

Monitoring von Stahlkonstruktionen mittels geführter Wellen

Udo PEIL¹, Klaus THIELE¹

¹ Institut für Stahlbau, TU Braunschweig, Braunschweig

Kontakt E-Mail: udopeil@icloud.com, k.thiele@stahlbau.tu-braunschweig.de

Kurzfassung. Das Monitoring großflächiger Konstruktionen wird zweckmäßig mittels Beamforming durchgeführt. Im Beitrag werden die wesentlichen Einflüsse dargestellt und an theoretischen und experimentellen Beispielen ausführlich verdeutlicht. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Sensitivität für Schäden, auch solche, die hinter Querrippen verborgen sind.

Einführung

Die Überwachung von Schäden in Stahlbauteilen ist oft nicht ohne weiteres möglich, da z.B. das Innere von Tanks und Silos oder gefährliche Umgebungen wie beispielsweise in Reaktoren gar nicht oder nur schwer zugänglich ist.

Mit der zur Schadensuntersuchung heute überwiegend eingesetzten Ultraschalltechnik können nur sehr kleine Bereiche untersucht werden. Durch Verschieben des Prüfkopfes können jedoch ggf. größere Bereiche einer Konstruktion überprüft werden. Fahrbare Prüfköpfe werden beispielsweise zur Untersuchung von Rohren [5] oder Betonbrücken [6] eingesetzt. Bei komplexen Stahlkonstruktionen mit Querrippen oder Steifen ist dies jedoch nur eingeschränkt oder überhaupt nicht möglich.

Die Untersuchung größerer Bereiche einer Konstruktion ist mit den durch die US-Prüfköpfe erzeugten Volumenwellen praktisch nicht möglich. Mit geführten Wellen lassen sich, im Fall von flächigen Strukturen aus Materialien mit geringer Dämpfung, beispielsweise Stahlblechen, auch größere Bereiche untersuchen. Oberflächenwellen - auch Rayleigh-Wellen genannt - breiten sich entlang der Materialoberfläche aus. Ist das Material relativ dünn, d.h. etwa gleich einmal die Wellenlänge des Signals, spricht man von Platten- oder Lamb-Wellen. Hier wird die Ausbreitung der Welle sowohl durch die Ober- als auch die Unterseite der Platte geführt. An beiden Oberflächen wird die Welle reflektiert und überlagert sich wieder mit der von der Gegenseite. In Abhängigkeit von Material, Frequenz und Plattendicke bilden sich entsprechende Wellenmoden aus. Die Amplituden der einzelnen Moden nehmen mit zunehmender Ausbreitung der Welle deutlich ab. Schäden im Material können durch eine Veränderung der Wellenausbreitung erkannt werden. Entweder durch Messung, der an einer Störstelle reflektierten Wellenanteile, oder durch eine Veränderung der Laufzeit die eine Wellen für die Strecke zwischen einem Aktuator und einem Sensor braucht [7,8,9,10]. Allerdings bedarf es bei beiden Vorgehensweisen eines Vergleichs mit einer Referenzmessung an nicht geschädigten, d.h. jungfräulichen Konstruktion.



1.1 Ziel der Untersuchungen

Ziel des Forschungsprojektes war die Weiterentwicklung von Verfahren zur Schadensdetektion mittels Lamb-Wellen. Nahziel war die Entwicklung von Verfahren, die eine permanente Installation von kostengünstigen, piezokeramischen Aktuatoren und Sensoren zur Schadensdetektion und ggf. Schadensentwicklung ermöglichen. Die von den Aktuatoren erzeugten Wellen werden von den Sensoren aufgenommen. Das Signal wird mit einer Referenzmessung des nicht geschädigten Bauteils verglichen. Änderungen im Differenzsignal weisen auf Veränderungen der Wellen und damit auf Schäden im Material hin. Aktuatoren und Sensoren können in ihrer Wirkung frei ausgetauscht werden.

Das Differenzsignal kann außerdem Aufschluss über die Entfernung des Schadens vom Sensor geben. Mittels sog. passivem beamforming werden die Signale zeit- oder wegversetzt für die einzelnen Richtungen und Entfernungen ausgewertet. Dieses entspricht dem Prinzip des Richtmikrophons. Im Gegensatz dazu werden beim aktiven beamforming zusätzlich die einzelnen Aktuatoren zeitversetzt angesprochen um eine Richtwirkung beim Senden des Signals zu erzielen [12,13].

