing bonds in adhesive joints. In: *NDT & E International*, 2012, **47**, 18–25. Doi:10.1016/j.ndteint.2011.12.003
- [16] SOLODOV, I. und G. BUSSE. Nonlinear air-coupled emission: The signature to reveal and image microdamage in solid materials. In: *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(25), 251910. Doi:10.1063/1.2827193
- [17] CHEN, B.-Y., S.-K. SOH, H.-P. LEE, et al. A vibro-acoustic modulation method for the detection of delamination and kissing bond in composites. In: *Journal of Composite Materials*, 2016, **50**(22), 3089–3104. Doi:10.1177/0021998315615652
- [18] SOLODOV, I. Nonlinear acoustic response of damage applied for diagnostic Imaging. In: *Nonlinear ultrasonic and vibro-acoustical techniques for non-destructive evaluation*, Hg. T. Kundu, Springer, 2019, (8). ISBN 978-3-319-94474-6
- [19] OSTROVSKY L. A. und JOHNSON P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. In: *Rivista del Nuovo Cimento*, 2001, **24**(7), 1–46. Doi:10.1007/BF03548898
- [20] HAMILTON, M.F. und D.T. BLACKSTOCK (Hg.). *Nonlinear acoustics*, Academic Press, San Diego, CA, USA, 1998.