

Untersuchung der Bindekräfte in dünnen Fügenschichten in Materialverbunden mittels nichtlinearer Ultraschallübertragung

S. Hirsekorn, A. Koka, W. Arnold

Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Universität, Geb. 37,D-66123 Saarbrücken, Deutschland

Fügenschichten in Werkstoffverbunden sind elastische Inhomogenitäten im Werkstück, die das Verhalten bei mechanischen Belastungen bis hin zum Versagen des Bauteils wesentlich mitbestimmen. Deshalb ist die Untersuchung der Wechselwirkungskräfte in Fügenschichten eine wichtige Aufgabe in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Hierzu kann ausgenutzt werden, daß Bindekräfte im allgemeinen nichtlinear sind. Als Folge verursachen sie nichtlineare Modulationen von transmittierten und reflektierten Schallwellen, so daß in Transmission und Reflexion höhere Harmonische einer eingeschallten monochromatischen Welle erzeugt werden. Prinzipiell lassen die Amplituden der transmittierten Wellen mit eingeschallter Frequenz und ihren höheren Harmonischen auf die Wechselwirkungskräfte in dünnen Fügenschichten schließen, wenn dämpfungs- und hysteresefreie nichtlineare Kräfte (klassische Nichtlinearität) angenommen werden können. Werden zusätzlich die Phasen der transmittierten Wellen gemessen, erhält man auch Informationen über Dämpfung und Hysterese in den lokalen Bindekräften. Numerische Simulationen der Experimente sollen zum tieferen Verständnis der Vorgänge in Fügenschichten verhelfen und gleichzeitig Aufschluß darüber geben, inwieweit die gemessenen Nichtlinearitäten bei der Ultraschallübertragung überhaupt der Fügenschicht zuzuschreiben sind und zu ihrer Beurteilung herangezogen werden können, oder von anderen Komponenten in der Probe oder dem Meßsystem verursacht werden. Von der Untersuchung der Ultraschalltransmission durch dünne Fügenschichten versprechen wir uns aber nicht nur Methoden zur Bewertung dieser Fügenschichten, sondern auch Erkenntnisse über die nichtlinearen Wechselwirkungen in geschädigten Materialien, die z.B. Mikrorisse oder flache Poren enthalten, da diese Fügenschichten sehr ähnliche nichtlineare Kontakte innerhalb eines Werkstücks sind. Die Erkenntnisse können dann zu Verfahren führen, die die Bewertung der Schädigung mit Hilfe der nichtlinearen Ultraschallausbreitung erlauben.

Dünne Fügenschichten in Werkstücken können durch zwei Oberflächen beschrieben werden, die durch adhäsive Kräfte in geringem Abstand zusammengehalten werden. Die Kräfte zeigen bei starken Bindungen zunächst lineares Kraft-Abstands-Verhalten und werden mit zunehmendem Abstand in der Fügenschicht nichtlinear. Bei schwachen Bindungen setzt das nichtlineare Verhalten viel früher ein, und die Kraft-Abstands-Kurve durchläuft schließlich ein Maximum. Wird eine monochromatische Welle auf eine Fügenschicht eingeschallt, enthalten die transmittierten Wellen bei Schallübertragung durch lineare Käfte nur die eingeschallte Frequenz. Bei Übertragung durch nichtlineare Kräfte enthalten die Wellen in Transmission nicht nur die Grundfrequenz, sondern auch ihre höheren Harmonischen. Die Amplituden und Phasen der transmittierten Wellen oder geeignete Kombinationen dieser sind Maße für die Nichtlinearität der Bindekräfte und damit auch für die Qualität der Bindung. Ein konventionelles Maß ist z.B. der Klirrfaktor, der den Anteil der erzeugten höheren Harmonischen angibt. Bei dünnen Fügenschichten können aber auch die Amplituden und Phasen der transmittierten Wellen direkt mit den Wechselwirkungskräften in der Fügenschicht korreliert werden.

Eine monochromatische Longitudinalwelle $\varepsilon_1 \sin(\omega t - kx)$ der Frequenz $f = \omega / 2\pi$ und Verzerrungsamplitude ε_1 senkrecht eingeschallt auf eine Fügenschicht mit Abstand a_e und Bindekraft $F(a_e)$ im statischen Gleichgewicht moduliert den Abstand in der Fügenschicht sinusförmig zu

$$a(t) = a_e(1 + \varepsilon_{BI} \sin(\omega t + \varphi_0)). \quad (1a)$$

Die Schwingung der Fügenschicht ist möglicherweise phasenverschoben (φ_0) zur einfallenden Welle und besitzt eine i.a. nichtlinear von ε_1 abhängige Verzerrungsamplitude ε_{BI} . Die Schwingung des Abstands in der Fügenschicht verursacht eine zeitabhängige Wechselwirkungskraft, die in der allgemeinen Form als Summe über sinusförmige Kräfte der eingeschallten Frequenz und ihrer höheren Harmonischen dargestellt werden kann [1-4/,

$$F(a(t)) = F_0(\varepsilon_1) + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(\varepsilon_1) \sin(n\omega t + \varphi_n(\varepsilon_1)). \quad (2a)$$