Mit zunehmender Laufstrecke der Welle schwächt sich die Signalamplitude ab. Darüber hinaus bewegt sich durch die sog. Dispersion der Lambwelle die Rückseite der laufenden Welle langsamer als die Wellenfront, was die Auswertung erschwert. In Abhängigkeit von Frequenz, Material und Plattendicke lässt sich das Zerlaufen des Signals herausrechnen [12,13]. Für einen erfolgreichen, praktischen Einsatz ist es darüber hinaus nötig, Einflüsse aus Temperatur und Phasenversatz zu berücksichtigen [12].

1.2 Allgemeine Vorgehensweise und verwendete Hilfsmittel

Für die praktische Anwendung ist die Verwendung möglichst preisgünstiger Sensoren wichtig, um die Kosten auch einer größeren Überwachungsmaßnahme in Grenzen zu halten. Zu dem Zwecke wurden unterschiedliche Piezotypen getestet. Es ergab sich, dass die Verwendung von kreisförmigen Piezos mit einem Durchmesser von etwa 10 bis 30 mm und einer Dicke von ca. 0,5 mm am besten war. Die Scheiben wurden mit einem 2-Komponenten Epoxyharz verklebt. Der Klebstoff wurde zuvor durch Hinzufügen von Kupfer-Pulver (<100µm) elektrisch leitend gemacht. Das System wird also als permanente Lösung installiert. Die Erregung der Piezos wird durch einen Hybrid-Verstärker erzeugt. Hiermit kann sowohl die Ladung, als auch die zweiseitige Wirkung über der Zeit sauber kontrolliert werden. Hiermit können die Aktuatoren trotz ihrer relativ geringen Kapazität bis zu einer Frequenz von etwa 200 Hz betrieben werden.

Eine Beladung der Piezos mit elektrischen Ladung erzeugt Verzerrungen des Piezos in Richtung ihrer Polarisation und orthogonal dazu. Vergleiche mit Finite-Element (FE)-Simulationen zeigten, dass im Modell die Piezos als starr gekoppelt angesehen werden können.

Die Einleitung der Piezo Deformationen in das Blech ruft durch die Reflektionen an beiden Oberflächen Lamb-Wellen hervor. Da sich die Wellen nur in 2 Dimensionen ausbreiten können, verlieren sie nur beschränkt (d.h. quadratisch mit dem Radius) Energie und können so weit in die Struktur hinein“schauen“. Ein Nachteil der Lamb Wellen ist ihr dispersiver Charakter. Hierdurch wird die laufende Welle immer länger, das Ende läuft mit einer geringeren Geschwindigkeit als der Anfang. Diese Eigenschaft macht es schwierig, z.B. genaue Entfernungen zu bestimmen, da z.B. die am stärksten erregte Wellenmitte zurückfällt. Hierdurch treten Fehler bei der Zeit- und somit auch bei der Längenbestimmung auf.

Bild 1 zeigt die Dispersionskurven, wie sie sich nach den Rayleigh-Lamb-Gleichungen ergeben [5.6]. Dargestellt sind nur die untersten sog. zero-Moden, da alle Untersuchungen bisher unterhalb der cut-off-Frequenzen der höheren Lamb-Moden durchgeführt wurden.

Wenn die Anregung unsymmetrisch erfolgt, werden sowohl die symmetrischen, wie auch die antimetrischen Moden angeregt. Mit Hilfe von Methoden der Zeitreihenanalyse und Verfahren der Eliminierung der Dispersionseffekte [7,12], kann das Signal in beide Moden zerlegt werden. Die Dispersionseeliminierung spielt dabei eine entscheidende Rolle. Die Eliminierung wird im sog. Wellenzahl-Raum vorgenommen, also nicht im bekannten Frequenzraum. Im Wellenzahlraum wird die Dispersion eliminiert. Das sich ergebende Signal wird dann in den Ausgangsraum zurücktransformiert. Bild 2 zeigt das Prinzip der Dispersionskorrektur.

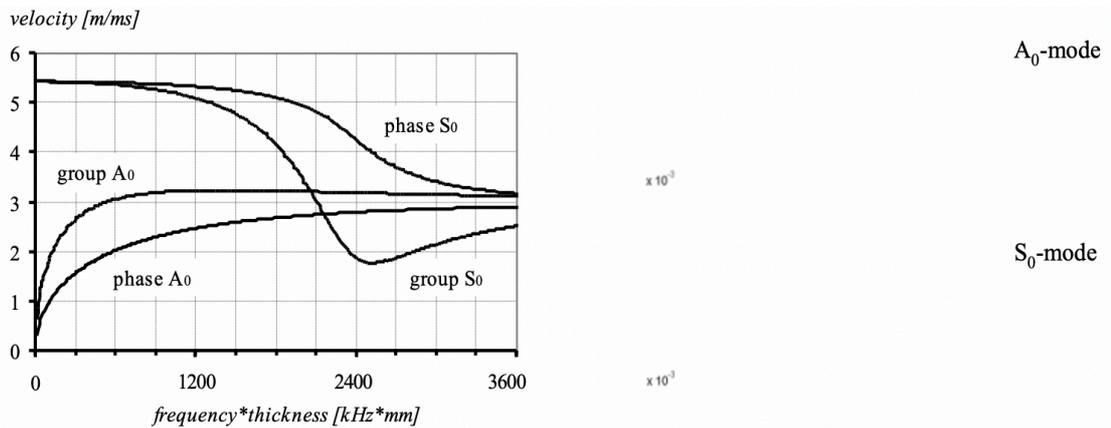


Bild 1: Dispersionskurven, Stahl 10mm, $f=60$ Hz

Nach der Transformation erscheinen die Signale sozusagen als wieder auf ihre Ausgangsgröße reduziert im Zeitbereich. Der Abstand zwischen Aktuator und Sensor beträgt 2,5 m, als Erregungssignal wird ein Hanning gefensterter sog. tone-burst-Signal verwendet. Im oberen Bild sieht man, wie das antimetrische A_0 -Signal sich enorm verbreitert hat. Nach der Dispersions-Korrektur hat das antimetrische Signal wieder die Ausgangsform. Man erkennt, dass bei beiden Signalen exakt eine Länge von 2500mm bestimmt werden kann.