Diese Kräfte erzeugen die Wellen in Transmission (und Reflexion), so daß die Phasen φ_n direkt übertragen werden und die Kraftamplituden F_n durch die mit der elastischen Konstanten c_{11} in den gefügten Komponenten multiplizierten Verzerrungsamplituden der transmittierten Wellen ε_n gegeben sind ($F_n = c_{11} \varepsilon_n$). Der konstante Anteil F_0 bestimmt den mittleren Abstand in der Fügenschicht während der Beschallung. Dieser ist nur bei linearen Wechselwirkungskräften gleich dem Abstand a_e im statischen Gleichgewicht. Die erzeugten höheren Harmonischen verursachen zusätzliche Verzerrungen der Fügenschicht, die aber als Effekt höherer Ordnung vernachlässigt werden. Die Verzerrung durch reflektierte und transmittierte Welle der Grundfrequenz beeinflusst Amplitude und Phase der Fügenschichtsschwingung, erhält aber die Sinusform und ist deshalb in (1a) enthalten. Der statische Gleichgewichts- sowie maximaler und minimaler Abstand a_e , a_{max} und a_{min} werden zu bestimmten Zeiten in den Schwingungszyklen erreicht, für ganze Zahlen v gilt

$$a(t) = a_e, \quad \text{wenn } \omega t_e + \varphi_0 = \pi v; \quad (1b)$$

$$a(t) = a_e(1 \pm \varepsilon_{BI}) = a_{max,min}, \quad \text{wenn } \omega t_{max,min} \pm \varphi_0 = 2\pi v + \pi/2. \quad (1c)$$

Die entsprechenden Wechselwirkungskräfte folgen mit (2a) zu

$$F(a_e) = F_0 + \quad (2b)$$

$$(-1)^v \sum_{n=0}^{\infty} F_{2n+1} \sin\{\varphi_{2n+1} - (2n+1)\varphi_0\} + \sum_{n=1}^{\infty} F_{2n} \sin(\varphi_{2n} - 2n\varphi_0)$$

$$= F(a_e)_{static} + (-1)^v \sum_{n=0}^{\infty} F_{2n+1} \sin\{\varphi_{2n+1} - (2n+1)\varphi_0\},$$

$$F(a_e \pm a_e \varepsilon_{BI}) = F_0 \pm \sum_{n=0}^{\infty} F_{2n+1} (-1)^n \cos\{\varphi_{2n+1} - (2n+1)\varphi_0\} \quad (2c)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} F_{2n} (-1)^n \sin(\varphi_{2n} - 2n\varphi_0).$$

Diese Beschreibung beinhaltet Hysterese, denn ungerade und gerade Zahlen v , die zu- bzw. abnehmenden Fügenschichtabstand während der Schwingung repräsentieren, liefern unterschiedliche Ergebnisse für die Bindekraft im Abstand a_e . Die im statischen Gleichgewicht wirkende Kraft $F(a_e)_{static}$ ist der Mittelwert. Die Bindekräfte relativ zum statischen Gleichgewicht

$$F(a_e \pm a_e \varepsilon_{BI}) - F(a_e)_{static} = \pm \sum_{n=0}^{\infty} F_{2n+1} (-1)^n \cos\{\varphi_{2n+1} - (2n+1)\varphi_0\} + \sum_{n=1}^{\infty} F_{2n} \{(-1)^n - 1\} \sin(\varphi_{2n} - 2n\varphi_0), \quad (2d)$$

$$F(a(t)) - F(a_e)_{static} = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n\omega t + \varphi_n) - \sum_{n=1}^{\infty} F_{2n} \sin(\varphi_{2n} - 2n\varphi_0). \quad (2e)$$

beinhalten den konstanten Term F_0 nicht mehr, so daß diese relativen Bindekräfte aus den Amplituden und Phasen der trans-

mittierten Ultraschallwellen bestimmt werden können.