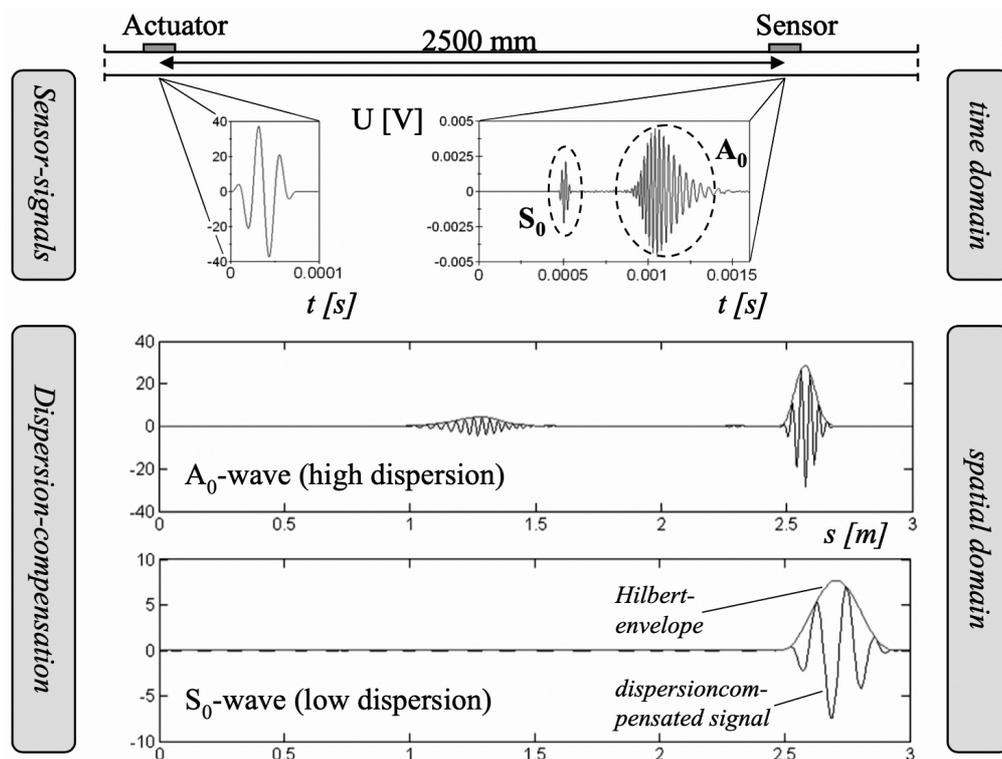


Bild 2: Beispiel für die Dispersions-Korrektur

1.2 Experimente zur Schadenserkenkung und -lokalisierung

Es wurden eine größere Anzahl von Experimenten an Stahlblechen durchgeführt. Die Blechdicke betrug 6 mm, beide Ränder hatten eine Länge von 1500 mm. Verwendet wurden Piezoscheiben $\varnothing 25\text{mm}$, $d=0,5\text{mm}$. Je Messpunkt wurden 5 piezos angebracht (piezo array), die wahlweise als Aktuator oder als Sensor arbeiten können (Bild 3). Als „Schaden“ wurde eine auf die Oberfläche geklebte 9g Masse verwendet, sowie ein gebohrtes Loch mit $\varnothing 1,5\text{mm}$. Bevor ein Schaden eingebracht wurde, wurde ein Nullmessung des ungeschädigten, d.h. jungfräulichen Systems vorgenommen. Dann wurde das Loch gebohrt, an diesem System wurde gemessen, es wurde das Metallstück angeklebt, es wurde wieder gemessen. Die Signale wurden durch ein IIR-Bandpassfilter digital gefiltert, um den Phasenshift zu eliminieren.

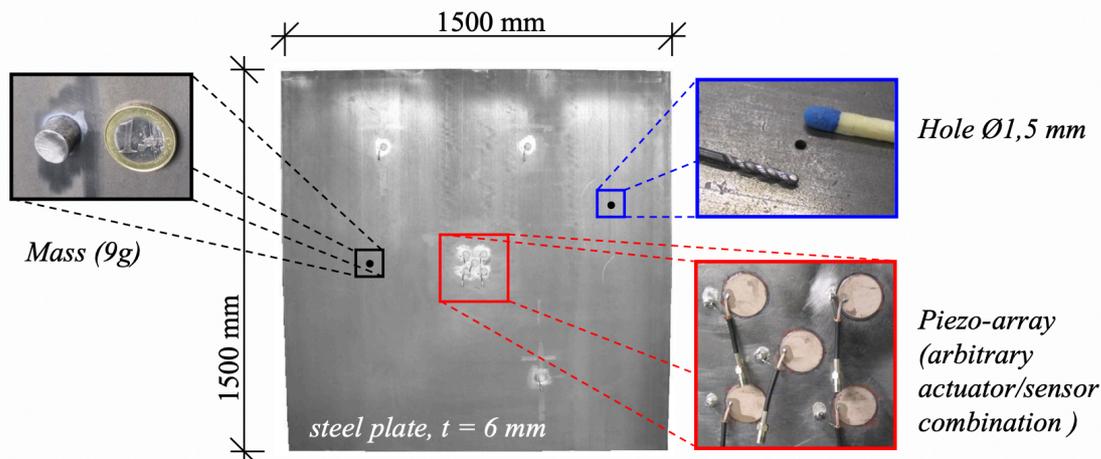


Bild 3: Untersuchte Stahlplatte mit $t=6\text{mm}$ mit Piezo-Array und künstlichen Schäden.

1.3.1 Adaptive Phasenkorrektur

Um die jeweiligen Signale des Loches und der Zusatzmasse besser trennen zu können, wurden die Differenzsignale beider bestimmt. Dies hat den weiteren Vorteil, dass neben den Lochsignalen auch die nicht interessierenden Randreflektionen herausfallen. Dennoch treten immer und unvermeidbare kleine Zeitverschiebungen auf, die das Signal verfälschen (Bild 4a,b), so dass eine Schadensidentifikation nicht mit hinreichender Genauigkeit möglich ist.

Zur Beseitigung dieses Einflusses werden die Signale zunächst mit kleineren Intervallen neu gesampled. Mit den so verfeinerten Signalen wird eine Kreuzkorrelationsanalyse durchgeführt. Der time-shift ergibt sich aus dem Abstand des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion zur Ursprungsachse (Bild 4c), hier $t^*=1,125 \cdot 10^{-7}$ s. Das resampling Intervall ist mit $\Delta t=5,0 \cdot 10^{-7}$ s etwa fünfmal größer, dieser Fehler würde sonst kaum entdeckt.

Abschließend wird das Signal in Bezug auf t^* interpoliert und dann so weiterverwendet. Bild 4d zeigt den Effekt. Das gestrichelte Signal ist durch den time-shift stark verzerrt. Nach Korrektur entspricht es wieder der erwarteten Form. Die Amplitude ist auf reale Werte reduziert, der Verlauf der Phase ist praktisch kaum berührt. Durch diese Phasenkorrektur ist die Sensitivität des Verfahrens beträchtlich gestiegen.

1.3.2 Temperatureinfluss

Nullmessung und Schadensmessung können bei ganz unterschiedlichen Temperaturen stattfinden. Auf diesen wichtigen Einfluss kann in dieser Schrift aus Gründen des beschränkten Umfangs nicht weiter eingegangen werden. Es wurden Korrekturformeln für den Temperatureinfluss entwickelt, siehe dazu z.B. [12,13].

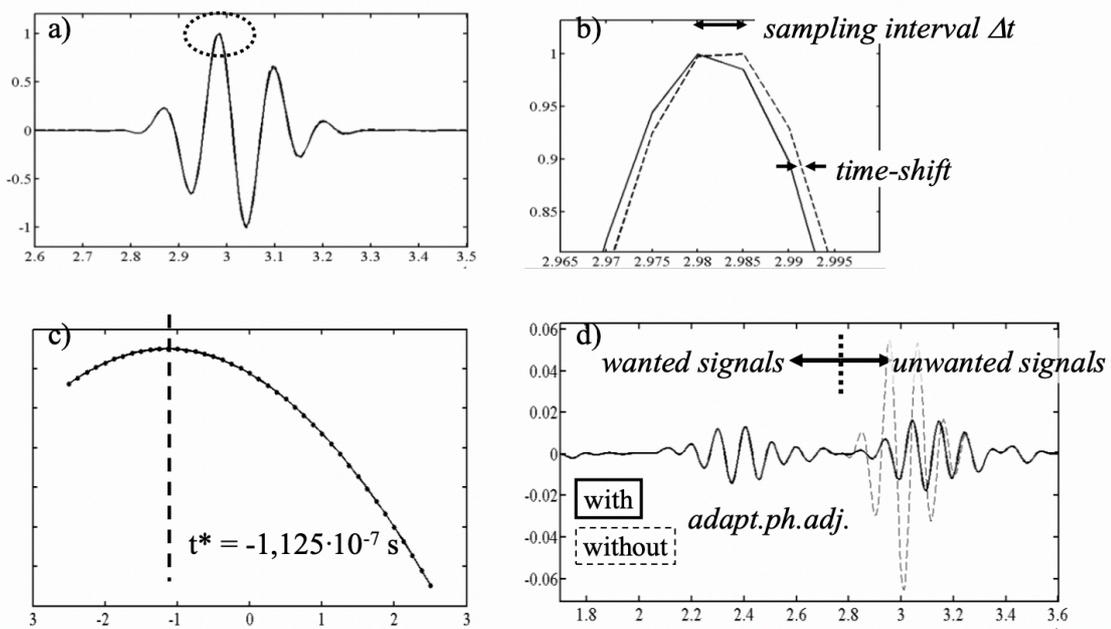


Bild 4: Beispiel der Adaptive Phasenkorrektur

1.3.2 Beamforming der Sensor-Signale

Aus der Funk-Sendetechnik ist das Prinzip des beamformings bekannt. Die Sendeenergie wird dabei nicht – wie üblich - in einer Kugelschale verteilt, sondern in einem gerichteten Balken (beam) konzentriert. Die Konzentration auf den beam wird durch geeignete Interferenz von mehreren Sendern erreicht (Bild 5). Die Interferenz wird dabei durch das phasenverschobene Ansteuern der Antennen des Antennenarrays erreicht. Die Antennen sind bei uns die Piezo-Sensoren.

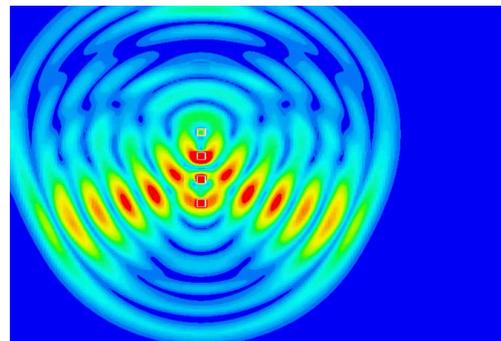
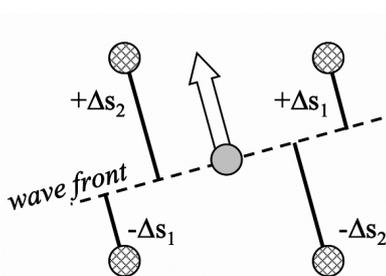