Im Fall rein klassischer Nichtlinearität können Annahmen über die Phasen in Gleichung (2a) gemacht werden /1-4/, so daß $\sin(\varphi_{2n}-2n\varphi_0) = (-1)^{n+1}$, $\varphi_{2n}-2n\varphi_0 = n\pi - \pi/2$; $n=1,2,3,\dots$ (3a)

$\cos[\varphi_{2n+1}-(2n+1)\varphi_0] = (-1)^n$, $\varphi_{2n+1}-(2n+1)\varphi_0 = n\pi$; $n=0,1,2,\dots$ (3b)

gilt. Diese Phasen reduzieren in (2b) die zwei Werte für die Wechselwirkungskraft bei Fügenschichtabstand a_c zu einem, d.h. bei rein klassischer Nichtlinearität ist die Schwingung der Fügenschicht natürlich nicht hysteretisch. Nach (2d) ist dann die relative Bindekraft im maximalen Fügenschichtabstand während eines Schwingungszyklus

$$\Delta F(a_c(1+\epsilon_{BI})) = F(a_c(1+\epsilon_{BI})) - F(a_c) = F_1 - 2 F_2 + F_3 \pm \dots \quad (4)$$

An einer Probe aus zwei Aluminiumplatten von je 4 mm Dicke, die mit einer 0.125 mm dicken Fügenschicht aus Epoxidharz zusammengeklebt sind, wurden bei Einschaltung einer Longitudinalwelle der Frequenz 2.25 MHz die Verzerrungsamplituden der transmittierten Ultraschallwellen kalibriert gemessen /5/. Aus diesen wurde mit Gleichung (4) die maximale relative Bindekraft pro Schwingungszyklus bestimmt und als Funktion der Verzerrungsamplitude der eingeschallten Welle aufgetragen (Abb. 1). Die Messungen wurden an fünf verschiedenen Punkten der Probe durchgeführt. Die unterschiedliche Höhe der Kraftkurven läßt auf lokale Unterschiede in der Qualität der Fügenschicht schließen. Die Probe war Wasser ausgesetzt, so daß die Fügenschicht von außen nach innen durch Wasserdiffusion geschädigt war. Dies ist in den Meßergebnissen zu erkennen, denn Meßpunkt 1 mit der niedrigsten Kraftkurve lag am Rand, Meßpunkt 5 mit der höchsten Kraftkurve in der Mitte der Probe, die anderen Meßpunkte der Reihe nach dazwischen.

Fehlerquellen bei der Untersuchung der Bindekräfte in dünnen Fügenschichten durch Nichtlinearitäten in der Ultraschalltransmission liegen in der Tatsache, daß nichtlineare Ultraschallsignale nicht nur durch die Fügenschicht, sondern auch durch andere Komponenten in der Meßkette, wie Meßsystem (Ultraschallwandler, Verstärker, usw.), Koppelmittel, Volumennichtlinearität der gefügten Komponenten, frequenzabhängige Dämpfung in den Komponenten, usw., verursacht werden. Diese Beiträge können deutlich größer sein als der gewünschte Meßeffect /6/. Durch Separation des gewünschten vom Fehlersignal (z.B. waren unsere Messungen bezüglich der Charakteristik des Empfängerprüfkopfs korrigiert), Reduzierung der Fehlerquellen durch geeignete Auswahl von Prüfköpfen, Koppelmittel, usw., Kalibrierung der experimentellen Ergebnisse durch Messungen an artgleichen Proben, die aber keine Fügenschicht enthalten, usw. kann der Einfluß der Fehlerquellen reduziert werden. Eine möglicherweise erfolgversprechende Methode ist, zwei oder mehrere verschiedene Frequenzen schräg einzuschallen, so daß sich die Schallstrahlen nur in der Fügenschicht überlagern, denn dann können die erzeugten Mischfrequenzen nur aus der Fügenschicht stammen und keine anderen Ursachen haben /4/. In vielen Fügenschichten kann das Maximum in der Wechselwirkungskraftkurve mit Ultraschallverzerrungen nicht erreicht werden /6/. Dadurch ist die Aussagefähigkeit der Meßergebnisse stark eingeschränkt. Bei Fügenschichten, deren Dicke nicht klein im Vergleich zur Ultraschallwellenlänge ist, muß die Volumennichtlinearität innerhalb der Fügenschicht berücksichtigt werden. Damit wird der Zusammenhang zwischen Amplituden und Phasen der transmittierten Wellen und den Kräften in der Fügenschicht wesentlich komplizierter und erfordert eine Weiterentwicklung der Theorie. Auch ist bisher nicht geklärt, ob und, wenn ja, wie die dynamische Wechselwirkung in den Ultraschallexperimenten mit Kräften bei quasi-statischer Belastung zu korrelieren sind.