Bild 5: Phasengesteuertes Drehen des beams

Bild 6: FE-Simulation des beamformings

In Bild 6 ist ein Zwischenergebnis des beamformings anhand einer FE-Simulation dargestellt. Man erkennt deutlich, wie sich von den 4 übereinander angeordneten Piezos zwei beams höherer Energie ausbilden. Bei einer Anordnung, wie in Bild 5 lässt sich der Beam durch entsprechende phasenverschobene Ansteuerung der Piezos in jede Richtung lenken. Man kann damit also, anschaulich gesprochen, das Blech, wie mit einer starken Taschenlampe aus“leuchten“ und so leichter einen Schaden finden. Das Konzept des phasenverschobene „Ausleuchtens“ in jede Richtung kann mit dem Effekt kombiniert werden, dass gezielt in eine definierte Richtung „gehört“ wird. Anschaulich wirkte das erste wie ein Sprachrohr, das zweite wie ein Hörrohr. Wir haben zunächst ohne Richtwirkung gesendet, d.h. das Signal

verteilt sich auf kreisförmigen Spuren rund um den sendenden Piezo. Die gemessenen, rücklaufenden Reflektionen wurden dann mit dem Prinzip des Richtmikrophons aufgenommen. Im Folgeschritt wurde dann auch das aktive beamforming eingesetzt.

1.3.3 Messungen und Ergebnisse

Die vorab beschriebene Prozedur des beamformings mit Dispersionskorrektur und adaptiver Anpassung des Phasenshiftes wurde an einer quadratische Stahlplatte getestet, vgl. Bild 6. Das Erregungssignal war wiederum das oben vorgestellte toneburst Signal mit einer zentralen Frequenz bis zu 150 Hz. Der Schaden wurde durch ein gebohrtes Loch mit $\varnothing 1,5$ mm simuliert. Die Frequenz des S_0 -Modes betrug 120 Hz.

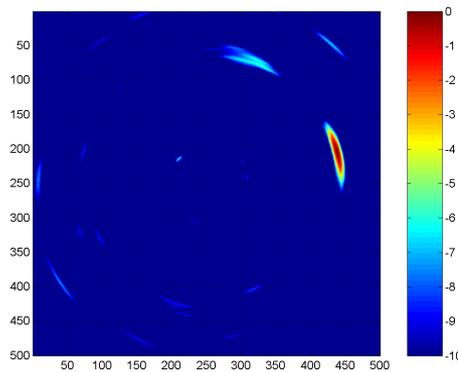


Bild 6: Lokalisation des Loches mit $\varnothing 1,5$ mm

Der so geschädigte Zustand wurde als Ausgangszustand für die nächste Messung verwendet, d.h. die vorliegende Messung war dann die sog. Nullmessung, wegen der Subtraktion der Signale verschwindet bei der Folgemessung das Signal am gebohrten Loch. Der Folgeschaden wurde durch das Aufkleben des Metallteils simuliert. Bild 7 zeigt das Ergebnis, wiederum mit Dispersions-Kompensation und adaptiver Korrektur des Phasenshifts, jeweils am A_0 - und am S_0 -Mode. Es sind beispielhaft die Ergebnisse für zwei verwendete Frequenzen (70 Hz und 110 Hz) dargestellt. Das Bild 7d ergibt sich bei Superposition aller Teilbilder

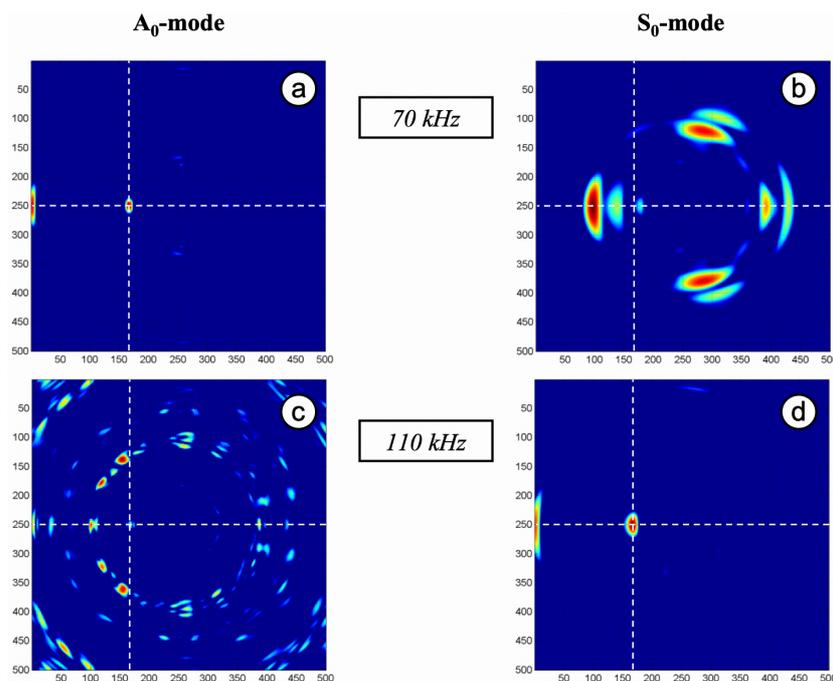


Bild 7: Lokalisation einer aufgeklebten Zusatzmasse

Ein wesentlicher Punkt ist die Festlegung der Piezo-Größe, da die Festlegung des Piezo-Durchmesser immer ein Kompromiss zwischen aufzubringender Schallenergie und der Wellenlänge der erregten Moden darstellt [12.13].