Um das Potential und die Grenzen des Verfahrens aufzuzeigen, sind systematische experimentelle und theoretische Untersuchungen erforderlich. Numerische Simulationen der Experimente können zum tieferen Verständnis der Vorgänge in Fügenschichten verhelfen und gleichzeitig Aufschluß darüber geben.

inwieweit die gemessenen nichtlinearen Effekte der Fügenschicht zuzuschreiben sind und zu ihrer Beurteilung herangezogen werden können, oder von anderen Komponenten in der Probe oder dem Meßsystem verursacht werden. Das Computersimulationsmodell LISA (Local Interaction Simulation Approach), das in der Arbeitsgruppe von Prof. P.P. Delsanto, Turin, entwickelt wurde, erlaubt die lokale Implementierung verschiedener Wechselwirkungen und ist deshalb für diese Zwecke geeignet /7/. Erste Rechnungen bisher mit einer sehr einfachen Modellbeschreibung von Probe und Experiment zeigen schon erfolgversprechende Ergebnisse /5/. Angestrebt wird zunächst, mit der Simulation von Experimenten, bei der als Eingabegrößen die aus gemessenen Amplituden und in Zukunft nichtklassischer Nichtlinearität unter Hinzuziehung der Phasen der durch eine dünne Fügenschicht transmittierten Ultraschallwellen bestimmten Bindekräfte, wie sie z.B. in Abb. 1 dargestellt sind, genutzt werden, die experimentellen Ergebnisse zu reproduzieren. Dadurch wird es möglich abzuschätzen, inwieweit die gemessenen nichtlinearen Effekte von der Fügenschicht stammen. Anschließend können mit dem entwickelten Simulationsmodell "theoretische Experimente" zur getrennten Untersuchung einzelner Einflußgrößen mit definierten Randbedingungen durchgeführt werden.

Von der Untersuchung der Ultraschalltransmission durch dünne Fügenschichten versprechen wir uns nicht nur die Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Haftqualität von Fügenschichten, sondern auch Erkenntnisse über die nichtlinearen Wechselwirkungen in geschädigten Materialien, die z.B. Mikrorisse oder flache Poren enthalten, da dies Fügenschichten sehr ähnliche nichtlineare Kontakte innerhalb eines Werkstücks sind. Die Erkenntnisse könnten dann die Grundlage zu Verfahrensentwicklungen sein, die die Bewertung der Schädigung mit Hilfe der nichtlinearen Ultraschallausbreitung erlauben.

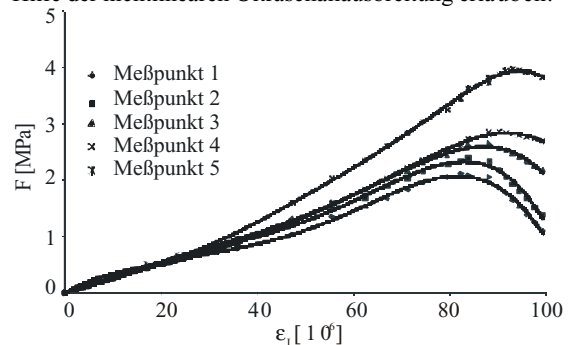


Abb. 1. Lokale Bindekraft bei maximalem Abstand in der Fügenschicht während eines Schwingungszyklus relativ zur Bindekraft im statischen Gleichgewicht in einer Probe aus zwei Aluminiumplatten von je 4 mm Dicke, die mit einer 0.125 mm dicken Fügenschicht aus Epoxidharz zusammengeklebt sind. Die Kräfte folgen aus den kalibriert gemessenen Verzerrungsamplituden der transmittierten Ultraschallwellen und sind als Funktion der Verzerrungsamplitude der eingeschallten Longitudinalwelle der Frequenz 2.25 MHz aufgetragen /5/.

/1/ S.U. Faßbender, W. Arnold, Rev. Progr. QNDE, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 15 (1996) 1321-1328.
 /2/ S. Hirsekorn, S.U. Faßbender, A. Wegner, W. Arnold, DAGA 98, Fortschritte der Akustik, (1998) 518-519.
 /3/ S. Hirsekorn, A. Koka, A. Wegner, W. Arnold, Rev. Progr. QNDE, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 19B (1999) 1367-1374.
 /4/ S. Hirsekorn, Ultrasonics 39 (2001) 57-68.
 /5/ P.P. Delsanto, S. Hirsekorn, V. Agostini, R. Loparco, A. Koka, UT'01, Delft, The Netherlands, July 2-5, 2001.
 /6/ M. Rothenfusser, M. Mayr, and J. Baumann, Ultrasonics 38 (2000) 322-326.
 /7/ P.P. Delsanto, M. Scalerandi, J. Acoust. Soc. Am. 104 (1998) 2584-2591.