1.3.4 Schadenslokalisierung bei Stahlkonstruktionen mit aufgeschweißten Querrippen

In Bild 8 wird die Wellenausbreitung bei Durchlaufen einer Querrippe visualisiert. An der Rippe teilt sich die Wellenenergie auf in einen Teil, der unter der Rippe durchläuft, einer der reflektiert wird und einer, der in die Rippe läuft. Wenn der Zustand mit Querrippe als Nullmessung genommen wird, fallen die Einflüsse bei der anschließenden Schadensermittlung nach Einbringung des Schadens 3 (hinter der Rippe) heraus.

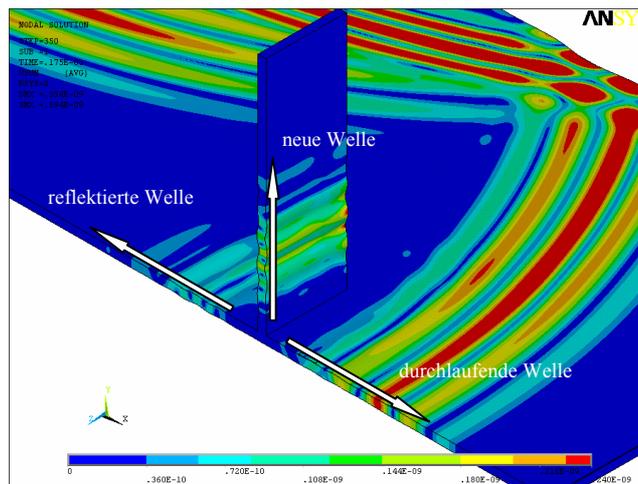


Bild 8: Aufteilung der Wellen

Die bisherigen Untersuchungen waren auf reine Stahlplatten ohne weitere konstruktive Störungen bezogen. Dies stellte allerdings in der Baupraxis eine starke Einschränkung dar, da große, flache Bleche i.d.R. immer mit Quer- und/oder Längssteifen versehen sind. Bei den experimentellen Untersuchungen wird aktives und passives beamforming eingesetzt, d.h. es wird ein gerichteter beam ausgesendet und mit einem gerichteten beam „gehört“. Zusätzlich wurden ein weiterer Schaden 3 (=Loch) hinter einer aufgeschweißten Querrippe eingebracht, vgl. dazu Bild 8.

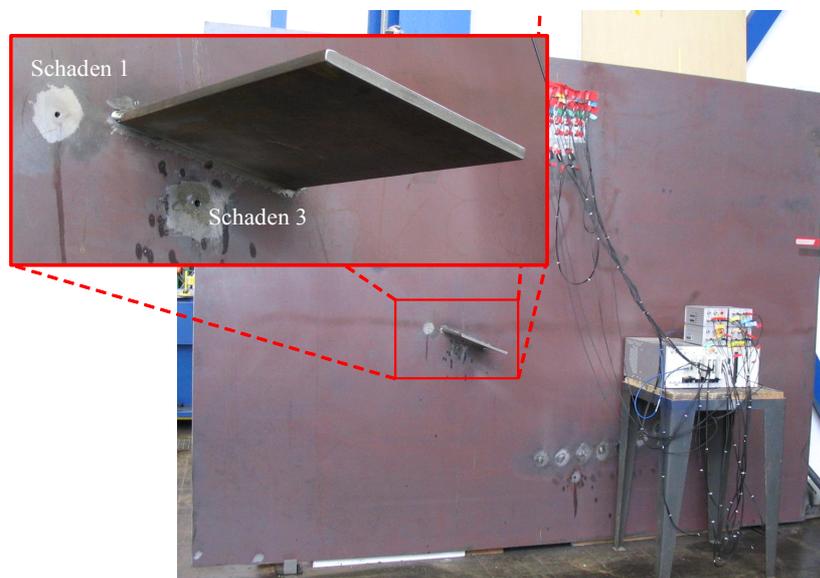


Bild 8: Versuchskörper mit Querrippe und zusätzlichem Loch (Schaden 3)

In Bild 9 ist das Ergebnis dargestellt. Man erkennt den Schaden 3 auch hinter der Rippe genau so deutlich, wie den daneben. Offenbar werden durch solche Querrippen die Reichweite der Schadenserkenkung also kaum eingeschränkt.

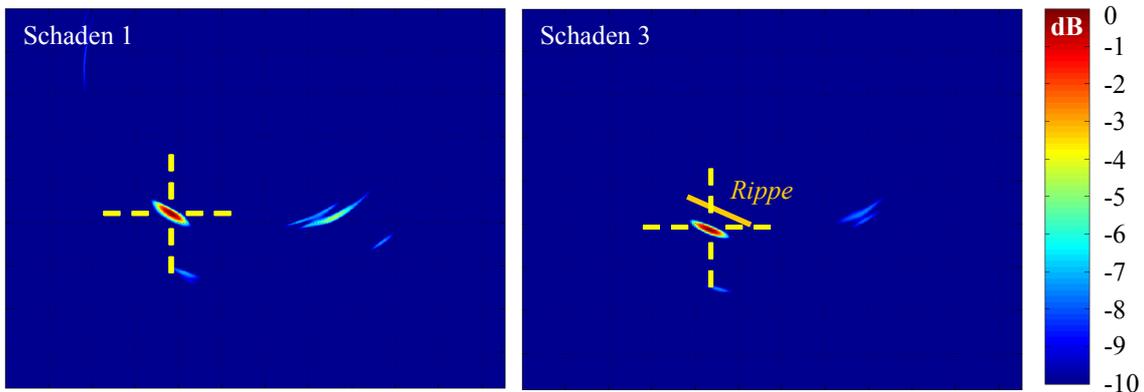


Bild 9: Vergleich der Schäden 1 und 3

2 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass eine genaue Schadenslokalisierung auch kleinerer Schäden ($\varnothing 1,5$ mm) mit Hilfe relativ billiger Piezo-Elemente möglich ist. Die Signalauswertung wurde dabei weitestgehend mit selbst geschriebenen Routinen vorgenommen. Die Interpretation des Ergebnisses ist anhand der dargestellten Bilder einfach möglich.

Weitere Arbeiten konzentrieren sich auf die Untersuchung weiterer Parameter, wie z.B.

- Blechdicke (bis $t=100$ mm) : zufriedenstellend!
- Geometrie (andere Querrippenkonstellationen) zufriedenstellend!
- Schadensart (reale Ermüdungsrisse): noch nicht untersucht
- Anordnung der Piezos: noch nicht untersucht

Der letzte Punkt bezieht sich auf eine großflächige Anordnung von Piezos z.B. umlaufend in Randnähe.

Referenzen

1. PI Ceramic GmbH 2004: Piezokeramische Materialien und Bauelemente
2. CeramTec AG 2004. Piezoelektrische Bauteile (literature of the company)
3. J.McGregor, B.Nooteboom, N.Ivory, „The Application of Long Range Ultrasonics for the Inspection of Riser Pipes“, 16th World Conference on NDT, 2004, Montreal
4. Doerlemann, C., Muss, P., Schugt, M. & Uhlenbrock, R. 2004. Improved active vibration control using the linear properties of piezoelectric actuators. Actuator 2004, 9th International Conference on new Actuators, Bremen 14.-16. Juni 2004
5. Viktorov, I.A. 1967. Rayleigh and Lamb Waves. Plenum Press, New York 196
6. Achenbach, J.D. 1975. Wave propagation in elastic solids. Elsevier Science Publishers 1975
7. Wilcox, P.D. 2003. A Rapid Signal Processing Technique to Remove the Effect of Dispersion from Guided Wave Signals. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.50, April 2003
8. Oppenheim, A.V. & Schafer, R.W. 1999. Zeitdiskrete Signalverarbeitung. 3rd edition, R.Oldenbourg Verlag Muenchen Wien 1999
9. Ansys Inc. 2005: Ansys Release 10 Documentation
10. Christensen, J.J. & Hald, J.2004. Beamforming. Technical Review No.1 – 2004. Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Nærum Denmark, 2004
11. Sundararaman, S., Adams, D.E., Rigas, E.J. 2003. Structural Damage Characterization through Beamforming with Phased Arrays. Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford USA, September 2003
12. Loppe, S.: Schadensdetektion in Stahlbauteilen mit Hilfe geführter Wellen. Dissertation TU Braunschweig, 2008.
13. Peil,U., S.Loppe: An approach for monitoring plane structures with low-cost transducers. Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford USA, September 2007.